

## **PROHLÁŠENÍ O AUTORSTVÍ**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě písemnou práci ke státní doktorské zkoušce, zpracovanou na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci na téma:

*Stav povrchů vrtaných nekonvenčními nástroji opatřenými progresivními PVD vrstvami*

vypracoval samostatně, pod odborným dohledem školitele a s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

V Plzni dne:.....

.....

Podpis autora

## **PODĚKOVÁNÍ**

Především děkuji svému školiteli panu prof. Křížovi za vedení této disertační práce. Dále bych rád poděkoval všem členům týmu na KMM za spolupráci.

## ANOTACE

<b>AUTOR</b>	Ing. Šimeček	Jiří
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie	
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	Prof. Dr. Ing. Kříž	Antonín
<b>PRACOVIŠTĚ VEDOUcíHO</b>	Katedra materiálu a strojírenské metalurgie	
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>disertační</b>	
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Stav povrchů vrtaných nekonvenčními nástroji opatřenými progresivními PVD vrstvami	

Fakulta: Strojní

Katedra: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

Rok odevzdání: 2017

**Počet stránek (A4 a ekvivalentů A4)**

<b>Celkem</b>	130	<b>Textová část</b>	79	<b>Grafická část</b>	51
---------------	-----	---------------------	----	----------------------	----

<b>STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Práce je zaměřena na vyhodnocení integrity povrchu u otvorů vytvořených nekonvenčními vrtacími nástroji. Tyto jsou schopny vytvořit otvor ve vysoké kvalitě a navíc jsou schopny provést protváření vrchní vrstvy za účelem jejího zpevnění. Cílem by mělo být vypracování určitého směrodatného postupu, jak tento stav povrchu zachytit.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	Integrita povrchu, PVD vrstvy, zbytková napětí, válečkování, podpovrchové zpevnění

## SUMMARY

<b>AUTHOR</b>	Surname (including of Degrees)	Name
<b>FIELD OF STUDY</b>	Materials Engineering and Engineering Metallurgy	
<b>SUPERVISOR</b>	Šimeček	Jiří
<b>INSTITUTION</b>	Department of the materiál sciences and metallurgy	
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>dissertation</b>	
<b>TITLE OF THE WORK</b>	The state of surfaces of holes produced by unconventional tools deposited with progressive PVD layers	

Faculty: Mechanical Engineering

Department: Materials Engineering and Engineering Metallurgy

Submitted in: 2017

### Number of pages (A4 a eq. A4)

<b>Totally</b>	130		<b>Text part</b>	79		<b>Graphical part</b>	51
----------------	-----	--	------------------	----	--	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The thesis is aimed on the evaluation of surface integrity in holes created by unconventional drilling tools. They are capable of forming a precis hole and, moreover, are capable to strengthen the upper layers. The aim should be to develop a certain standard procedure for evaluate the state of this surface.
<b>KEY WORDS</b>	Surface integrity, PVD layers, residual stresses, roller coating, underbody reinforcement

## KURZFASSUNG

<b>AUTOR</b>	Šimeček Ing.	Jiří
<b>STUDIENFACH</b>	Materials Engineering and Engineering Metallurgy	
<b>BETREUER</b>	Kříž Prof. Dr. Ing.	Antonín
<b>INSTITUTION</b>	Institut von Material Wissenschaft und Metalurgie	
<b>ART DER ARBEIT</b>	<b>dissertation</b>	
<b>TITEL</b>	Der Zustand der Oberflächen von Löchern, die durch unkonventionelle Werkzeuge produziert wurden, die mit progressiven PVD-Schichten abgeschieden wurden	

Fakultät: Maschinenbau

Katheder: Materials Engineering and Engineering Metallurgy

Abgeben: 2017

### ANZAHL VON SEITEN (A4 a eq. A4)

<b>Total</b>	130		<b>Text teile</b>	79		<b>Grafik</b>	51
--------------	-----	--	-------------------	----	--	---------------	----

<b>KURZBESCHREIBUNG</b>	Die Arbeit zielt auf die Bewertung der Oberflächenintegrität in Löcher, die durch unkonventionelle Bohrwerkzeuge entstehen. Sie sind in der Lage, ein Präzisionsloch zu bilden und sind darüber hinaus in der Lage, die oberen Schichten zu verstärken. Ziel ist es, ein bestimmtes Standardverfahren zur Bewertung des Zustands dieser Oberfläche zu entwickeln.
<b>SCHLÜSSELWÖRTER</b>	Die Integrität der Oberfläche der PVD-Schicht, Restspannungen , Rollen, Untergrundverfestigung

## Obsah

Seznam obrázků .....	10
Seznam tabulek .....	13
Seznam zkratk .....	14
Glosář .....	16
Úvod .....	17
1 Cíle disertační práce .....	18
2 Povrch a jeho definice .....	20
2.1 Zpevnění povrchových vrstev .....	21
2.2 Technologická dědičnost v oblasti zpevnění povrchů .....	23
2.3 Vliv vlastností obráběného materiálu na zpevnění povrchu .....	24
2.4 Funkce stavu povrchu na únavu materiálu .....	26
2.5 Vliv technologie výroby na únavové vlastnosti .....	28
2.6 Kontaktní povrchové poškození .....	29
2.7 Povrch z hlediska lomové mechaniky .....	31
3 Integrita povrchu.....	34
3.1 Veličiny působící na integritu povrchu .....	34
3.2 Úkoly řešené pomocí integrity povrchu .....	34
3.2.1 Degradace materiálu vs. Integrita povrchu.....	35
3.3 Zbytková napětí .....	35
3.3.1 Vznik zbytkových napětí během třískového obrábění .....	35
3.3.2 Vliv zbytkových napětí na vlastnosti povrchu .....	37
3.4 Vliv uvolněných částic kovu na integritu povrchu .....	41
3.5 Měření zbytkových napětí .....	42
3.5.1 Metody měření zpevnění povrchů .....	42
3.5.2 Měření zbytkových napětí pomocí rentgenové difrakce .....	43
3.6 Metoda Barkhausenova šumu.....	44
3.6.1 Magnetické vlastnosti materiálů.....	44
3.6.2 Barkhausenův šum .....	44
3.6.3 Difrakční analýza otvorů.....	47
3.6.4 Diskuse výsledků difrakce na vzorcích z materiálu C45 .....	48
3.7 Vliv povrchových morfologií na integritu povrchu .....	48
3.8 Možný postup k prověření vlivu povrchových morfologií.....	51
3.8.1 Drsnost povrchu – dotykový profilometr Diavite DH – 5.....	53
3.9 Vliv struktury a mikrostruktury materiálů na povrchovou integritu .....	56

3.10	Integrita povrchu Ti slitin.....	58
3.11	Integrita povrchu při obrábění kalených ocelí.....	58
3.12	Integrita povrchu křehkých materiálů .....	60
3.13	Zkoumání integrity povrchu při technologických operacích probíhajících za relativně nízkých silových zatíženích.....	63
3.14	Současné aplikace integrity povrchu v průmyslové praxi .....	64
3.15	Norma integrity povrchu .....	68
3.15.1	Vyhodnocení přínosu normy .....	69
4	Analýza povrchových vlastností pomocí elektrochemie.....	71
4.1	Koroze kovů z elektrochemického hlediska.....	72
4.1.1	Katodická polarizace.....	73
4.1.2	Měření polarizačního odporu.....	74
5	Měření povrchového napětí .....	76
5.1	Měření povrchové energie .....	76
6	Experimentální kování stavu integrity povrchů vzorků elektrochemickou potenciometrií a měřením velikosti povrchové energie.....	78
6.1	Tenziometrie.....	79
	Na površích, kde by tuto metodu nebylo možno použít, nebo je nutno získat údaje z větší plochy vzorku, jsou používány jiné metody například Wilhelmyho metodu [38-39]..	79
6.2	Experimentální aparatura a postup měření .....	79
6.3	Výsledky měření.....	80
6.3.1	Výsledky experimentu měření pomocí tenziometru .....	80
6.4	Měření stavu povrchu pomocí lineární polarizace .....	81
7	Integrita povrchu šedé litiny .....	82
7.1	Použité vzorky.....	83
7.2	Chemické niklování.....	84
7.3	Experiment „železení“ .....	84
7.4	Kontrola korozní rychlosti.....	87
7.5	Diskuse výsledků experimentu „železení“ .....	87
8	Hlavní řešený experiment .....	88
8.1	Použité řezné podmínky pro obrábění .....	88
8.2	Použité materiály.....	88
8.2.1	Šedá litina GG20 .....	88
8.2.2	Ocel C45.....	90
8.2.3	Ocel D 3 .....	91
8.2.4	Inconel 718.....	93

8.2.5	Al slitina AA 6082.....	94
8.3	Použité vzorky.....	94
8.4	Materiál C45 (ČSN 412050) .....	95
8.4.1	Statická zkouška tahem.....	96
8.4.2	Statická zkouška tlakem .....	97
8.4.3	Zhodnocení.....	98
8.4.4	Zkoumání povrchových morfologií.....	98
8.4.5	Nástroj „R“.....	99
8.4.6	Nástroj „O“ .....	99
8.4.7	Vyhodnocení měření morfologie povrchu .....	100
8.5	Vyhodnocení metalografické mikrostruktury v podpovrchových vrstvách ...	100
8.5.1	Nástroj R.....	101
8.5.2	Nástroj O.....	101
8.5.3	Nástroj Hoffmeister.....	102
8.5.4	Vyhodnocení testu .....	102
8.6	Měření mikrotvrdosti podpovrchových vrstev.....	102
8.7	Impact test.....	103
8.7.1	Použité vzorky .....	104
8.7.2	Interpretace výsledků Impact testu .....	106
8.8	Další parametry.....	106
8.9	Diskuse výsledků posuzovaných otvorů u materiálu ČSN 412050.....	107
8.10	Al slitina AW 8062 T6.....	107
8.10.1	Mechanické zkoušky.....	107
8.10.2	Otvory vytvořené vrtákem R .....	109
8.10.3	Otvory vytvořené nástrojem O.....	112
8.10.4	Otvory vytvořené sdruženým vrtacím nástrojem Hoffmeister.....	113
8.10.5	Závěr ze zkoumání otvorů vytvořených v materiálu AW 2032 T6 .....	114
8.11	Šedá litina GG 20 (ČSN 422420).....	115
8.12	Makroskopické pozorování.....	116
8.13	Mikroskopické pozorování.....	117
8.13.1	Povrch vrtaný .....	117
8.13.2	Měření drsnosti .....	118
8.13.3	Přechod mezi vrtaným a tvářeným povrchem.....	118
8.13.4	Tvářený povrch s vytrhaným grafitem .....	119
8.13.5	Měření drsnosti .....	119



---

8.13.6	Tvářený povrch zahlazeny .....	120
8.13.7	Měření drsnosti .....	120
8.13.8	Závěr zkoumání otvorů vytvořených v litině GG20.....	121
8.14	Materiál D3 (ČSN 419436) .....	121
8.14.1	Tepelné zpracování .....	123
8.14.2	Zkouška tahem .....	124
8.14.3	Zkouška tlakem.....	124
8.14.4	Vyhodnocení dodaného stavu materiálu D3.....	125
8.14.5	Sdružený nástroj – „Hoffmeister“ – vzorek č. 10 (posuv 0,08 mm/ot). 125	
8.14.6	Nástroj – „Hoffmeister“ – vzorek 7 (posuv 0,04) .....	126
8.14.7	Sdružený nástroj – „Hoffmeister“ – vzorek 9A (posuv 0,06) vzorek 9B (posuv 0,08) 9A.....	127
8.14.8	Sdružený nástroj – „Hoffmeister“ – vzorek 11 (posuv 0,08).....	128
8.14.9	Nástroj – O – vzorek 12 (posuv 0,04) .....	128
8.14.10	Sdružený nástroj – R – váleček 13 (posuv 0,04).....	129
8.15	Diskuse výsledků integrity povrchu oceli D3 .....	129
8.16	Diskuse výsledků hlavního experimentu .....	130
	Závěr.....	132
9	Citovaná literatura .....	133
	Přílohy.....	i

## Seznam obrázků

Obrázek 2-1 – a) Vrstva Zn-Ni [1] b) PVD vrstva TiAlN na nástrojové oceli [2] .....	20
Obrázek 2-2– Ovlivnění povrchových vrstev materiálu při třískovém obrábění [2] .....	21
Obrázek 2-3- Vznik plasticky deformované vrstvy v obráběném materiálu [2].....	22
Obrázek 2-4 - Typy závislosti mikrotvrdosti na hloubce povrchové vrstvy [2] .....	22
Obrázek 2-5- Vliv stavu materiálu obrobku na průběh mikrotvrdosti [2] .....	24
Obrázek 2-6 - Stadia únavového procesu (schematicky) [3].....	27
Obrázek 2-7-Vliv intenzity obrábění na budoucí únavové vlastnosti [5] .....	28
Obrázek 2-8– Skrytá trhлина po broušení na klikovém hřídeli [6] .....	29
Obrázek 2-9- Typické ukázky rizikových míst pro vznik únavového poškození [7].....	29
Obrázek 2-10– S-N křivka pro ložiskovou ocel AISI 52100 (ČSN 4114109) [8].....	30
Obrázek 2-11– Měřené parametry trhliny [12].....	32
Obrázek 2-12 - Pokles napětí v závislosti na vzdálenosti od trhliny [12] .....	33
Obrázek 3-1 – Vznik zbytkových napětí při obrábění.....	36
Obrázek 3-2 – Rozložení teploty při obrábění.....	36
Obrázek 3-3 - Silové působení na necelistvostech při různých směrech zbytkových pnutí. ...	37
Obrázek 3-4 - Princip válečkování [15].....	37
Obrázek 3-5 – Ukázka válečkovacího nástroje [16] .....	39
Obrázek 3-6 - Ovlivnění válečkováním [17].....	39
Obrázek 3-7 – Stroj na zkoušení odolnosti povrchů proti povrchové únavě [18] .....	40
Obrázek 3-8 – Úbytky materiálu na otáčku[18] .....	40
Obrázek 3-9 – Vývoj zahlazování důlku a) 0 cyklů b) 120 000 cyklů c) 240 000 cyklů [18].....	41
Obrázek 3-10 – vznik povrchového poškození [8] .....	41
Obrázek 3-11 – a) Měření šikmým řezem b) Měření šikmým řezem [20] .....	43
Obrázek 3-12 - Původní uspořádání Barkhausenova pokusu [21] .....	45
Obrázek 3-13 - Poloha vzniku Barkhausenova šumu [21].....	45
Obrázek 3-14 - Geometrie vzorků pro difrakci.....	47
Obrázek 3-15 – 3D pohled na plochu vyvrtaného otvoru .....	49
Obrázek 3-16 – typické průběhy autokorelační funkce [6].....	50
Obrázek 3-17 - a) vzorek 3 50x zvětšení b) vzorek 5 100x zvětšení [22].....	51
Obrázek 3-18 - a) vzorek 6 50x zvětšení b) vzorek 12 100x zvětšení [22].....	51
Obrázek 3-19 – Povrch vzorku č. 3 – konfokální mikroskop LEXT [22] .....	52
Obrázek 3-20 - Znázorněné defekty na vzorku č. 3 [22] .....	52
Obrázek 3-21 – Rýhovaný povrch vzorku č.12 [22].....	53
Obrázek 3-22 – Profily všech měřených vzorků [22].....	54
Obrázek 3-23 – Nosné křivky s označením vzorků. [22].....	55
Obrázek 3-24- a) Struktura Mg slitiny AZ-61 [23] .....	56
Obrázek 3-25– Povrch litinového pístního kroužku .....	57
Obrázek 3-26- Namáhání povrchů [17] .....	58
Obrázek 3-27–Dosažené drsnosti Ra a plošná drsnost Sra. [25].....	59
Obrázek 3-28- Distribuce zbytkových napětí [25] .....	60
Obrázek 3-29- Závislost kritické hloubky řezu na geometrických charakteristikách [23].....	61
Obrázek 3-30- a) test obrábění sodného skla [23].....	62
Obrázek 3-31-a) obrábění PZT keramiky [23] .....	62
Obrázek 3-32– Vznik poškození u řezání keramických materiálů [6] .....	63
Obrázek 3-33- Příčné výbrusy vzorky obrobene pomocí EDM [32] .....	64

Obrázek 3-34 – Brusné spáleniny [33] .....	65
Obrázek 3-35 – Bílá vrstva formována při soustružení oceli ANSI 1065 [6].....	66
Obrázek 3-36 - a) Čelní frézování nástrojem s pozitivním úhlem čela bez chlazení a s chlazením b) Čelní frézování nástrojem s negativním úhlem čela bez chlazení a s chlazením[35] .....	67
Obrázek 3-37 - Průběh časované meze únavy vzorků [35] .....	67
Obrázek 3-38– a) Vzorek pro měření únavy [36] .....	68
Obrázek 4-1 – Změna potenciálů poločlánkových reakcí na smíšený potenciál [32] .....	73
Obrázek 4-2- Změna potenciálu z Ekor hodnotu $\epsilon_k$ [42] .....	73
Obrázek 4-3– Experimentální polarizační křivka [42] .....	74
Obrázek 5-1- měření povrchové energie [37] .....	76
Obrázek 6-1– Ukázka goniometru/tenziometru $f_y$ Ramé/Hart [39] .....	79
Obrázek 7-1- a) Upevnění vzorku na kabelu b) Uspořádání měřící aparatury.....	83
Obrázek 7-2- a) Železení 30 min 200x zvětšení.....	84
Obrázek 7-3- a) Výbrus Litina 1 h železení 1,5 h niklování 500 x zvětšení, .....	85
Obrázek 7-4- a) 2 h železení 200x, velikost výstupků do 5 $\mu\text{m}$ b) 2 h železení 50x.....	85
Obrázek 7-5-a) 3h železení 1,5 h niklování 200x b) pouze niklování 1,5 h 200x.....	86
Obrázek 7-6-a) 2 h železení 100 x b) 2 h železení 2 h niklování 200 x zvětšení .....	86
Obrázek 7-7-a) Pouze niklovaná strana vzorku b) Pouze niklovaná strana vzorku 200x.....	86
Obrázek 8-1 – a) Diagram závislosti mechanických vlastností [40] b) různé tvary grafitu v šedých litinách s lupínkovým grafitem [40].....	89
Obrázek 8-2– a) struktura oceli C45 nezakalená b) struktura oceli C45 zakalená .....	90
Obrázek 8-3– Mikrostruktura oceli D3, leptáno 2% Nital, 1000x zvětšeno, .....	92
Obrázek 8-4– Mikrostruktura slitiny Inconel 718 [50] .....	93
Obrázek 8-5– Ukázka použitých vzorků .....	95
Obrázek 8-6– a) kontrola oduhlíčení, b) kontrola velikosti vměstků, max 61 $\mu\text{m}$ .....	96
Obrázek 8-7 – a) Diagram tahové zkoušky b) Lomová plocha po zkoušce tahem.....	96
Obrázek 8-8– pracovní diagram zkoušky materiálu C45 (ČSN 412050) po zkoušce tlakem....	97
Obrázek 8-9- Ukázka zpevněné oblasti a její hloubka.....	98
Obrázek 8-10-a) Oblast více narušená obráběná nástrojem b) Oblast více narušená obráběná nástrojem R .....	99
Obrázek 8-11- Vyhodnocení celého povrchu vzorku .....	99
Obrázek 8-12- Povrch vrtaný nástrojem O.....	99
Obrázek 8-13- Vyhodnocení celého povrchu vzorku .....	99
Obrázek 8-14 - Povrch vrtaný nástrojem „Hoffmeister“ .....	100
Obrázek 8-15 - Vyhodnocení celého povrchu vzorku .....	100
Obrázek 8-16 -Vyhodnocení mikrostruktury podpovrchových vrstev .....	101
Obrázek 8-17 -Vyhodnocení mikrostruktury podpovrchových vrstev.....	101
Obrázek 8-18 - a) Vyhodnocení mikrostruktury podpovrchových vrstev b) Vyhodnocení mikrostruktury podpovrchových vrstev .....	101
Obrázek 8-19-Vyhodnocení mikrostruktury podpovrchových vrstev.....	102
Obrázek 8-20- Schéma měření mikrotvrdomosti .....	102
Obrázek 8-21– Impact test uspořádání [45] .....	103
Obrázek 8-22-a) Trhlina na okraji impact kráteru b) Zvedlý okraj impact kráteru .....	104
Obrázek 8-23– Přechod mezi protvářenou a neprotvářenou oblastí na vyvrtaném otvoru na materiálu C45 (ČSN 412050) .....	106
Obrázek 8-24– a) struktura dodaného vzorku AA6082 ve stavu T0 šipkou označeny oxidické vměstky; na hranicích zrn jsou vyloučeny intermetalické fáze typu $\alpha_c\text{-Al}_{12}(\text{FeMn})_3\text{Si}$ a částice	

$\beta$ -Mg <sub>2</sub> Si. Barevně leptáno. b) Struktura hliníkové slitiny AA6082 T6; šipkami jsou označeny oxidické vměstky vyloučené na hranicích zrn; bílé částice jsou intermetalické fáze typu $\alpha$ -Al <sub>12</sub> (FeMn) <sub>3</sub> Si. Barevně leptáno .....	107
Obrázek 8-25- Místa měření povrchové nanotvrdosti.....	110
Obrázek 8-26- Značení a rozdělení jednotlivých segmentů.....	111
Obrázek 8-27 - Objem vrypu v oblastech vzorku A, B, C, D.....	111
Obrázek 8-28 - Povrch díry vytvořené sruženým vrtacím nástrojem fy. R. ....	112
Obrázek 8-29-a) Delaminace podpovrchové zpevněné vrstvy. ....	112
Obrázek 8-30 - Metalografie příčného řezu podpovrchové oblasti otvoru vytvořeného vrtákem O dokládající přítomnost zpevněné vrstvy: a) váleček č.73, b) váleček č.72. ....	113
Obrázek 8-31- Metalografická struktura příčného řezu.....	114
Obrázek 8-32– Mikrostruktura dodaných vzorků šedé litiny GG20.....	116
Obrázek 8-33- Tvářená (1) a vrtaná oblast (2) .....	117
Obrázek 8-34- Přejít mezi zahrazenou částí.....	117
Obrázek 8-35- Povrch vzorku ve vrtané oblasti .....	118
Obrázek 8-36 - Povrch vzorku ve vrtané oblasti .....	118
Obrázek 8-37- Protvářený povrch s vytrhaným grafitem .....	119
Obrázek 8-38- Tvářený povrch s vytrhaným grafitem .....	119
Obrázek 8-39- Tvářený povrch zahrazený .....	120
Obrázek 8-40- Tvářený povrch zahrazený .....	120
Obrázek 8-41- Defekty zhoršující drsnost povrchu .....	121
Obrázek 8-42–Mikrostruktura dodané oceli D3(ČSN 419436) po žíhání na měkko .....	122
Obrázek 8-43- Mikrostruktura oceli 19436 po žíhání na měkko (podélný směr) .....	122
Obrázek 8-44– a) velikost karbidů b) Okraj tvářeného vzorku .....	123
Obrázek 8-45- Režim provedení tepelného zpracování.....	123
Obrázek 8-46– Mikrostruktura po TZ.....	123
Obrázek 8-47– a) Diagram tahové zkoušky materiálu D3 b) Lomová plocha vzorku .....	124
Obrázek 8-48- Statická zkouška tlakem oceli D3 (ČSN 419436).....	125
Obrázek 8-49 - Zakalená oblast vrtaného otvoru 500x.....	127
Obrázek 8-50 - Ukázka vytvořené více popuštěné vrstvičky na povrchu.....	128
Obrázek 8-51 - Ukázka vytvořené zakalené vrstvičky na povrchu (světlá oblast). ....	128
Obrázek 8-52 - Ukázka vytvořené zakalené vrstvičky na povrchu (světlá oblast). Nejhlubší část. Zvětšeno 500x b) Ukázka tenké vrstvičky v první části vrtané díry (světlá oblast). Zvětšeno 500x .....	129
Obrázek 8-53 - Ukázka popuštěné vrstvy v úvodní části díry (tmavší oblast). ....	129
Obrázek 8-54- Ukázka popuštěné vrstvy ve střední oblasti hloubky díry (tmavší oblast). Zvětšeno 500x .....	130
Obrázek 8-55 - Ukázka popuštěné vrstvy v úvodní části vrtané díry (tmavší oblast). Zvětšeno 500x .....	130
Obrázek 8-56 - Ukázka kalené vrstvy ve střední oblasti hloubky díry (světřejší oblast). Zvětšeno 500x .....	130

## Seznam tabulek

Tabulka 2-1- Střední hodnoty stupně zpevnění různých materiálů [2] .....	25
Tabulka 2-2- Střední orientační hodnoty hloubky zpevnění oceli [2] .....	25
Tabulka 3-1 – Použitelnost vybraných metod měření zbytkových napětí[21] .....	46
Tabulka 3-2-Změřená zbytková napětí vzorek 1 body 1-8A před a po rozřezání .....	48
Tabulka 3-3-Změřená zbytková napětí vzorek 1 body 1-8B před a po rozřezání .....	48
Tabulka 3-4-Zbytková napětí $\sigma$ na řezných plochách vrtaných vzorků 1 až 5 .....	48
Tabulka 3-5– odchylky od nominálního povrchu [6].....	50
Tabulka 3-6– Zjištěné hodnoty Ra, Rz.[22].....	55
Tabulka 4-1- Potenciály jednotlivých poloreakcí .....	72
Tabulka 6-1 – Použité vzorky řezné podmínky.....	78
Tabulka 6-2 – Naměřená drsnost povrchů vzorků .....	78
Tabulka 6-3– drsnost vzorků naměřená na přístroji Alicona – vzorek B1-1 .....	78
Tabulka 6-4– drsnost vzorků naměřená na přístroji Alicona- vzorek B2-1 .....	78
Tabulka 6-5– drsnost vzorků naměřená na přístroji Alicona – vzorek B3-2 .....	79
Tabulka 6-6– Vypočtené celkové volné povrchové energie (mJ/m <sup>2</sup> ).....	80
Tabulka 6-7- Kompletní přehled naměřených úhlů smáčení .....	80
Tabulka 6-8– Získané výsledky z elektrochemického měření .....	81
Tabulka 7-1- Získané výsledky měření korozního potenciálu a korozní rychlosti.....	87
Tabulka 8-1- Chem složení materiálu C45 (ČSN12050).....	90
Tabulka 8-2- Chem složení oceli D3 .....	92
Tabulka 8-3– Chemické složení materiálu Inconel 718.....	93
Tabulka 8-4- Předepsané chemické složení materiálu AA6082 .....	94
Tabulka 8-5– zkouška tahem materiálu C 45 (ČSN 412050) .....	96
Tabulka 8-6- Hodnoty tvrdosti HV <sub>0,05</sub> měřené ve zpevněné a nezpevněné oblasti .....	97
Tabulka 8-7- Získané údaje z měření mikrotvrdosti vzorků vrtaných nástrojem R HV0,05... ..	103
Tabulka 8-8- Získané údaje z měření mikrotvrdosti vzorků vrtaných nástrojem O HV0,05 ..	103
Tabulka 8-9- Získané údaje z měření mikrotvrdosti vzorků vrtaných nástrojem H HV0,05 ..	103
Tabulka 8-10- Získané údaje z měření impact testem u vzorku vrtaných nástrojem R .....	105
Tabulka 8-11- Získané údaje z měření impact testem u vzorku vrtaných nástrojem R .....	105
Tabulka 8-12- Získané údaje z měření impact testem u vzorku vrtaných nástrojem O .....	105
Tabulka 8-13- Získané údaje z měření impact testem u vzorku vrtaných nástrojem O .....	105
Tabulka 8-14- Získané údaje z měření impact testem u vzorku vrtaných nástrojem H .....	105
Tabulka 8-15- Získané údaje z měření impact testem u vzorku vrtaných nástrojem H .....	105
Tabulka 8-16– Výsledky tahové zkoušky .....	109
Tabulka 8-17- Naměřené hodnoty objemu materiálu ve stopách.....	111
Tabulka 8-18- Sledované parametry děr zhotovených různými nástroj.....	115
Tabulka 8-19– Získané hodnoty chem. Složení a mechanických zkoušek vzorků litin.....	116

## Seznam zkratk

PVD	Physical Vapour Deposition (fyzikální způsob nanášení povrchových vrstev)
CVD	Chemical Vapour Deposition (chemický způsob nanášení povrchových vrstev)
TiAlN, CrN, TiN	Představitelé PVD vrstev, vysoká tvrdost, použití v obrábění
HV	Měření tvrdosti dle Vickersovy metody
HB	Měření tvrdosti dle Brinellovy metody
HRC	Měření tvrdosti dle Rockwellovy metody
Fe- $\gamma$	Alotropická modifikace Fe s kubickou plošně středěnou mřížkou
Fe- $\alpha$	Alotropická modifikace Fe s kubickou prostorově středěnou mřížkou
Pa, kPa, Mpa	(megapascal) Jednotka tlaku
Re	Mez kluzu materiálu [MPa]
Rm	Mez pevnosti materiálu [MPa]
Å	Angstrom - jednotka délky 10 <sup>-10</sup> m
$\tau_{\max}$	Taximální smykové napětí [MPa]
$\alpha$ , Kt	Tvarové součinitele vrubu
$\sigma$	Tlak [MPa]
$\rho$	Poloměr zakřivení [mm]
C $\alpha$	Bezrozměrný součinitel gradientu napětí
$\sigma_c$	Mez únavy materiálu
CBN	Kubický nitrid boru - tvrdý nástrojový materiál
CNC	Označující pro stroje vykonávající pracovní pohyb po naprogramované dráze
vc	Řezná rychlost [m/min]
f	Posuv [mm]
ap	Hloubka řezu [mm]
Hz	Hertz, jednotka frekvence, 1 Hz - 1 puls/sec
N	Newton, jednotka síly, 1N = 101.94 g tělesa přitahovaného zemskou silou
Srz	Charakteristika drsnosti materiálu - od nejhlubšího "údolí" do nejvyššího peaku [ $\mu$ m]
SRp	Charakteristika drsnosti materiálu - maximální velikost peaku [ $\mu$ m]
Srv	Charakteristika drsnosti materiálu - maximální hloubka "údolí" [ $\mu$ m]
Rsm	Charakteristika drsnosti materiálu - Střední vzdálenost rýh [ $\mu$ m]
R $\Delta$	Charakteristika drsnosti materiálu - Parametr sklonu profilu [ $\mu$ m]
Rz	Metoda měření drsnosti vytvořeného povrchu počítána z 5 nejvyšších výstupků a 5 nejhlubších "údolí" [ $\mu$ m]
Ra	Metoda měření drsnosti vytvořeného povrchu - střední velikost výstupků [ $\mu$ m]
$\Psi$	Bezrozměrná konstanta získaná měřením
E	Youngův modul pružnosti [MPa]
dc	Kritická hloubka vniku indentoru do materiálu [mm]
Kc	Rázová houževnatost materiálu [J/cm <sup>2</sup> ]
yc	Hloubka povrchového poškození [mm]
R	Poloměr použitého nástroje [mm]
PZT	Piezoelektrická keramika
EDM	Electrical discharge machine
A	Elektrický proud [A]
V	Elektrické napětí (potenciál)[V]
$\Omega$	Elektrický odpor [ohm]
C	Kapacita [F]

Eo	Korozní potenciál [V]
FCC	Kubická mřížka plošně středěná
BCT	Tetragonální mřížka
T6	Proces tepelného zpracování Al slitin
TWI	Jednotka otěruvzdornosti používaná v tribologii

## Glosář

Slovo	význam
PVD	Physical Vapour Deposition (fyzikální způsob nanášení povrchových vrstev)
CVD	Chemical Vapour Deposition (chemický způsob nanášení povrchových vrstev)
TiAlN, CrN, TiN	Představitelé PVD vrstev, vysoká tvrdost, použití v obrábění
HV	Měření tvrdosti dle Vickersovy metody
HB	Měření tvrdosti dle Brinellovy metody
HRC	Měření tvrdosti dle Rockwellovy metody
PZT	Piezoelektrická keramika
EDM	Electrical discharge machine
TWI	Jednotka otěruvzdornosti používaná v tribologii



## Úvod

Materiál strojní součásti lze podle rozšířeného principu rozdělit na objemový materiál, u něhož lze omezeně předpokládat přibližně izotropní vlastnosti, pokud není vzata do úvahy orientace struktury zejména při tváření, nebo po ztuhnutí odlitku a povrchové vrstvy, které tvoří samostatnou entitu.

Velmi častou příčinou provozní destrukce strojních součástí je únava materiálu. Její nejdůležitější vlastností je že se jedná o jev časově závislý. Dalším jejím typickým znakem je, že se únavové poškození často projeví i při namáhání i pod hodnotami meze kluzu. Pokud je vyrobená součást správně navržena a dimenzována a pokud se v objemu materiálu nevyskytují některé vady, jako například vnitřní nečistosti, trhliny apod. má únava nejčastěji svoje hlavní ohnisko vzniku na povrchu součásti, kde postupem času vzniká síť mikrotrhlin, která se postupně rozšiřuje. Nejčastěji v místě, kde je kombinované namáhání nejvyšší a kde se vyskytuje „příznivý“ konstrukční vrub (závit, otvor apod.), z čehož vzniká marginální trhlina, která postupně způsobí její rozšíření do celého objemu materiálu a šíří se postupně do té míry, že již namáhaný průřez není dostatečný, aby byl schopen odolat i běžnému provoznímu zatížení.

Na odolnost proti únavě má značný vliv stav povrchových vrstev, jejichž vliv je předmětem dlouhodobého zkoumání. Na povrch působí v procesu výroby mnoho vlivů. Některým z těchto vlivů se věnuje této práce. Jejich vliv se v případě návrhu součásti na časovanou životnost vypočítává pomocí empiricky stanovených koeficientů. Tyto hodnoty však nemusí vždy plně postihovat stav věcí, které se na povrchu skutečně dějí. Navíc často jsou používány příliš s vysokou tolerancí, takže jsou součásti nezřídka předdimenzovány se všemi negativními důsledky, jako výskyt trojosé napjatosti apod. Vlivy negativně působící na povrch jsou v současné době zkoumány odděleně nezávisle na sobě. Avšak ve skutečnosti tyto jevy působí v součinnosti. Zaměřením mnoha pracovních týmů posledních několika let je pokus tyto vlivy integrovat a pokusit se je interpretovat ve vzájemných souvislostech. Z tohoto se postupem času vyvinula samostatná vědecká disciplína nazývaná integrita povrchu. Jejím úkolem je popsat závislosti mezi jednotlivými vlivy a vzájemnou interakci mezi nimi. Konečným výsledkem by mělo být resumé, zda je vytvořený povrch kvalitní, či nikoliv, nebo porovnání, zda je jeden povrch kvalitnější než ten druhý. Tato práce je zaměřena zejména na vymezení pojmu integrita povrchu. V této práci budou uvedeny experimenty s cílem posoudit integritu povrchu ve vazbě na obrábění a obráběcí podmínky, což je zřejmě nejčastější oblast, kde se bude široká odborná veřejnost s problematikou integrity povrchu setkávat.

## 1 Cíle disertační práce

Hlavním z poslání této práce je vyhodnocení integrity povrchu v otvorech vyvrtaných speciálními nástroji. Tyto nástroje byly vyvíjeny společně se společností HOFMEISTER s.r.o. v rámci řešeného projektu MPO. V posledních letech dochází k rostoucímu tlaku odběratelů na cenu, termíny a zvýšenou kvalitu konečných výrobků. Vše je podpořeno stále posilující konkurencí z Asie, která se vyznačuje velmi levnou výrobou ve velkých množstvích za ceny, kterým výrobci ve vyspělých zemích prakticky nemohou konkurovat. Prozatím lze konstatovat, že i asijské výrobce mají většinou značné problémy s dodržováním norem, technologických postupů a v zpracování, což otevírá prostor pro výrobce odjinud a to zvyšovat kvalitu produkce z pohledu technologie tedy vyrábět produkty, které v Asii jsou vyráběny v nedostatečné jakosti. Druhým možným konceptem je pouze extrémní flexibilita výroby, kdy je předpokládáno vykrývání pouze malých zakázek výrobků, které by se nevyplatily zadávat jinam. Flexibilita je samozřejmě velmi důležitá, ale je jasné, že tato druhá strategie může být riziková. Tato práce je zaměřena především na proces vrtání otvorů, který je jedním z nejčastějších způsobů obrábění, jelikož na každé strojní součásti lze najít alespoň jeden otvor. I zde je samozřejmě kladen tlak na vysokou produktivitu a přesnost, to je však často limitováno charakterem technologie, kterou není možno jednoduše měnit. V případě soustružení, nebo frézování dochází již dlouhodobě k zvyšování rezných rychlostí a tím i k zvyšování úběru materiálu. Při vysokorychlostním obrábění soustružením, nebo frézováním lze použít systém stroj – nástroj – obrobek nastavit na vysokou tuhost, která zároveň zaručí i předepsanou přesnost, popřípadě lze do řetězce zařadit některé konstrukční detaily, které zaručí eliminaci vibrací, které způsobují nepřesnosti, jako jsou např: piezoelektrické aktuátory, které eliminují vibrace vřetena apod.

V procesu vrtání otvorů o menších rozměrech, kdy se nepoužívá většinou hlavňové vrtání, popřípadě jiné metody produktivní výroby otvorů toto nepřipadá v úvahu. Typickým nástrojem v tomto procesu jsou šroubové vrtáky. Již z důvodu jejich konstrukce nemohou mít tyto příliš vysokou tuhost, z důvodu jeho profilu, který je namáhán krutem, tedy smykovým namáháním, které je mnohem méně příznivé co se týče pevnosti. Dále v procesu řezání vzniká velké množství tepelné energie z důvodu tření nástroje o obrobek. V procesu vrtání šroubovými vrtáky není možno jednoduše teplo z řezu odstraňovat. Zvyšováním rezné rychlosti by znamenalo namáhání, které znamená zvýšené nároky na materiál nástroje. Jelikož jsou dnes využívány materiály na základě rychlořezných ocelí, nebo slinutých karbidů povlakované PVD (CVD) vrstvami, lze říci, že již výrazně lepší nástrojové materiály, co se týče pevnosti, tvrdosti a odolnosti proti tepelnému namáhání zřejmě nalezeny nebudou. Zřejmě bude pokračovat vývoj ve směru vyšší rázové houževnatosti, ale i tato cesta má svoje limity. Tedy přílišné zvýšení rezné rychlosti není možné, jelikož by to znamenalo destrukci nástroje a i možné znehodnocení obrobku, který může mít značnou hodnotu. Při nutnosti výroby otvorů, u kterých je požadavek zvýšené přesnosti při výrobě je nutno zařadit více operací:

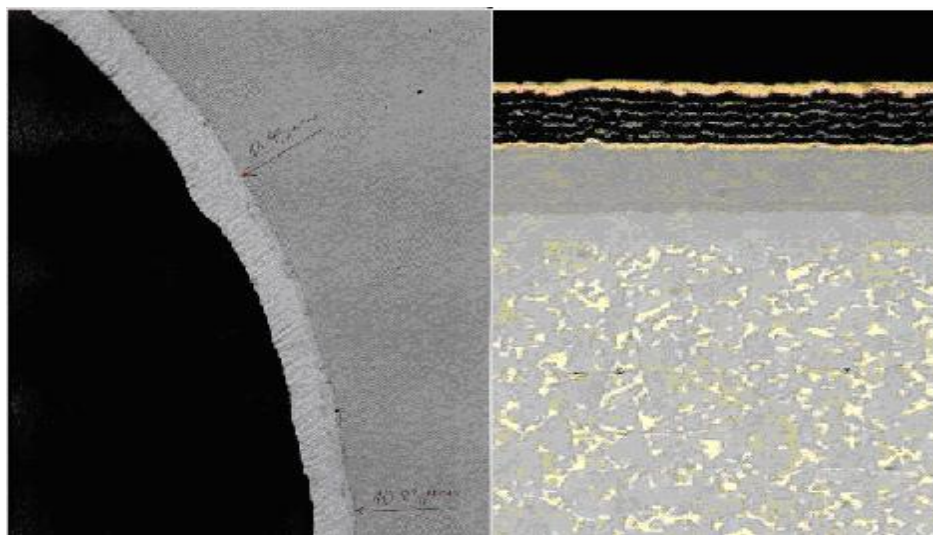
- Vrtání otvoru s přídavkem pro dokončení
- Dokončení otvoru pomocí výhrubníku a výstružníku

Toto samozřejmě znamená zdržení, navíc může dojít k nepřesnostem apod. Možným řešením jsou v rámci projektu MPO vyvinuté nástroje. Tyto jsou kombinací vrtáku a válečkovacího (tvářecího) nástroje. Filosofii tohoto postupu je vytvoření otvoru vysokou

řeznou rychlostí, přitom tvářecí element zvýší únavové charakteristiky vytvořeného povrchu. Zároveň tato konstrukční úprava slouží jako kalibrovací nástroj. Vytvořený otvor vykazuje na jednu technologickou operaci vysokou přesnost (až IT6-IT7). Aby bylo možné výsledky porovnat, byly vybrány 2 konkurenční nástroje renomovaných výrobců stejné koncepce. Jelikož jsou některé aspekty řešeného projektu předmětem řízení o udělení průmyslového vzoru a patentu, nelze prezentovat konstrukční detaily nástrojů a taktéž některé výsledky z realizovaných testů ve vazbě na posuzované dodavatele. V rámci posouzení integrity povrchu nebylo počítáno s měřením zbytkových napětí na vytvořených površích. Přesto je zde předpoklad, že by touto cestou mohly být získány velmi cenné informace.

## 2 Povrch a jeho definice

Povrch je nejcitlivějších oblastí na vyrobené součásti. Z hlediska matematické definice se jedná o množinu vrchních atomů součásti mezi okolním prostředím a vlastní hmotou součásti, které směrem ven ze součásti nemají návaznost na další vrstvu atomů součásti. Z hlediska povrchového inženýrství nelze s takovou definicí vystačit. Ve skutečnosti je povrch ucelený systém sestávající se z několika oblastí, které zasahují přes podpovrchové vrstvy až do „základního materiálu“. V závislosti na použitém způsobu obrábění či jiných typech technologie výroby může být jejich hloubka značně rozdílná. První svrchní vrstva tvoří rozhraní mezi vlastní součástí a okolním prostředím. Definice povrchu může být dle autorů různá, avšak v naprosté většině případů je na povrch nahlíženo jako na komplexní vysoce členitý systém. Členitost povrchu je obecně nazývána morfologií a kvantitativně bývá dílensky vyhodnocována jako drsnost povrchu. Z hlediska integrity povrchu se jedná pouze o jednu z mnoha vyhodnocovaných aspektů. V běžné průmyslové praxi se však jedná o nejčastěji vyhodnocený aspekt. Samostatnou kapitolou v přípravě funkčních povrchů jsou přímo vytvářené tenké vrstvy s odlišnou chemickou a fyzikální podstatou, než vykazuje základní substrát. Jedná se například o vrstvy cementační, nitridační, popřípadě PVD a CVD vrstvy nebo galvanické chromové, popř. niklové povlaky aj. V případech deponování vrstev je zcela zásadní přechodová oblast a její adheze (přilnavost) k základnímu materiálu. Nezanedbatelným parametrem je i koheze nanesené vrstvy, tj. její soudržnost. Při deponování vrstev není neobvyklý vznik vrstvy s vynikajícími mechanickými a fyzikálně-chemickými vlastnostmi, avšak její použití je často limitováno nedostatečnou adhezí se substrátem. Tento problém bývá často řešen při PVD depozici, nebo depozici duplexních vrstev. Značnou roli v tomto případě může hrát i nedostatečná epitaxe (navazování) osnov krystalových mřížek fází substrátu a fází vznikající vrstvy.



Obrázek 2-1 – a) Vrstva Zn-Ni na ocelovém substrátu [1] b) PVD vrstva TiAlN na nástrojové oceli [2]

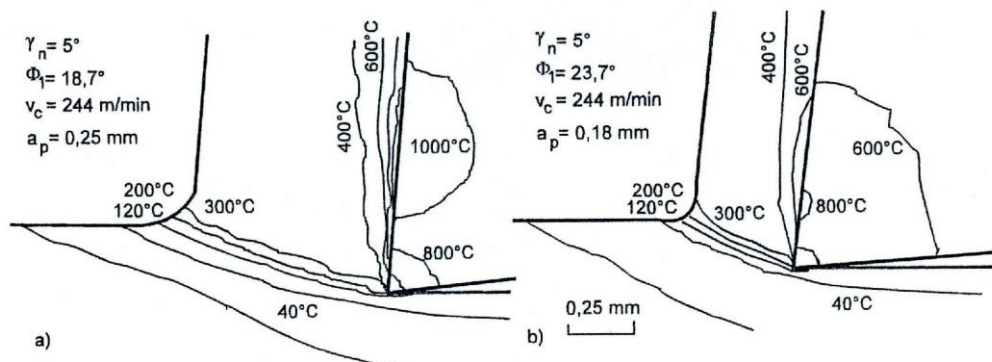
Na obr 2-1 a je vrstva Zn-Ni povlaku na nízko-uhlíkové konstrukční oceli S235. Na obr. 2-1 b je zdokumentována sendvičová multivrstva TiAlN. Zde je možné pozorovat přechodovou oblast mezi deponovanou vrstvou a základním substrátem. PVD vrstva vykazuje vysokou tvrdost, otěruvzdornost, ale i křehkost, základní substrát je měkčí a houževnatější. Kombinace uvedených vlastností představuje komplexní systém, který umožní získat vlastnosti, které by v objemovém materiálu nebyly možné dosáhnout, popřípadě by cena za objemový materiál byla

příliš vysoká. Při nedodržení specifických podmínek použití (neopatrná manipulace, chybně nastavené obráběcí podmínky) může, avšak dojít velmi snadno k nevratné destrukci součásti.

## 2.1 Zpevnění povrchových vrstev

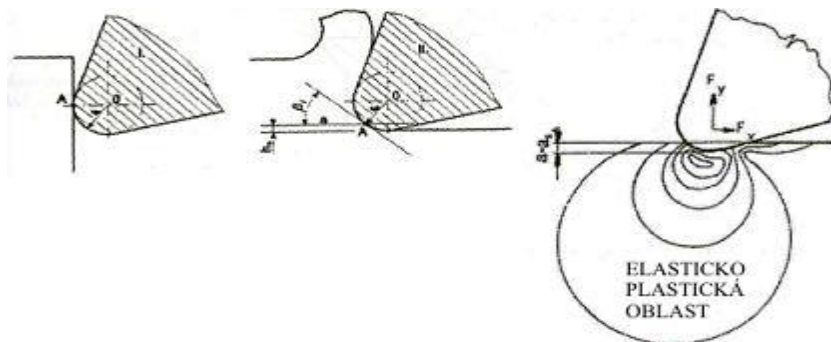
Mezi nejdůležitější parametry stavu povrchového ovlivnění při obrábění patří zejména povrchové zpevnění, na kterém do značné míry závisí ostatní měřené parametry, jako jsou zbytková napětí a ovlivnění mikrostrukturního stavu. Povrchové zpevnění vzniká zejména kombinací silového a tepelného působení řezného nástroje na obrobek. V procesu třískového obrábění se nástroj pohybuje vůči obrobku a čelem před sebou tlačí odstraňující se vrstvu materiálu, která se plasticky deformuje. Část této plastické deformace je přenesena i do základního materiálu, tedy do vznikající součásti. V místě vzniku příznivých podmínek pro stříhání materiálu se vrstva rozděluje a vzniká tříska, která odchází pryč. Zajímavé je rozložení deformací ve vznikající obráběné ploše – čím jsou plastické deformace v tříске intenzivnější, tím je distorze těsně přiléhajícího objemu materiálu menší a naopak [2].

Obecně je zpevnění vnitřním projevem plastické deformace. Zpevnění je charakterizováno jako zvýšený odpor krystalické stavby kovů proti pohybu dislokací. Veškeré jevy, které brání tomuto jevu (hranice zrn, precipitáty, jiné dislokace apod.) zvyšují zpevnění.



Obrázek 2-2– Ovlivnění povrchových vrstev materiálu při třískovém obrábění [2]

Vznik deformací na obráběném povrchu je způsoben řezným klínem nástroje, který není nikdy ideálně ostrý – hřbet a čelo obráběcího nástroje se nestýkají v přísmce, ale ploše, která se ze známých geometrických těles nejvíce podobá výřezu z válce. Proces řezání se zaoblenou řeznou hranou, a tedy mechanismus tvorby zpevněné vrstvy, lze popsat dle obrázku 2-2.



Obrázek 2-3- Vznik plasticky deformované vrstvy v obráběném materiálu [2]

Při prvním kontaktu nože s materiálem dochází ke styku řezného klínu s materiálem v bodě A (viz Obrázek 2-3), který určuje na počátku řezu oblast největšího napětí. S postupným zařezáváním nože do hmoty materiálu se bod největších napětí posouvá níže a při ustáleném řezném procesu zaujme polohu bodu styku tečny se směrnicí odpovídající meznímu úhlu  $\beta_1$  s poloměrem zaoblení řezného klínu  $r_n$  (obrázek 2-3b).

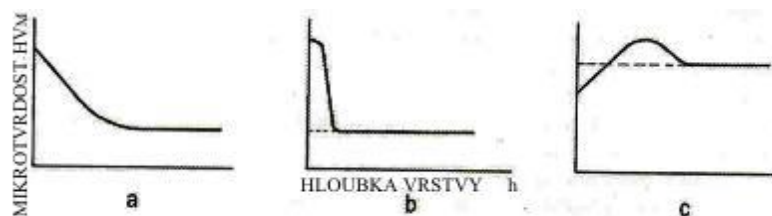
Tímto bodem je možno proložit přímkou  $a$ , která tvoří dělicí hranici. Odřezávaná vrstva se mění na tlisku v oblasti nad přímkou  $a$ . Část kovu pod přímkou  $a$ , ale ještě v dosahu řezného klínu se nástrojem stlačuje, přičemž se deformuje – zpevňuje. Tato změna povrchové vrstvy po obrábění vyvolává změnu mikrostruktury a změnu fyzikálně-mechanických vlastností, zejména tvrdosti. Zpevnění obrobeného povrchu je charakterizováno stupněm zpevnění a hloubkou zpevnění. Reálnou hodnotu stupně a hloubky zpevnění lze zjistit zejména měřením mikrotvrdosti v ovlivněné oblasti povrchu. Podle šířky ovlivněné vrstvy lze použít metodu postupného odleptávání povrchových vrstev, metodu kolmých řezů a metodu šikmých řezů.

Z mnoha různých závislostí mikrotvrdosti na hloubce měření jsou nejvíce charakteristické průběhy na Obrázek 2-4.

Obr. 2-4a - Mikrotvrdost rovnoměrně klesá s narůstající vzdáleností od povrchu materiálu a přechod do základního materiálu je plynulý a pomalý.

Obr. 2-4b - Mikrotvrdost v tenké povrchové vrstvě je konstantní, potom prudce klesá až na hodnotu mikrotvrdosti základního materiálu, přičemž přechod do základního materiálu je náhlý a ostrý.

Obr. 2-4c - Mikrotvrdost se se vzdáleností od povrchu zvyšuje, po dosažení maxima pomalu klesá na hodnotu mikrotvrdosti základního materiálu.



Obrázek 2-4 - Typy závislosti mikrotvrdosti na hloubce povrchové vrstvy [2]

První typ závislosti  $HV_{Mz} = f(h)$  (Obrázek 2-4a) svědčí o pevném spojení povrchové vrstvy se základním materiálem. Druhý typ této závislosti (Obrázek 2-4b) svědčí naopak o slabém spojení povrchové vrstvy se základním kovem a napomáhá odlupování povrchu. Třetí typ (Obrázek 2-4c) charakteristický zejména pro broušené povrchy reprezentuje porušenou krystalickou mřížku povrchu, a vzniku „spálené vrstvy“ a často i sítě mikrotrhlinek. Kromě měření mikrotvrdosti lze pro přímé sledování stavu mikrostruktury použít konvenční optickou nebo elektronovou mikroskopii. Pro strukturní analýzu zpevněných vrstev je nejčastěji používanou metodou rentgenová difrakce. Metoda je poměrně rychlá, nedestruktivní a bez zvláštních nároků na úpravu vzorku. Zjištěné výsledky poskytují mnoho důležitých údajů, jakými jsou parametr mřížky, kvantitativní fázová analýza, velikost zrn a jejich orientace a hustota čárových poruch. Výhodou rentgenové difrakce je fakt, že získané výsledky pocházejí z většího objemu materiálu (většího než samotná povrchová vrstva). Toto je však zároveň její zásadní nevýhodou, jelikož výsledky pochází z vrstvy nejlouběji v řádech max  $\mu\text{m}$ , přičemž tloušťku „systému povrchu“ zřejmě lze považovat za řádově vyšší. Existují samozřejmě i jiné možnosti, jak bude zpracováno dále, rentgenová difrakce je však považována za metodu rozhodčí i přes svá značná omezení, jako je velmi nízký průnik do povrchové vrstvy (řádově  $\mu\text{m}$ ).

## 2.2 Technologická dědičnost v oblasti zpevnění povrchů

Nárůst hladiny plastických deformací v materiálu má za následek zpevnění. Ze všeobecných poznatků technologické dědičnosti v oblasti zpevnění povrchu lze uvést následující:

**a.** Pokud má změna řezných podmínek za následek zvýšení řezné síly, čímž stoupá také intenzita plastické deformace, dochází ke zpevnění.

**b.** Prodlužováním času působení řezných sil na obráběný povrch roste hloubka zpevněné vrstvy.

**c.** Jestliže změnu řezných podmínek doprovází zvýšené množství vyvinutého tepla v zóně řezání anebo se prodlužuje doba intenzivního tepelného působení na obráběnou plochu součástky, zpevnění klesá, případně se pevnost povrchové vrstvy oproti výchozí hodnotě dokonce sníží.

Skutečnost, že nárůst tvrdosti zpevněných vrstev má určitou hraniční hodnotu, je důvodem, proč plastické deformace převyšující 200 až 300 % nemohou podstatně změnit stupeň zpevnění.

Stupeň a hloubka zpevnění povrchové vrstvy po obrábění závisí zejména na vlastnostech obráběného materiálu, způsobu obrábění, řezných podmínkách, geometrii nástroje a stupně jeho opotřebení.

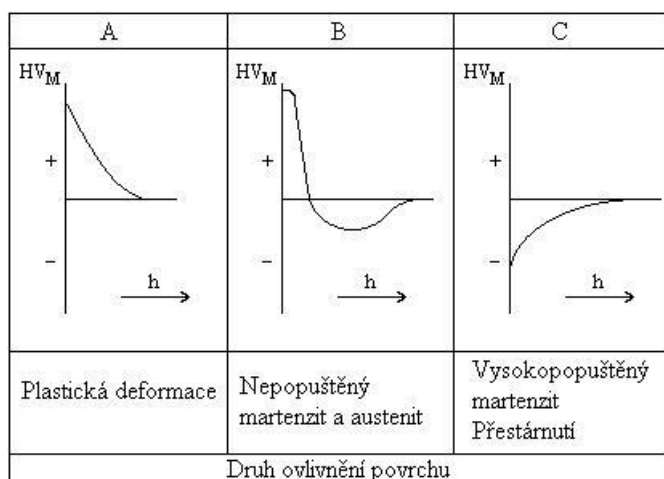
Fyzikální podstatu vlivu různých činitelů na zpevnění je možno vysvětlit souhrnně průběhem plastické deformace, účinkem teplotních jevů, jako i tření v procesu řezání. Jak ukázaly rozbory, faktory dělající proces řezání složitějším a obtížnějším (jde zejména o zmenšení úhlu deformace  $\theta_1$  a zvyšující koeficient tření třísky o čelo) zvětšují hloubku a stupeň zpevnění. Zmenšením úhlu  $\theta_1$  narůstá průnik plastické deformace do hlubších vrstev. Zvětšení koeficientu tření vyvolává prudké brzdění kovu na plochách nástroje a vytváří vysoký gradient rychlosti obtékání materiálem obrobku těchto vrstev. V důsledku toho zabrzděná vrstva částečně zatéká na tvořící se plochu a vytváří hlubokou zpevněnou povrchovou vrstvu. Při snižování koeficientu tření roste relativní rychlost pohybu třecích ploch (třísky a obrobku

s řezným klínem), snižuje se výše uvedený gradient rychlosti a zpevnění neproniká do takové hloubky. V tomto směru působí i zvyšování teploty a to tím způsobem, že se vyvolává uvolnění částí odebírané třísky zpevněné při obtékání ploch řezného klínu.

## 2.3 Vliv vlastností obráběného materiálu na zpevnění povrchu

Různé kovy se při obrábění zpevňují na různý stupeň. Zpevnění závisí na schopnosti kovu plastické deformace. Základní podíl na plastických deformacích různých kovů má druh jejich krystalické mřížky. Kovy s hexagonální mřížkou (např. Ti a jeho slitiny) se působením nástroje deformují jen málo, neboť mají málo skluzových rovin. Po vyčerpání plasticity materiálu dochází v nejčastějším případě k destrukci součásti. Kovy s kubickou plošně středěnou mřížkou (Fe- $\gamma$ , Sn, Co, Cu, Ag, Pb a jiné) vykazují vzhledem k velkému počtu rovin s možností skluzového posunutí velmi dobrou plastickou deformaci. Kovy s kubickou prostorově středěnou mřížkou (Fe- $\alpha$  a  $\delta$ , Cr, Mo, W, V a jiné) jsou přechodem mezi předcházejícími výše uvedenými typy. U ocelí a ostatních slitin je dobrým informačním ukazatelem náchylnosti ke zpevňování poměr hodnot meze kluzu  $Re$  [MPa] k mezi pevnosti v tahu  $Rm$  [MPa], tj.  $Re/Rm$  respektive spíše  $Rp0,2/Rm$ . [2]

Oceli a slitiny s kubickou plošně středěnou mřížkou (např. austenitické chromniklové žárovečné oceli) mají velký počet skluzových rovin krystalů. Zároveň mají malý poměr meze kluzu a pevnosti v tahu ( $Re/Rm = 0,45$ ). Proto lze tyto oceli lehce plasticky deformovat. Oceli s kubickou prostorově středěnou mřížkou (např. vysokopevné oceli) mají méně skluzových rovin a větší poměr meze kluzu a pevnosti v tahu ( $Re/Rm = 0,8$  až  $0,9$ ). To je důvodem jejich menší schopnosti plastické deformace. Materiál obrobku a jeho původní struktura určuje i charakter závislosti  $HV_M = f(h)$ . Na Obrázek 2-5 jsou graficky formulované výše uvedené závislosti vzhledem ke stavu obráběného materiálu. V části A se jedná o klasické zpevnění povrchu tepelně nezpracované oceli, kde převládá účinek plastické deformace při řezu nástrojem. V části B jde o zpevnění a následný pokles mikrotvrdosti pod mikrotvrdost základního materiálu, tzv. sekundární kalení způsobené vysokými teplotami při broušení nebo při povrchovém kalení laserem. V části C se jedná o snížení mikrotvrdosti povrchu pod mikrotvrdost základního materiálu – vysoko-popuštěný martenzit. [2]



Obrázek 2-5- Vliv stavu materiálu obrobku na průběh mikrotvrdosti [2]



Pro praxi lze využít obecných poznatků:

- při obrábění konstrukčních ocelí se zaznamenává větší stupeň a hloubka zpevnění než při obrábění rychlořezných ocelí
- hloubka zpevnění je relativně menší při obrábění wolframových rychlořezných ocelí než při obrábění uhlíkových nástrojových ocelí
- čím vyšší je tvrdost zakalené oceli, tím obtížněji se ocel plasticky deformuje a tím menší je stupeň a hloubka zpevnění

Jako střední hodnoty stupně zpevnění různých materiálů lze uvést následující:

*Tabulka 2-1- Střední hodnoty stupně zpevnění různých materiálů [2]*

Materiál	Stupeň zpevnění
Austenitické CrNi oceli	~ 100%
Měkké konstrukční oceli	~ 50%
Tvrdé konstrukční oceli	~ 25%
Mosaz	~ 70%
Hliník	~ 25%

Zpevnění materiálů výrazně ovlivňuje způsob obrábění. Střední orientační hodnoty hloubky zpevnění oceli při různých způsobech obrábění dosahují následujících hodnot:

*Tabulka 2-2- Střední orientační hodnoty hloubky zpevnění oceli při různých způsobech obrábění [2]*

Způsob obrábění	Hloubka ovlivnění [mm]
hrubovací soustružení	0,2 – 0,5
jemné soustružení	~ 0,05
soustružení kalené oceli (49-66 HRC)	0,05-0,1
válcové frézování	~ 0,12
čelní hrubovací frézování	0,2 – 0,5
čelní jemné frézování	~ 0,1
ševingování	~ 0,1
vrtání a vyhrubování	~ 0,15
vystružování	~ 0,12

V souvislosti s obráběním se na povrchu vyskytují ještě jiné zajímavé jevy. Je známo, že všechny kovy s výjimkou Au a platinových kovů tvoří stabilní oxidy, které mohou v některých případech zejména při nešetrném opracování dostat dokonce až pod povrch a ovlivňovat jeho vlastnosti, tím, že se de facto jedná o nežádoucí nekovové vměstky porušující integritu povrchové vrstvy.

## 2.4 Funkce stavu povrchu na únavu materiálu

Únavové poškození je jednou z nejčastějších příčin selhání exponovaných strojních součástí v provozním nasazení. Definice tohoto degradačního jevu je následující: Únava materiálu je proces změn strukturního stavu materiálu a jeho vlastností vyvolaný cyklickým zatěžováním, přičemž nejvyšší napětí je menší než mez pevnosti  $R_m$  a ve většině případů i menší než mez kluzu  $R_e$ . Tomuto zatížení dokáže materiál při statickém napětí bez porušení odolávat. Postupné rozrušování kovu při proměnlivém zatěžování má nevratný, kumulativní charakter, který se výrazně projeví až v závěru procesu růstem makroskopické trhliny a lomem. [4] Většina výpočtů zaměřených na dimenzování únavově poškozujících se součástí je založena na výpočtu odolnosti proti střídavému pulsujícímu namáhání. Únava materiálu však není pouze doménou pohybujících se součástí, ale v současnosti je předmětem zájmu například u tlakových nádob, chemických reaktorů apod. Na těchto konstrukcích se nachází taktéž mnoho rizikových prvků, například: oblast průniku konstrukčních prvků do pláště tlakové nádoby apod. Při zjištění odolnosti dimenzované součásti proti únavovému poškození je velmi důležité stanovit jeho pracovní zatěžovací cyklus. V součinnosti s hlavním smyslem zatížení působí na součást často i nestacionární síly a momenty, které je taktéž nutno stanovit, ale jedná se o velmi obtížnou záležitost. Dalším postupem je výpočet daného uzlu na zařízení za účelem stanovení napjatosti od těchto sil a momentů. Dále je nutno pokračovat stanovením veškerých předpokládaných provozních událostí vyskytujících se v průběhu životnosti zařízení (např. počet defektoskopických, nebo tlakových zkoušek, najetí a provozování na provozních podmínkách, počty rekonstrukcí a následných tlakových kontrolních zkoušek apod.) To vše má za výsledek celkový obraz, jak bude zařízení provozováno, namáháno v průběhu jeho provozu. [3] Strojní součást je namáhána nejčastěji charakteristickým cyklem zatížení, které je idealizováno jednoduchou sinusoidou. Například pokud se jedná o jednoduché otáčení hřídele. Krajní vlákna jsou namáhána střídavě tahem a tlakem, jak probíhá cyklus otáčení. Takto ideálně to však v reálném provozu platí jen málokde, většinou tato součást nefunguje jako osamocený prvek, ale jako součást celku. Tedy na „základní“ namáhání, pro které lze většinou sinusoidu použít, je nutno naexponovat ještě přídavné zatížení. V případě soustav součástí je nutno vzít v úvahu chvění, rázy, namáhání od ostatních součástí, které nemusí být nutně synchronní s cyklem měřené součásti. Tyto parazitní peaky se naexponují na hlavní cyklus a modifikují jej. Díky tomuto jevu může napětí amplitudy kmitu překročit plánovanou hodnotu  $\sigma_c$  a tím se dostat do nebezpečí vzniku únavového lomu v nepředpokládaném časovém horizontu. Dalším přídavným rizikovým faktorem může být zejména nedodržování předepsaných technologických podmínek, jako je přílišné (nebo nedostatečné) utažení spojovacích prvků součásti. Nedodržení předepsané vůle (přesahu) apod.

Například tato hřídel může být součástí převodovky, přičemž je například poháněna další hřídel. V důsledku nesynchronnosti a nepřesností i zde vznikají parazitní vibrace a namáhání, které se posléze naexponují na původní cyklus. Určit jaký je skutečný cyklus je v

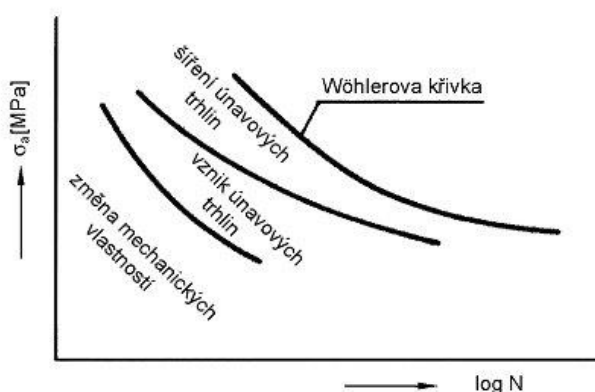
takovém případě velmi obtížné. Tyto jevy mohou výrazně zvyšovat (nebo naopak snižovat) provozní zatížení a mohou být příčinou zrychleného únavového opotřebení, nebo těžko vysvětlitelných havárií. Důvod pro to je ten, že naexponované napětí může snadno přesáhnout mez únavy materiálu  $\sigma_c$  i když je součástí na dané předpokládané zatížení dimenzována správně. Proces únavy materiálu lze rozdělit na 3 časové úseky.

*$\alpha$ ) Stadium změn mechanických vlastností. V tomto časovém úseku dochází ke změně hustoty a konfigurace mřížkových poruch a následkem toho i ke změnám mechanických vlastností (cyklické zpevnění nebo cyklické odpevnění)*

*$\beta$ ) Stadium nukleace trhlin – týká se zejména povrchových vrstev, kde jsou většinou přítomny mikrotrhliny, vruby, popřípadě podpovrchové metalurgické vady (vměstky, nehomogenity).*

*$\chi$ ) Stadium šíření trhlin. Tyto procesy jsou lokalizovány do malé části celkového objemu. Pro šíření únavových trhlin jsou rozhodující podmínky na koncových partiích vzniklé trhliny, jinými slovy, proces šíření je determinován vlastnostmi plastické zóny před špicí trhliny, kde je vysoká koncentrace cyklické plastické deformace. [4]*

Schematicky je rozdělení únavového procesu na jednotlivá stadia zobrazeno na Obrázek 2-6. Je nutno zdůraznit, že neexistuje žádná přesná definice rozhraní mezi jednotlivými stadii. Dle obecné konvence je únava rozdělována na vysokocyklovou (počet cyklů do lomu řádu  $10^5$  a výše) a nízkocyklovou (počet cyklů do lomu řádu  $10^4$  a méně).[4]

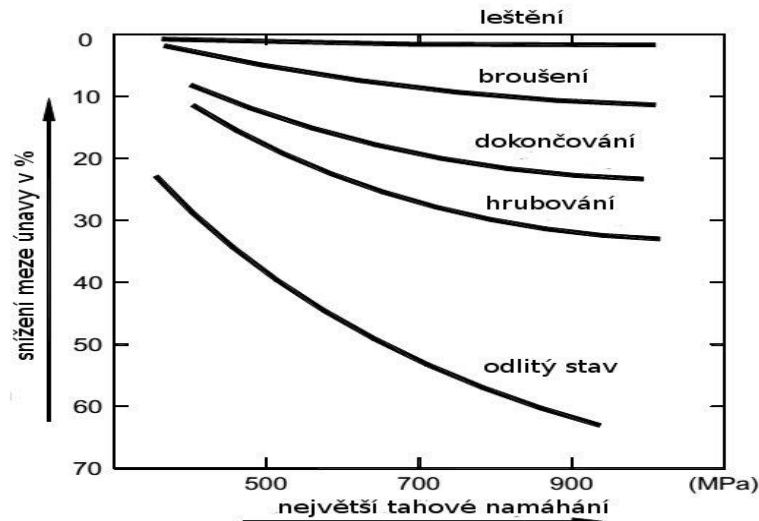


Obrázek 2-6 - Stadia únavového procesu (schematicky) [3]

Šíření dlouhých únavových trhlin, tj. třetí stadium únavového poškození, je v současné době relativně dobře popsáno teoriemi lomové mechaniky. Predikovat chování dlouhých únavových trhlin i v reálných konstrukcích je možné, pokud je znám napěťový stav a materiálové parametry (křivka rychlosti šíření únavových trhlin).[4] Nukleace trhlin u homogenních materiálů probíhá většinou na povrchu materiálů. U součástí s výrazným zpevněním dochází k nukleaci trhlin a vzniku intruzí a extruzí na povrchu materiálu a tím zárodků budoucích únavových trhlin převážně na rozhraní mezi základní nezpevněnou hmotou a zpevněnou maticí. U součástí s vnitřními vadami tato fáze nukleace chybí. Povrchové intruze, které jsou vytvářeny v důsledku cyklické plastické deformace (společně s povrchovými extruzemi) se mohou stát místy iniciace trhliny.[4]

## 2.5 Vliv technologie výroby na únavové vlastnosti

Stav povrchu po výrobním procesu je důležitým faktorem pro výslednou únavovou odolnost součástí. Pro toto jsou dlouhodobě používány diagramy. Jejich přesnost bude závislá na mnoha faktorech. Velmi obtížné bude zejména získání skutečných parametrů obráběcího procesu, viz obrázek 2-7.

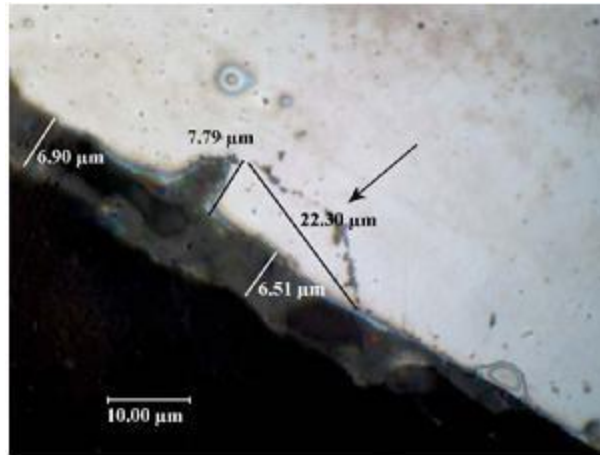


Obrázek 2-7-Vliv intenzity obrábění na budoucí únavové vlastnosti [5]

Zároveň zde bude nutno vzít do úvahy, že se za těmito diagramy bude skrývat velké množství zjednodušení a průměrování. Aby se výpočtář bezpečně „vešel“ do budoucích předpokládaných vlastností součásti musí být součást předdimenzována, tak aby bylo možno předejít i nepředpokládaným přídavným namáháním, jako jsou spouštění zařízení apod.

Největším problémem zjišťování vlivu technologické dědičnosti na budoucí únavové vlastnosti by mohl být zejména fakt, že součást ve většině případů není obrobena po celém povrchu stejným způsobem. To je samozřejmě zapříčiněno ekonomickými a technologickými důvody. Ne na všech plochách je možno provést přesné obrábění a někde může být i nežádoucí. Nehledě na to, že některé tvary jsou i přes pokrok v CNC technologiích těžko vyrobitelné (obecné plochy).

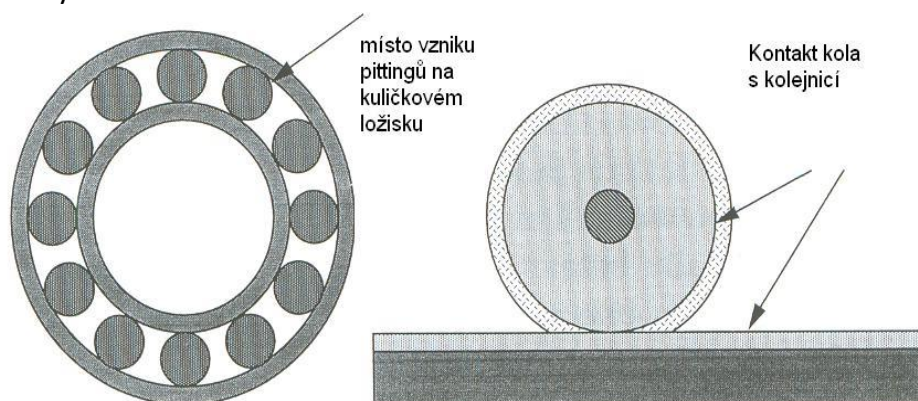
Nejvýraznějším projevem vzniku potrhání povrchu při obrábění je až vznik mikrotrhlin. Ostatní degradační vlivy lze taktéž předpokládat, ale ty nejsou často bez speciálního vybavení odhalitelné. Je jasné, že jejich vzniku nelze často ani při dodržení optimálních podmínek zabránit. Smyslem by mělo být zejména omezení jejich působení. Prvotní by mělo být zajištěno, že pokud se tyto projeví, měl by příslušný operátor obráběcího stroje ihned zasáhnout, aby bylo zabráněno dalším škodám. Problémem je však to, že přes veškeré pokroky pozorovací techniky co je viditelné na povrchu může klamat. Závažným problémem je však to, že při obrábění materiálů podléhajících plastické deformaci běžnými a vyššími rychlostmi dochází často k jejich povrchovému zacelování zavařením. Otevřeně viditelné mikrotrhliny zůstávají především u křehkých materiálů, nebo při obrábění nízkou rychlostí[6]. Toto je způsobeno vysokou teplotou a tlakem. Tato situace je velmi nebezpečná do budoucna. Na povrchu součásti, která byla při kontrole schválena jako vyhovující, se při provozu objeví nové zárodky mikrotrhlin viz obrázek 2-8. Lze předpokládat, že soudržnost materiálu v okolí takto zavařeného poškození zůstává stále menší, než pevnost okolního neovlivněného.[6]



Obrázek 2-8– Skrytá trhlina po broušení na klikovém hřídeli [6]

## 2.6 Kontaktní povrchové poškození

Jak již bylo uvedeno v úvodu, je tato práce zaměřena na popis povrchových degradačních jevů při obrábění. Proto je nutné se více zabývat lokálním kontaktním poškozením. Tento jev se vyskytuje zejména na součástech vykazujících v provozu opakovaný valivý dotyk s podílem skluzu. Síly, které se v tomto případě vyskytují, jsou relativně vysoké díky značnému podílu tzv: Hertzových tlaků. Často jsou tímto fenoménem ohroženy klíčové strojní součásti, jako jsou valivá ložiska, ozubené převody atd. Jedním z nejběžnějších stadií porušení namáhaných součástí je při tomto způsobu zatěžování pitting, viz obrázek 2-9. Jedná se o vylomení části povrchové vrstvy a vznik nežádoucího důlku. Díky tomu je narušen hladký chod součásti (drhnutí ložiska) a následnému snadnějšímu vzniku dalších poškození. Jedná-li se o porušení většího rozsahu, v anglicky mluvících zemích je používán termín „spall“.[7] Termín „spall“ popisuje analogii únavového procesu v objemových materiálech, avšak pro případy povrchových vrstev strojních součástí. Důsledkem „spall“ opotřebení je často vznik „objemové“ únavy.



Obrázek 2-9- Typické ukázky rizikových míst pro vznik únavového poškození [7]

Podobně, jako u „objemové“ únavy se zde vyskytují 3 stadia:

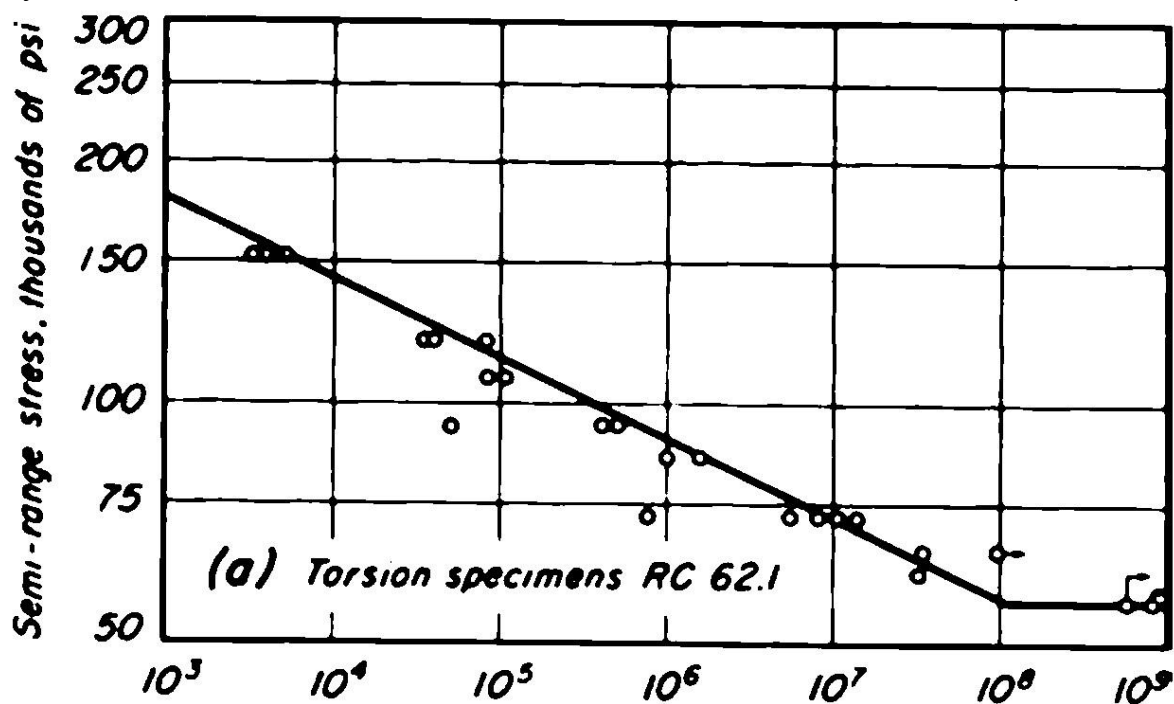
- 1) *Iniciace mikrotrhlin*
- 2) *Šíření mikrotrhlin*
- 3) *Tvorba makrotrhliny a vylomení části povrchových vrstev*

V první fázi je vytvářena malá trhlinka buď z povrchové inkluze, nebo z poškození způsobeného zatížením. Nejrizikovější místa iniciace trhliny jsou oblasti s maximální koncentrací smykového napětí ( $\tau_{MAX}$  je většinou lokalizováno v podpovrchových oblastech v souladu s teorií o Hertzových tlacích). V další fázi dochází k rychlejšímu růstu těchto necelistvostí a je vytvořena „únavová oblast porušující integritu povrchu“ [7]. V této fázi již je většinou funkce plochy pro hladký valivý kontakt značně omezena.

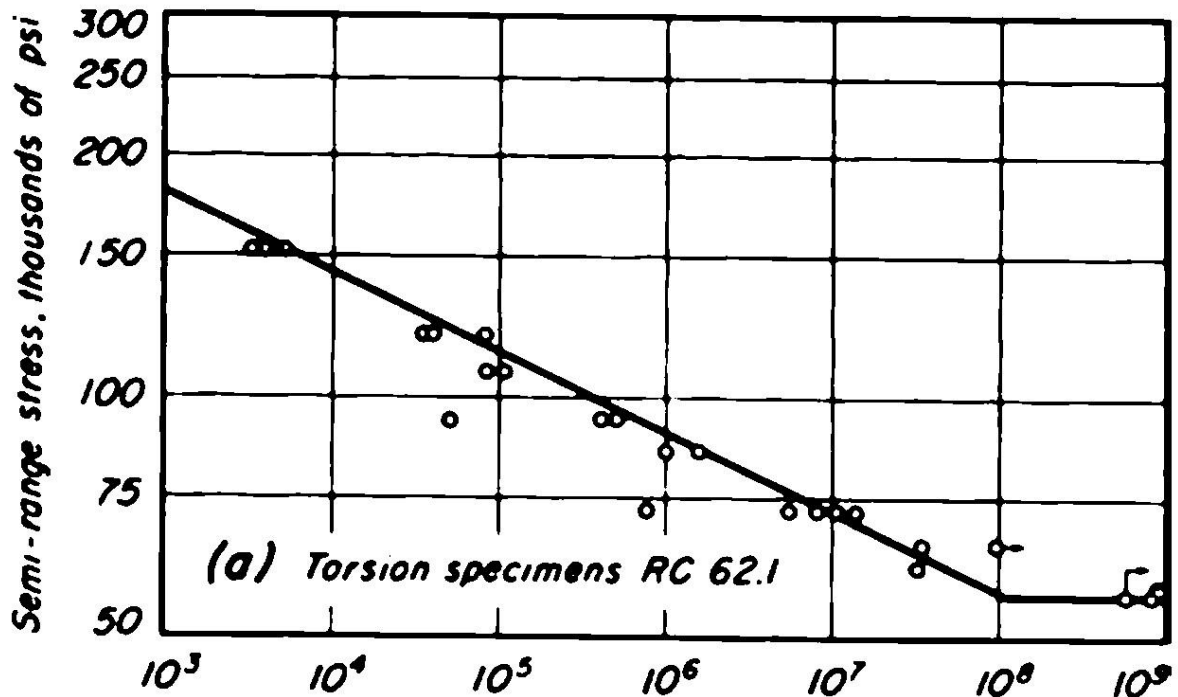
Ve třetí fázi je již vzniklá trhlinka dostatečně velká, dochází k vylomení částic z povrchu. Použitelnost funkční plochy je zde již velmi omezena.[7]

Vzniku kontaktní únavy lze omezeně zabránit lubrikací. K zvýšení jejich účinku jsou používány často tzv: aditiva. Některé druhy přísad mohou být díky svému chemickému působení značně nebezpečné (zejména ty se značným obsahem Cl a S), při jejichž dlouhodobém působení bylo pozorováno spíše urychlení růstu trhlín. Navíc olej sám o sobě může rozvoj trhliny též uspišit díky lokálnímu působení hydraulického tlaku [7]. Principem je zvýšení tlaku na plochu iniciované mikrotrhliny. Zde dochází k uzavření mikroskopického objemu oleje v trhlíně a následnému rozevírání za současného působení tahového napětí. Rozevírání těchto trhlín je nutno vždy brát jako nepříznivé.

Pro případ povrchového poškození byl vypracován podobný diagram, jako pro únavu objemovou. Jedná se o tzv: S-N křivku viz příklad na



obrázek 2-10.

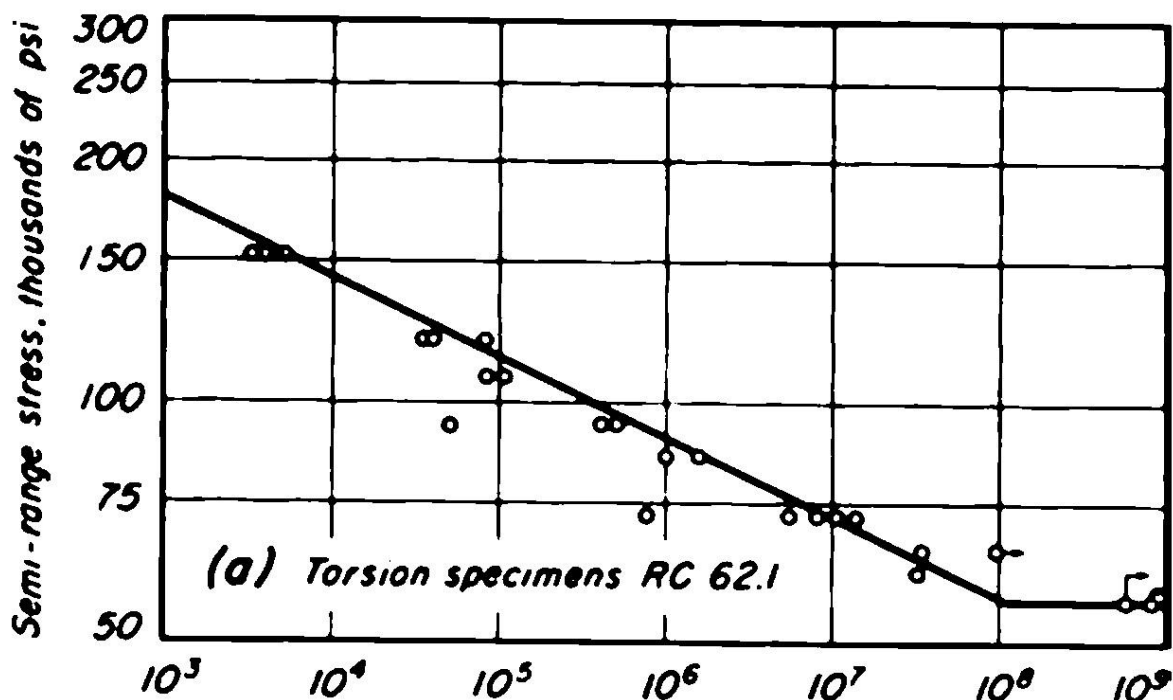


Obrázek 2-10– S-N křivka pro ložiskovou ocel AISI 52100 (ČSN 4114109) [8]

Je předpoklad, že tyto povrchová únavová poškození mají svůj prapůvod v působení smykových napětí[9] a tedy je předpoklad, že mechanismus poškození je podobný, jako u únavy krutem. Tedy pokud je známa křivka materiálu v krutu, lze vznik těchto poškození předpovědět[8]. Obecná teorie pro reverzní namáhání smykem je určena tzv: Basquinovým vztahem:

$$\frac{\Delta\tau}{2} = AN^b \quad (1)$$

kde N je počet cyklů do předpokládaného poškození za rozsahu smykového napětí  $\Delta\tau$ , A a B jsou materiálové konstanty, které je nutno stanovit experimentálně. Například v případě



Obrázek 2-10 u ložiskové oceli AISI 52100 je možno stanovit tyto konstanty jako  $A = 2409$  Mpa a  $B = -0,099$ . Tyto získané koeficienty lze použít v rovnici akumulace poškození, která zní:

$$\frac{dD}{dN} = \left[ \frac{\Delta\tau_{NT}}{\tau_R(1-D)} \right]^m \quad (2)$$

$D$  je součinitel poškození, což znamená míra postupného poškození materiálu v důsledku únavového poškození. Je nutno předpokládat, že Poissonova konstanta zůstává neovlivněna. Tato hodnota je definována v [10] jako:

$$D = \frac{A - A'}{A} \quad (3)$$

kde  $A$  je patrná oblast přenášející namáhání a  $A'$  je efektivní oblast přenášející namáhání.  $\Delta\tau_{NT}$  je rozsah smykového namáhání měřený na hranicích zrn,  $\tau_R$  je proporcionální k odolnosti materiálu proti únavovému poškození [10]. Rovnici [3] je nutno integrovat od stavu nepoškozeného do stavu plně poškozeného.

$$\int_0^{N_f} dN = \int_0^1 \left[ \frac{\tau_r(1-D)}{\Delta\tau} \right]^m dD \rightarrow N_f = \frac{1}{m+1} \left( \frac{\tau_r}{\Delta\tau} \right)^m \rightarrow \Delta\tau = \frac{\tau_R}{(m+1)^{1/m}} N_f^{-1/m} \quad (4)$$

Výsledky je nutno porovnat s dříve získanými výsledky a tedy lze psát, že

$$m = \frac{-1}{B} \quad (5)$$

$$\tau_r = 2A \left( 1 - \frac{1}{B} \right)^{-B} \quad (6)$$

po dosažení lze získat výsledek  $m = 10,1$  a  $\tau_r = 6113$  MPa. Poslední materiálová konstanta  $k$  známá jako modifikační parametr, představuje vliv středního napětí od únavového

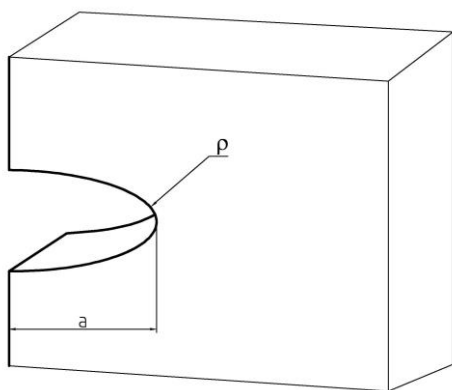


zatěžování na zbytkové napětí  $\tau_r$ . Ke stanovení této konstanty je nutno stanovit hodnotu ostatních hlavních namáhání. [10]

## 2.7 Povrch z hlediska lomové mechaniky

Materiál jako celek je složen z krystalické mřížky atomů, které jsou rozmístěny v pravidelné vzdálenosti. Tyto atomy na sebe vzájemně působí přitažlivými a odpuzivými silami. V případě umístění uprostřed objemu materiálu se tyto síly vzájemně vyrovnávají. Atomům na povrchu však chybí polovina sousedních atomů a je též známo, že atomy ve vrchních vrstvách mají z tohoto důvodu vyšší vazebnou energii, než atomy umístěné ve hlubších partiích. Proto krystaly, pokud jsou k tomu vhodné podmínky, mají tendenci ke zvětšování, nebo zakulacování (analogie vzniku kuličkového grafitu ve tvárné litině), aby tuto energii pokud možno zmenšovaly s cílem této stability dosáhnout.[11] Atomy na povrchu mají větší rozestup od regulární polohy, než atomy uvnitř součásti. Mřížkový parametr lze změřit pouze metodou rentgenové difrakce, nebo metodou difrakce pomalých elektronů, kde je možno dosáhnout velmi přesných hodnot až  $\pm 0,01 \text{ \AA}$ . Hodnota odchylky činí až 15 %, což podle Hosemannova zákona odpovídá mezni hodnotě, kdy ještě nedojde k destrukci krystalu [11].

Na konstrukčních prvcích se vyskytují závity, zápichy, otvory, drážky apod, které vytváří na povrchu materiálů nebezpečné vrubové účinky. Další vruby jsou způsobeny defekty metalurgického procesu, které budou popsány v další části této práce. Dále se na povrchu vyskytuje mnoho povrchových vrubů, které jsou způsobovány povrchovým opracováním (třískovým obráběním). Po určité době provozu se na povrchu součásti mohou objevit i rýhy a otlacení po opotřebování v kombinaci s korozním napadením. Všechny tyto vruby je nutné považovat za potenciální místo vzniku budoucího únavového poškození. [12] V okolí těchto vrubů dochází k lokální změně silového toku, která se projeví ve změnách pole napětí a deformací[13]. Představu o tom podává obrázek 2-11. V okolí těchto morfologií dochází ke vzniku trojosé napjatosti (a to i v případě, že nominální napětí je jednoosé) a ke koncentraci napětí. [13] Tato napjatost je vyjádřena součinitelem koncentrace napětí (tvarový součinitel vrubu), který je nazýván  $\alpha$ , nebo též  $K_t$ . [11]



Obrázek 2-11– Měřené parametry trhliny [12]

Tvarový součinitel vrubu je definován jako:

$$\alpha_n = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n} \quad (7)$$

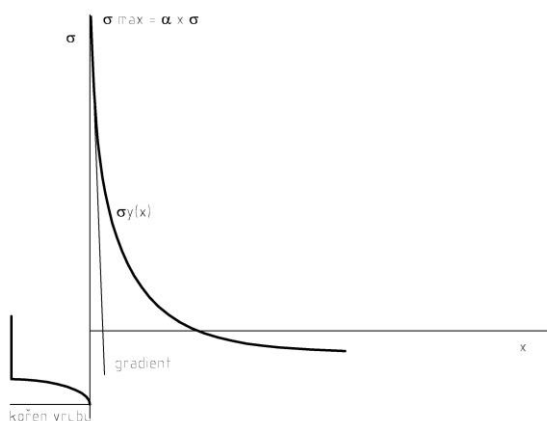
kde  $\sigma_{\max}$  označuje maximální napětí v kořeni vrubu a  $\sigma_n$  je nominální napětí vztažené na průřez. Dále se rozlišuje, je-li hodnota počítána na nominální průřez, nebo průřez ztenčený vrubem. Rozdíl výsledných hodnot v případě měření povrchových necelistvostí po technologických operacích je zanedbatelný. Důležitý je jak vliv parametrů trhliny viz obr. 11, tak způsob zatěžování a tvar a rozměry tělesa. V případě povrchových morfologií lze předpokládat, že většina z nich lze přirovnat k jednostrannému vrubu tvaru U v polo- nekonečném tělese. Součinitel koncentrace napětí je vyjádřen následujícím výrazem:[12]

$$\alpha = 2,7357 \left( \frac{a}{\rho} \right)^{0,4358} \quad (8)$$

Jelikož se v okolí vrubu nachází vysoká koncentrace napětí, musí být toto napětí ve větší vzdálenosti odlehčeno, tj. míra napětí musí být nižší, než  $\sigma_n$ . Lze tvrdit, že čím větší je špička napětí v partiích materiálu přiléhajícím k trhlíně, tím rychleji dojde k jejímu poklesu dále směrem od trhliny. Toto lze charakterizovat bezrozměrným gradientem napětí  $C_\alpha$ .

$$C_\alpha = - \left( \frac{d\sigma}{dx} \right)_{x=0} \frac{\rho}{\sigma_{\max}} \quad (9)$$

Lze předpokládat, že s rostoucím  $\alpha$  klesá  $C_\alpha$ . Viz obrázek 2-12.



Obrázek 2-12- Pokles napětí v závislosti na vzdálenosti od trhliny [12]

Tyto hodnoty se vztahují především k běžnému provoznímu zatížení strojní součásti. Avšak po odlehčení tohoto napětí zůstává zachována vysoká hladina napětí zbytkových. Z matematického hlediska vyplývá, že při zvyšující se ostrosti  $\rho$  se zvyšuje náchylnost k lomu.

### 3 Integrita povrchu

V průběhu provozu působí na strojní výrobek mnoho různorodých (nejčastěji) degradačních vlivů. Tyto jevy musí na součást působit nevyhnutelně směrem přes povrch. Jednotlivé degradační procesy jsou nejčastěji vnímány a měřeny odděleně, avšak ve skutečnosti působí všechny současně. Pokud bude měřen pouze jeden ukazatel, není vždy zaručen komplexní popis stavu zkoumané vrstvy.

Díky výše uvedeným překážkám vznikl obor, který se komplexně zabývá hodnocení povrchu – povrchová integrita. Integrita povrchu je souhrnná charakteristika, která zahrnuje všechny vlivy, které působí na vrchní vrstvy materiálu jak při výrobě, tak při použití součásti.

V současné době je hodnocení integrity povrchu strojní součásti důležitým parametrem při posuzování kvality výrobku. Zejména se jedná o automobilový a letecký průmysl. V případě leteckého průmyslu je hlavním jmenovatelem spolehlivost a zejména bezpečnost provozu.

#### 3.1 Veličiny působící na integritu povrchu

Tyto faktory lze rozdělit podle několika způsobů dělení. Nejdůležitější je zřejmě dělení na vnitřní a vnější. Za vnější vlivy lze považovat zejména degradační působení během opotřebení (běžné provozní zatížení, mimořádná přetížení, chemické a elektrochemické působení různých činidel, korozní napadení povrchu atd.). Mezi fyzikální vlivy lze vedle obecných faktorů, jako jsou např. teplotní pnutí, zahrnout i působení tepelného záření, zvláště při nasazení v energetických zařízeních. Zcela specifickým případem jsou součásti použité v jaderných elektrárnách, kde se k výše uvedeným vlivům přidává ještě vysoce energetické zejména beta a neutronové záření. Všechny tyto vlivy mají ten společný jmenovatel, že je lze z pozice výrobce jen velmi těžko ovlivnit. Pohledy na integritu povrchu se časem vyvíjejí, avšak hlavními jmenovateli jsou zejména: zbytková napětí, morfologie povrchu a mikrostrukturní a materiálové vlivy. Všem těmto vlivům budou věnovány samostatné kapitoly.

#### 3.2 Úkoly řešené pomocí integrity povrchu

Jedním z cílů by mělo být vypracování metody vyjádření pravděpodobnosti vzniku únavového poškození povrchu. Tato část je do určité míry vyřešena u křehkých materiálů, kde je jejich míra plastické deformace velmi nízká (křemík, keramika). Většina materiálů v technické praxi podléhá plastické deformaci, což přesné řešení podle rovnic například kritické velikosti trhliny (bude zobrazeno dále) vylučuje.

Autor práce na základě svých znalostí vycházejících z praxe nadefinoval následující tři otázky. Jejich definice zachycuje problematičnost spojenou s nejednoznačností integrity povrchu.

1) Jsou k dispozici 2 součásti, na kterých byly zmapovány všechny hodnocené faktory integrity povrchu. Tyto faktory mají odlišné výsledky, je však otázkou, který z nich má větší vypovídající schopnost ve vazbě na aplikaci a požadované konečné vlastnosti.

2) Lze výrobek na základě výsledků vztahující se k integritě povrchu vyřadit z provozu?

3) Pokud by byly k dispozici 2 materiály, jeden s vynikajícími mechanickými vlastnostmi avšak s problémovou integritou povrchu, a druhý materiál s horšími vlastnostmi, avšak lepší integritou povrchu, který lze pro praxi doporučit?

Podobných otázek by bylo možno položit celá řada. Cílem uvedených otázek bylo přiblížit dilema integrity povrchu. Integrita povrchu poskytuje celou řadu výsledků, avšak prozatím nejsou dostatečné vazby posuzující jejich vliv na konečné užité vlastnosti.

### 3.2.1 Degradace materiálu vs. Integrita povrchu

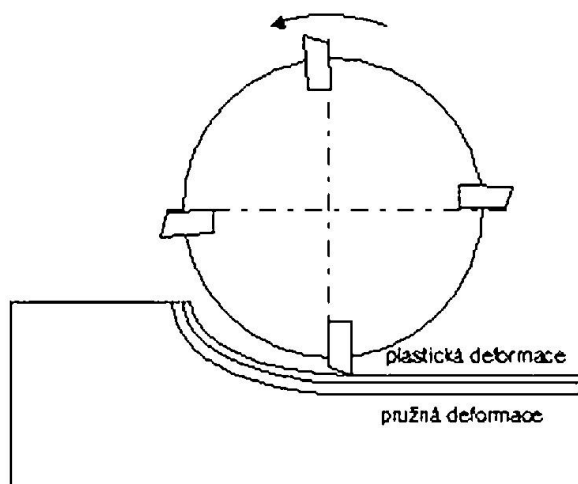
Degradace by se dala definovat jako ztráta „inženýrských vlastností“. Prakticky jakýkoliv zásah ve výrobním procesu a při spotřebě znamená jistý stupeň degradace. Tato však nelze vždy změřit.[6] Nejčastějším takovým znamením je rychlá koroze čerstvě obrobeneho, což je často znamením zvýšeného poškození. Toto často pokračuje i v procesu spotřeby a může limitovat celkovou životnost výrobku. Avšak pro každý výrobek je míra degradace jiná. Pro jedno ozubené kolo může být limitující faktor ulomení zubu, pro druhé zhoršení chodu v důsledku zdrsnění povrchu. Nebo například opotřebení povrchu válců ve spalovacím motoru znamená často ztrátu tlaku a značné snížení výkonu motoru z důvodu ztráty těsnosti pístů.[6]

## 3.3 Zbytková napětí

Zbytková napětí jsou v materiálu vnímána jako odezva na určitý druh technologického zpracování. Např. u obrábění zůstává materiálu zachovaná určitá úroveň napětí, která v něm zůstává i po ukončení silového, či tepelného působení.

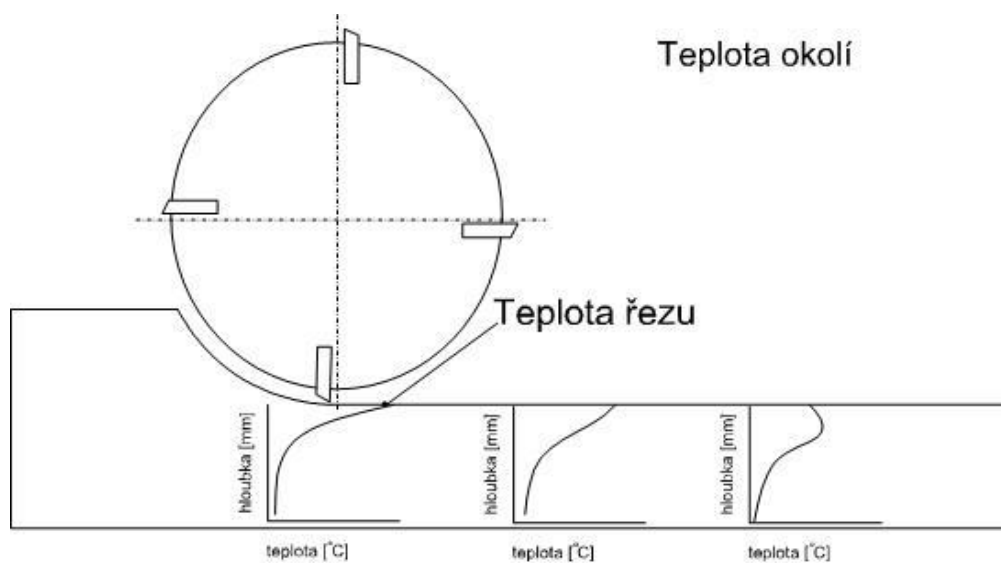
### 3.3.1 Vznik zbytkových napětí během třískového obrábění

Jedním z nejpoužívanějších technologických postupů je proces třískového obrábění. Jedná se o vysoce komplexní proces, jehož všechny aspekty nejsou dosud objasněny. V místě řezu vznikají vysoké tlaky a díky tření při vysoké rychlosti i vysoké teploty. Přesné hodnoty těchto veličin lze, i přes značný pokrok v konstrukci měřicí techniky, měřit jen obtížně a se značnou nepřesností. Důvodem je špatná přístupnost styku řezné hrany a obráběného materiálu v místě řezu a také vysoká rychlost průběhu procesu. Při měření teploty je obvykle měřena teplota několik mm od ostří. Navíc je též nutné počítat s nelinearitou a hysterezí měřících čidel a přístrojů (např. běžné termočlánky vykazují podle své tloušťky a charakteristiky reakční dobu od setin sekundy). Nejčastěji je vznik zbytkových napětí vysvětlován tím, že při obrábění je odebírána vrchní část materiálu ve formě třísky. Bezprostřední vrstva pod nástrojem je nejčastěji deformována plasticky. Představu zobrazuje obrázek 3-1 Ve vrstvě pod touto oblastí plastické deformace nejsou již síly natolik vysoké, aby způsobovaly trvalé distorze. Zde se nachází oblast pružných deformací.



Obrázek 3-1– Vznik zbytkových napětí při obrábění

Vysoká teplota vyvolaná třecími procesy při styku nástroje s obrobkem ovlivňuje pevnostní charakteristiky materiálu v bezprostředním okolí řezu.



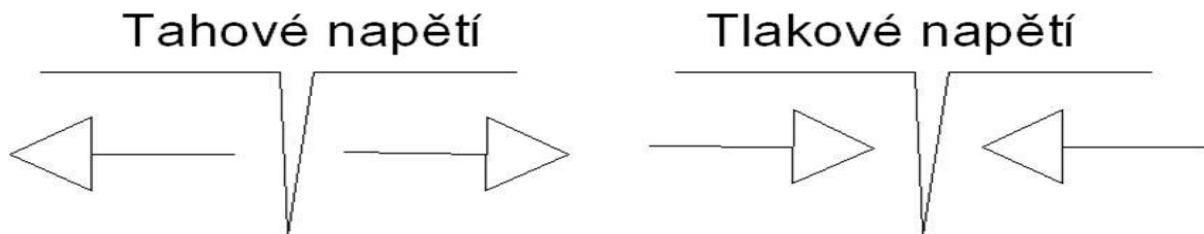
Obrázek 3-2– Rozložení teploty při obrábění

Obrázek 3-2 znázorňuje rozložení teploty na obrobku při obrábění. Zde je na místě uvést působení teploty během obrábění. Pokud probíhá obrábění při nižších teplotách než 800 °C, vzniká pásmo pružné a plasticky deformované. Po odlehčení se spodní pružně deformovaná vrstva snaží dostat zpět do výchozího stavu, a působí tlakem na vrchní pružně deformovanou vrstvu a vzniká ve vrchní vrstvě tlakové napětí a ve spodní vrstvě tahové. [14] Tento povrch je dále namáhán tepelnou energií. Třením ohřátá povrchová plasticky deformovaná vrstva se snaží zmenšit svůj objem z důvodů chladnutí, čemuž ale brání pružně deformovaná oblast. V tomto případě na povrchu vznikají pnutí tahová a ve spodních vrstvách

přechází do tlakové oblasti. Působení tepelného namáhání je tedy protichůdné působení silového [14]. Zodpovědět otázku, co je ve vazbě na integritu povrchu nebezpečnější, jednoznačně nelze. Neboť bude záležet ještě na mnoha ukazatelích, mezi nimi zejména na způsobu namáhání.

### 3.3.2 Vliv zbytkových napětí na vlastnosti povrchu

Napěťové pole vznikající při různých technologických operacích není homogenní a ani nemá lineární průběh. Do určité míry tato problematika koreluje se zpevněním materiálu. Podle předpokladů je působení zbytkových napětí na následný rozvoj materiálové únavy zásadní, jelikož pro její vznik je podstatná přítomnost sítě povrchových mikrotrhlin a defektů. Je však nutno rozlišit, zda se zde nachází zbytková napětí tahová, nebo tlaková. Tlaková napětí působí na mikrotrhliny, které jsou zde přítomné pozitivně – napětí „má snahu zavřít trhlinu“. Tahová napětí působí především negativně – mikrotrhliny jsou „otevírány“, - tím dochází ke snížení meze únavy. Celý proces si lze představit, jako předepnutý spoj namáhaný tahem, viz obrázek 3-3.



Obrázek 3-3- Silové působení na neclístvostech při různých směrech zbytkových pnutí.

V určitých specifických případech jsou tlaková zbytková napětí v povrchu vyvolávána úmyslně zejména procesem válečkování, díky čemuž lze velikost meze únavy do značné míry zvýšit. Podle publikací se toto prodloužení životnosti oproti neovlivněnému stavu může zvýšit až 2x, zřejmě však v pouze velmi výjimečných případech.



Obrázek 3-4- Princip válečkování [15]

Základním principem je vyvození lokálního kontaktního tlaku nástroje na povrch, který přesahuje velikost meze kluzu materiálu, veškerý proces probíhá bez úběru materiálu. Představu o procesu podává obrázek 3-4 Tímto dochází k výraznému ovlivnění nejen drsnosti materiálu, jelikož nerovnosti jsou tímto tlakem zamačkávány do povrchu [16]. Nástroje mohou

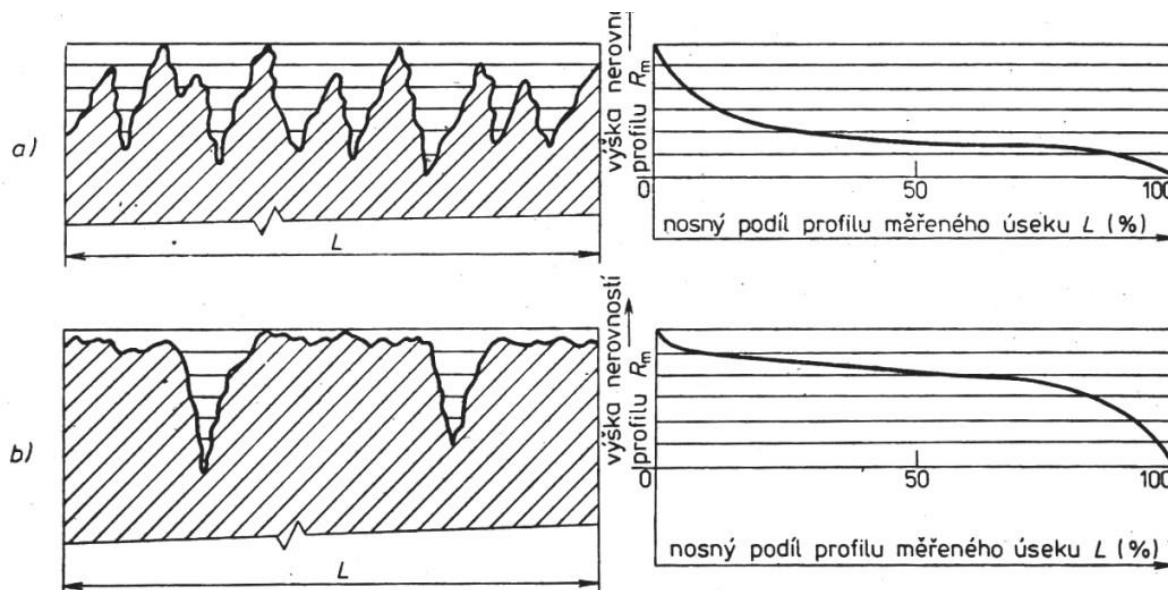
být dle geometrických požadavků konstruovány, jako přesně kalibrované válečky ze slinutých karbidů uspořádané okolo trnu viz obrázky 3-5. Další možnou variantou jsou válečkovací nástroje s diamantovou ploškou, které se využívá stejně jako v případě soustružnického nože. Druhy válečkovacích nástrojů doplňují hydraulické nástroje s kuličkami na průchozí otvory, slepé otvory, na vnější válcové plochy nebo otvory se zvláštním tvarem na dně či na kuželové otvory. Nástroje lze opatřit mikrometrickým šroubem, který umožní přesné nastavení pro obrábění jiných průměrů [16].

Při přípravě obrobku je nutno brát v úvahu několik faktorů - vzor povrchu, geometrii řezného nástroje a přídavek na obrábění. Je-li již otvor precizně a hladce obroben, není třeba jej válečkovat. Výrazné trhliny na obrobku a velice hluboké prohlubně vzniklé vrtáním, vystružováním nebo soustružením nejsou pro válečkovací operace vhodné. Budou viditelné i po použití válečkovacího nástroje, protože tento kopíruje povrch, takže kopíruje i velké pukliny a rozměrové nepřesnosti. [16] U houževnatějších kalených ocelí jako např: Rc35 je potřeba povrch co nejlépe dokončit před válečkováním. U tvárných materiálů, jako je mosaz, hliník a žíhané oceli, je možné mít povrch i s vyšší drsností. Jsou-li povrchy těchto materiálů velice jemně obrobeny, je nutné se spokojit s relativně malou změnou po použití válečkovacího nástroje. U soustruženého dílu lze běžně dosáhnout drsnosti 3,2 Ra. S použitím válečkování nástroje lze dosáhnout drsností od 0,1 do 0,35 Ra na jedno přejetí. Na bronzu nebo hliníku lze dosáhnout Ra 0,1 - 0,15, na oceli Ra 0,15 - 0,2 a na kalené oceli Ra 0,2 - 0,4. Rozměrová přesnost válečkování obrobku je ovlivněna především kvalitou předobrobeného povrchu. Kvalita povrchu, spolu s jeho zpevněním a ztuhnutím podstatně zvyšuje odolnost obrobku a jeho otěruvzdornost i korozivzdornost. Snižuje riziko únavy materiálu. Povrchy, které byly válečkovány, vykazují vyšší únosnost než neválečkované. Válečkovací nástroje lze přitom používat na jakémkoliv standardním vřetenovém stroji [16]. Obecně platí fakt, že s přítomností tlakových napětí v povrchových vrstvách a na povrchu materiálu dochází k zvýšení meze únavy a povrchové tvrdosti až o desítky %. Taktéž může dojít i k zvýšení korozní odolnosti. Tato poučka však není zcela bezproblémově použitelná. Je nutno dodržovat některé požadavky, aby naopak válečkování nesnížilo životnost součásti. Aby bylo dosaženo zvýšení meze únavy válečkováním, je nutné mít povrch součásti již velmi dobře připravený – tj. bez vážnějších defektů, při přítomnosti velkého množství defektů (povrchových a podpovrchových trhlin a defektů) dojde v procesu válečkování k zamačkávaní těchto nečistot dovnitř materiálu a ke tvorbě velmi dobrých zárodků budoucího únavového poškození.

Velikost zbytkových napětí (ani tlakových) nesmí být příliš vysoká, jinak může dojít k překročení meze kluzu materiálu a tím ke vzniku prasklin.



Obrázek 3-5– Ukázka válečkovacího nástroje [16]

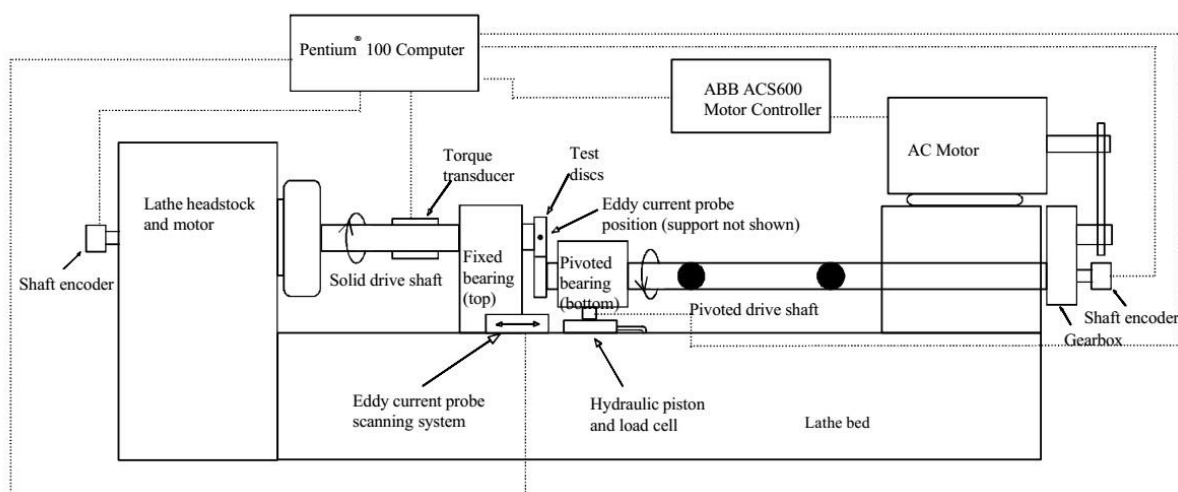


Obrázek 3-6- Ovlivnění drsnosti válečkováním a) třískové obrábění  
b) válečkování [17]

obrázek 3-6 ukazuje, že válečkový povrch má zcela jiný charakter, než plocha třískově obráběná. Válečkováním lze nahradit některé dokončovací metody, jako je např: broušení. Pomocí válečkování lze napravit i některé vady, jako je třeba nedostatečná válcovitost. Ke zvýšení odolnosti proti únavě zejména kontaktní povrchové touto metodou bylo provedeno několik studií.

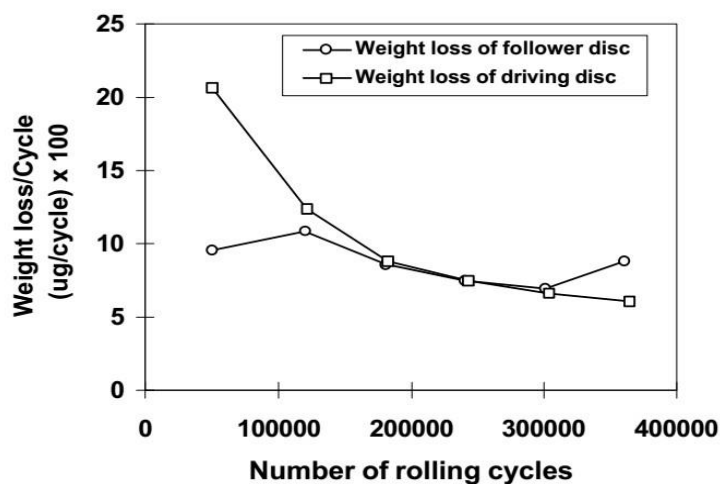
Ve studii [18] byla například zkoumána odolnost Mosazi 60/40. Je známo, že povrchová kontaktní únava lze rozdělit na povrchovou a podpovrchovou. Díky rozvoji vakuové metalurgie jsou nyní povrchové iniciace poškození mnohem častější. Na povrchu se mohou vyskytnout 3 typy defektů, od drsnosti, kontaminace korozními produkty, nebo od maziv nebo dalších chemických látek, nebo uvolněné částice kovu. Test byl založen na vzájemně se pohybujících kotoučích, uspořádání testu viz obrázek 3-7.





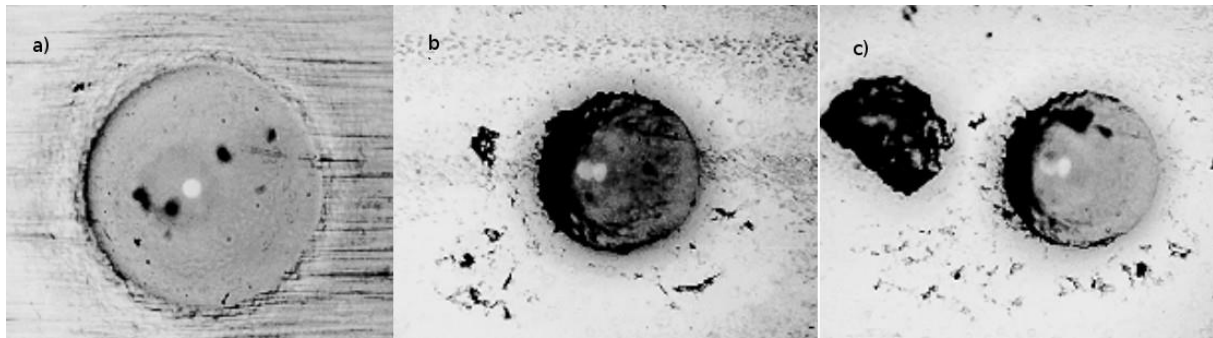
Obrázek 3-7 – Stroj na zkoušení odolnosti povrchů proti povrchové únavě [18]

Kotouče byly vzájemně přitlačovány. Vzorky ve formě disků byly obrobeny na drsnost  $Ra\ 0,2 - 0,5\ \text{mm}$ . Na vzorcích byly vytvořeny 4 typy povrchových defektů, rýhy podélné a příčné vytvořené jemným nožem a důlky kuželovité a rovné vytvořené tvrdoměrem Rockwell a Vickers. Tlak mezi kotouči byl udržován na 600 MPa. Stack byl lubrikován olejem. Test byl zastavován vždy po 50 000-60 000 cyklech a kontrolován na optickém mikroskopu. Výsledek zobrazuje obrázek 3-8.



Obrázek 3-8 – úbytky materiálu na otáčku[18]

Úbytky materiálu byly po počátečním zaběhání celou dobu testu velmi malé, prakticky konstantní, na jeden cykl bylo průměrně (průměrně 0.02 mg/cyklus). Tvar povrchových poškození se změnil nejvíce po prvních 50 tis cyklů, posléze zůstal prakticky stabilní. Působení velikosti důlku, zde byl naměřena závislost mezi velikostí únavového efektu pro konusový důlek vytvořený pomocí tvrdoměru Rockwell.[18]

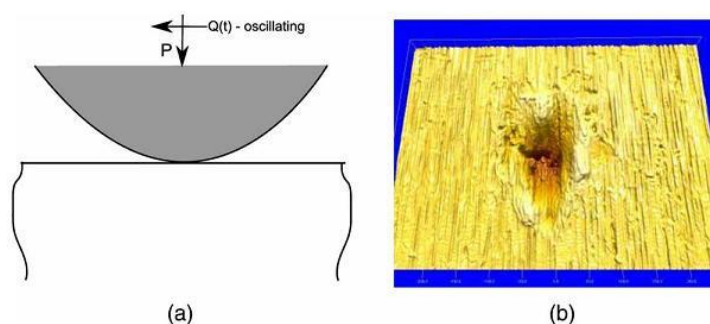


Obrázek 3-9– vývoj zahlazování důlku a) 0 cyklů b) 120 000 cyklů c) 240 000 cyklů [18]

Tento výstupek s původním průměrem 0,53 mm posléze způsobil defekt celého disku, na disku se projevil spall po 240 000 cyklech. U důlků s původním průměrem 0,28 mm bylo po 240 000 cyklů nalezeno pouze několik malých pittingů, které se ani po 360 000 cyklech nešířily [18] Vývoj zahlazení poškození zobrazuje obrázek 3-9.

### 3.4 Vliv uvolněných částic kovu na integritu povrchu

Povrchy, které jsou často využívány zejména v aplikacích se značnou mírou otěru a jiného atížení, při kterém hrozí nebezpečí pittingů a spallů. Tyto mají své ohnisko nejčastěji u povrchu součásti, v přítomnosti mikrotrhliny, inkluze apod. Díky pokroku při výrobě oceli je toto nebezpečí do značné míry potlačeno. Jedním z nejčastějších příčin vzniku těchto zárodků je přítomnost uvolněných částí povrchu, které jsou přítomny nejčastěji v lubrikantu a způsobují vznik dalších mikrotrhin. Lze tedy říci, že čistota lubrikantu je taktéž jedním z rozhodujících vlivů na integritu povrchu, jelikož se dá říci, že je v podstatě funkcí této čistoty. [8]. Na povrchu vznikají z tohoto důsledku důlky, které jsou v závislosti na tvaru a charakteru materiálu (křehký, tvárný) buď mělké a rozsáhlé, které vznikly zřejmě v případě snadné plastické deformace této částice, nebo malé ale relativně hluboké a s ostrými okraji vzniklé u vysoce zpevněné částice. V okolí tohoto vznikají zbytková napětí, jejichž hodnota přibližně odpovídá velikosti vzniklých Hertzových tlaků [8]. V důsledku mechanických vibrací posléze vznikají důlky. Tyto mechanické vibrace jsou nejčastěji v řádu desítek  $\mu\text{m}$ . Tyto jsou způsobeny provozním zatížením a ostatním vnějším namáháním, je nutno s nimi za každých okolností počítat. Vážnost těchto účinků závisí na mnoha různých faktorech, jako jsou amplituda, frekvence, počet pracovních cyklů a lubrikace. Následující obrázek 3-10 znázorňuje vznik tohoto poškození, kde je vyvozován tlak kolmo na materiál a dále boční vibrace.



Obrázek 3-10– vznik povrchového poškození [8]

### 3.5 Měření zbytkových napětí

Metod pro měření zbytkových napětí je značné množství, zároveň existuje mnoho metod, podle kterých tyto lze rozdělovat. V tomto oddílu budou popsány některé nejpoužívanější metody. Pro měření zbytková napětí bylo vypracováno ještě mnoho dalších mnoha metod, tyto jsou většinou omezeny na konkrétní omezené případy měření. Lze se s nimi seznámit například v publikaci [19].

Zbytková napětí se rozdělují na tři základní druhy. První druh je makroskopický, je jednoznačně spojen s procesem technologie. Zbytková napětí 2. druhu jsou v rozmezí jednotlivých zrn. Zbytková napětí 3. druhu jsou doprovázeny změnami v atomárních vzdálenostech a rovinách. V technické praxi se pod pojmem zbytkové napětí rozumí **vždy zbytkové napětí I. druhu**. Někdy se zbytková napětí označují jako technologická napětí, neboť vznikají v důsledku působení technologických procesů při výrobě strojních částí. Větší podrobnosti jednotlivých druhů napětí jsou např: uvedeny ve zprávě „Měření zbytkových napětí“ [21].

#### 3.5.1 Metody měření zpevnění povrchů

Tuto metodu nelze považovat zcela za metodu měření zbytkových napětí, ale umožňuje do určité míry postihnout stav povrchu, jako jako relativně jednoduše měřitelnou veličinu. Výsledkem je průběh mikrotvrdosti jako odraz technologických podmínek při obrobení. Tato metoda je založená na měření struktury a současné měření mikrotvrdosti, jak se mění s hloubkou. Vzhledem k tomu, že se jedná o problematiku integrity povrchu jsou tato měření především zaměřena na hloubky běžně do 0,1 mm, max. do 1 mm, kam zřejmě dosahuje povrchové ovlivnění. Toto však vnáší do měření některé nepřesnosti. Zejména se jedná o ovlivnění měření hranou, jelikož vpichy nejsou vzdáleny dostatečně od kraje, čímž dochází k měření mimo platnost normy. [20] Jsou používány zejména metody:

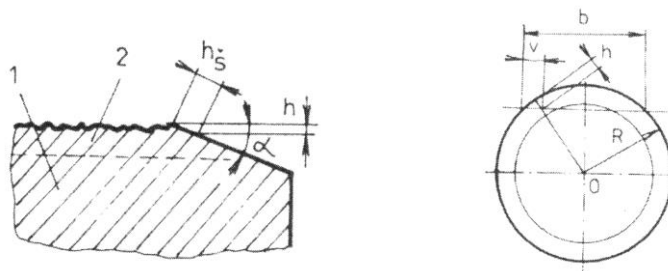
- postupného odleptávání vrstev
- kolmého řezu
- šikmého řezu

U metody postupného odleptávání jsou vrstvy materiálu postupně odleptávány a na těchto odleptaných místech je měřena mikrotvrdost. Toto měření může být značně ovlivněno nerovnoměrným odleptáváním jednotlivých fází. Jeho výhodou je však neovlivnění od dodatečného broušení a leštění. Při měření metodou kolmých řezů je měřena mikrotvrdost v povrchových vrstvách při rozříznutí a vyleštění v kolmém směru. Výhodou je její relativní jednoduchost. Při nízkých hloubkách zpevnění je tato metoda poněkud nepřesná z důvodu snadného zanesení nepřesnosti. Přesnost této metody lze zlepšit sbroušením měřené plochy pod určitým malým úhlem (jednotky stupňů)[20]. Vzdálenost od okraje je nutno korigovat podle vzorce:

$$h = h_s \cos \alpha \quad (10)$$

V případě válcové plochy:

$$h = \sqrt{R - R^2 + v^2} + bv \quad (11)$$



Obrázek 3-11 – a) Měření šikmým řezem na rovinných plochách b) Měření šikmým řezem na válcových plochách[20]

Obrázek 3-11 zobrazuje uspořádání testu pro měření šikmým řezem. Měření touto metodou může být ovlivněno procesem broušení a leštění. A to tak, že v povrchových vrstvách se změní mapa zpevnění. Dalším problémem je velikost píků drsnosti, které při její vyšší hodnotě mohou značně ovlivňovat změřenou délku. Z grafu změny tvrdosti a tím i zpevnění lze usoudit, jaký je stav měřených vrstev. Při dobře provedeném obrábění lze usoudit, že přechod zpevnění do základního materiálu bude pozvolný. Pokud bude zpočátku mikrotvrdost prakticky konstantní a posléze přejde ve velmi strmý pokles až do základního materiálu, pokud se nejedná o některou záměrnou povrchovou úpravu, jedná se zřejmě o nešetrné obrábění spojené se značným tepelným ovlivněním. V tomto případě zřejmě bude hrozit nízkou integritou povrchu (až dekohezi vrchních vrstev). Pokud bude mikrotvrdost z povrchu mít tendenci nejdříve stoupat, poté mírně klesnout na průměrnou mikrotvrdost základního materiálu, jedná se už zřejmě o porušené vazby v krystalové mřížce viz **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** [20]

Výsledkem je průběh mikrotvrdosti, který bude do určité míry reflektovat vzniklé pole zbytkových napětí, které se v povrchu bude nacházet. Jistě půjde spíše o porovnávací zkoušku, při které pokud dojde ke srovnání mezi více kusy a bude možno při nastavených mantinelech rozhodnout o dobré, či špatné kvalitě. V průmyslové praxi by se tato metoda mohla rozšířit tak, že budou namátkově zkoušené určité kusy, kde bude toto předepsáno. Nebo v případě drahých obrobků by byl na měřené ploše vytvořen vhodný kontrolní vzorek, který bude obroben za zcela stejných podmínek. Poté bude vypreparován a prozkoumán.

### 3.5.2 Měření zbytkových napětí pomocí rentgenové difrakce

Tato metoda je založená na měření změny mřížkového parametru v závislosti na její deformaci. Tato deformace je podle předpokladu zapříčiněna zbytkovým napětím. Tato metoda je závislá na tom, zda kov dává ostré difrakční maximum, což se prokázalo být problémem například u měření zbytkových napětí u materiálu Inconel. Mřížkový parametr  $d$  je měřen pomocí Braggovy rovnice

$$\lambda = 2d \sin \theta \quad (12)$$

Kde  $\lambda$  je vlnová délka v m, a  $\theta$  je úhel, při kterém je detekováno maximum. Velikost této měřené elastické deformace  $c$  lze vypočítat jako:

$$c = \frac{\Delta d}{d_0} \quad (13)$$

Kde  $d_0$  je mřížkový parametr neovlivněné mřížky. Pomocí tohoto parametru lze vypočítat zbytková napětí I. II. i III. druhu, samozřejmě pouze pokud je znám mřížkový parametr neovlivněné mřížky.

### 3.6 Metoda Barkhausenova šumu

Při působení vnějšího okolí na materiál dochází v něm k dějům, které jsou provázeny změnou zbytkových napětí. Mezi tyto procesy patří tepelné nebo deformační působení popř. nebo fázové přeměny.

#### 3.6.1 Magnetické vlastnosti materiálů

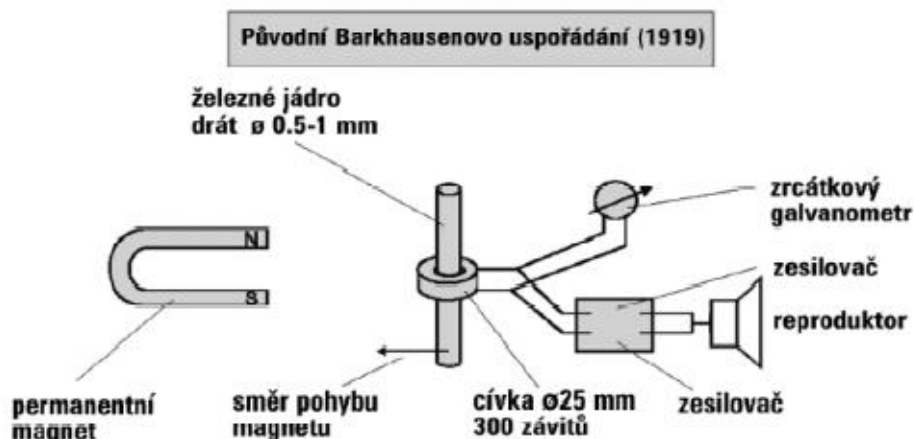
Každá látka má schopnost vytvoření magnetického pole. Je však velký rozdíl, jakým způsobem se jednotlivé látky v magnetickém poli chovají. Dle toho lze látky rozdělit na:

- Diamagnetické – tyto látky magnetické pole zeslabují patří mezi ně (NaCl, Cu, nejsilněji Bi)
- Paramagnetické – tyto látky magnetické pole mírně zesilují (Fe $\gamma$ , Al)
- Feromagnetické- tyto látky magnetické pole silně zesilují (Fe $\alpha$ , Ni, Co, Gd, Heuslerovy slitiny)

Uvedené vlastnosti souvisí zejména s uspořádáním elektronového obalu atomu. Feromagnetika jsou v podstatě paramagnetika, které mají v určité oblasti atomy se stejnou orientací magnetických momentů (Weissova oblast 0,001-1mm<sup>3</sup>), jsou odděleny od ostatních Weissových oblastí tenkou 10<sup>-6</sup> stěnou (Blochovou stěnou). Jiné Weissovy oblasti mají jinou celkovou orientaci magnetického momentu – vzájemně se vykompenzovávají, materiál je bez vnějšího popudu nemagnetický. Působením vnějšího magnetického pole se magnetické momenty domén natáčí ve směru vektoru magnetizace a dochází k zesilování pole. Tím se materiál stává magnetickým v celém svém objemu.

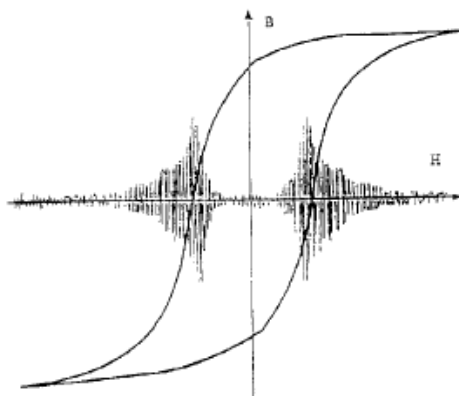
#### 3.6.2 Barkhausenův šum

Obrázek 3-12 zobrazuje schéma měření Barkhausenova šumu. Měřený vzorek vyrobený z oceli tvoří jádro indukční cívky, ke které je připojen zesilovač a reproduktor. Při přiblížení či oddálení permanentního magnetu k jádru cívky(vzorku), jsou z reproduktoru slyšitelné akustické signály, které jsou tvořeny zejména. hlasitým praskáním v reproduktoru. To podle předpokladu zřejmě souvisí s pohybem a rotací Blochových stěn, jelikož ani magnetizace materiálu není přetržitý proces – stěny se natáčí postupně nespojitě. Tyto pohyby jsou zaznamenány jako elektrické pulsy, kterou jsou vyhodnocovány, jako „schody“ na magnetizační křivce.



Obrázek 3-12- Původní uspořádání Barkhausenova pokusu [21]

Pokud na těleso z feromagnetického materiálu začíná působit magnetické pole, iniciuje se v tělese tzv. koercivní síla (to je síla jaká se musí být vyvozena pro překonání magnetického pole). Při magnetizaci má křivka magnetizace specifický tvar. Nazývá se hysterezní křivka příslušného materiálu. Obrázek 3-13 zobrazuje magnetizační křivku materiálu a zobrazení nejvýraznějšího vzniku Barkhausenova šumu.



Obrázek 3-13- Poloha vzniku Barkhausenova šumu při průchodu hysterezní křivky nulovým bodem [21]

Blochova stěna mění svoji polohu tím, že je na jedné straně roztažena a na druhé straně smrštěna. Působením napětí se v materiálu mění konfigurace magnetických domén. Ve směru působení napětí dochází ke snadnější magnetizaci, tento jev je nazýván magnetoelastickou odezvou. Vzhledem k magnetostrikci (tento jev lze přirovnat k piezoelektrickému jevu, doména se při magnetizaci tvarově mění) v případě běžných materiálů jako je Fe, ocel je pozitivní, tlakové napětí intenzitu Barkhausenova šumu snižují a tahová napětí naopak zvyšují. Podle tohoto parametru je možno odhadnout hladinu zbytkových pnutí. Intenzitu Barkhausenova šumu ovlivňuje též metalurgická struktura. Intenzita signálu klesá se stoupající tvrdostí materiálu. Dále mohou být touto metodou sledovány takové jevy jako je spálení po broušení, tečení či únava, která znamená také změny v mikrostruktuře.

Nepříjemným faktem je to, že signál se při cestě materiálem tlumí. Podle velikosti tohoto útlumu lze usuzovat hloubku, ve které je měření prováděno a s jakým výsledkem. Pro většinu aplikací materiálu na bázi Fe se zpravidla jedná o hloubky průniku mezi 0,001 – 1,5 mm. Příčinou tlumení jsou vířivé proudy. Metoda Barkhausenova šumu je metoda pro zjišťování strukturních nehomogenit materiálu. Mezi základní výhody patří:

- Nedestruktivnost
- Lze dosáhnout poměrně vysoké přesnosti

Na druhou stranu má také nevýhody:

- Drahé přístrojové vybavení
- Obtížná interpretovatelnost výsledků, mezi hlavní výsledky patří tzv: magnetizační parametr, který je de facto integrál plochy pod magnetizační křivkou, jejím problémem je, že výsledky jsou funkcí všech vlivů, které se v průběhu měření podaří zachytit.

-Obtížně definovatelná hloubka měření. Při kalibraci jsou nastavovány napětí a frekvence magnetizačního proudu, které průnik do hloubky ovlivňují, avšak nelze s určitostí tvrdit, že daný signál pochází pouze z definované hladiny. Lze sestavit následující tabulku použitelnosti jednotlivých metod měření zbytkových pnutí.

Tabulka 3-1 – Použitelnost vybraných metod měření zbytkových napětí [21]

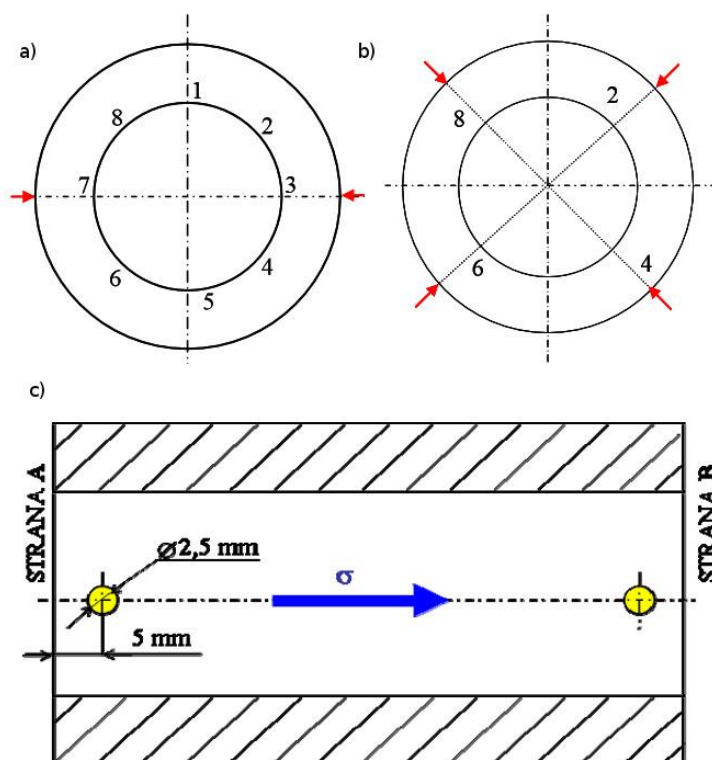
		RTG difrakce		Ultrazvuk			Elektromagnetické metody		
		proudová	potenciálová	rychlost	absorpce	rozptyl	Barkhaus. šum	mg. indukce	magnetostrikce
napětí na povrchu	rovinné	◐	●	◐	x	x	◐	◐	x
	rotační	○	◐	◐	x	x	◐	◐	x
	komplexní	○	◐	○	x	x	○	○	x
objemové napětí	rovinné	x	x	◐	◐	◐	x	○	○
	rotační	x	x	◐	◐	◐	x	○	○
	komplexní	x	x	○	○	○	x	○	x

|(● - velmi dobrá použitelnost, ◐ - dobrá použitelnost, ○ - omezená použitelnost, x – nepoužívá se)

Tabulka 3-1 zobrazuje použitelnost nejběžnějších metod měření pro měření metod zbytkových napětí. Všechny uvedené metody mají své výhody a nevýhody a proto je vždy potřeba pečlivě přemýšlet nad tím, jaké parametry, na jakém vzorku a z jakého materiálu opravdu potřebujeme změřit, neboť to má velký vliv na rozhodnutí o použití jedné z uvedených metod. Existuje samozřejmě i možnost kombinace jednotlivých metod, kdy lze využít kombinace předností každé z metod. Velký vliv na to, jaká metoda bude použita, má také jejich praktické využití – vypovídající schopnost měření (s tím souvisí i zkušenosti s použitím jednotlivých metod a rozmístění jednotlivých pracovišť v rámci ČR a SR). Příkladem může být např. měření zbytkových napětí rentgenovou difrakcí spojenou s kontrolovaným odleptáváním povrchu. Porovnávání metod měření zbytkových pnutí je velmi problémové. Při použití různých metod jsou většinou obdrženy zcela odlišné výsledky, což nemusí být způsobeno pouze chybou měření, ale tyto všechny metody pracují na odlišných fyzikálních principech, nedá se tudíž očekávat i stejné výsledky. Často je jediným výsledkem pouze pozorovatelný trend při porovnávání.

### 3.6.3 Difrakční analýza otvorů

Ve spolupráci s FJFI ČVUT byla na pracovišti KMM ZČU provedena difrakční analýza vrtaných otvorů tj měření zbytkových napětí s cílem zjistit určitou relevantnost difrakční analýzy pro měření parametrů integrity povrchu. Pro analýzu byly připraveny vrtané vzorky označené 1-5 z materiálu C45. Průměr polotovaru vzorků byl 55 mm a výška 95 mm. Do vzorku byl vyvrtán otvor  $\varnothing 30$  mm. Obě strany vzorku byly označeny jako A a B viz Obrázek 3-14a. Na vnitřní ploše bylo zvoleno 8 bodů 1A, 1A- 8A, 8B (viz. Obrázek 3-25c) vzdálených cca 5 mm od okraje tělesa. U vzorku 1 byla provedena měření ve všech 16 místech, u vzorků 2, 3, 4 a 5 byly měřeny pouze body 1A a 1B. Difrakční tenzometrická měření byla znovu provedena po rozřezání zkušebních vzorků podél jejich osy. Zbytková napětí byla zjišťována vždy ve směru axiálním. Vzorky byly změřeny před rozřezáním a po rozřezání. Obr. 3-14 b zobrazuje rozřezání vzorku 3.



Obrázek 3-14-Geometrie vzorků pro difrakci.

K rentgenografickému určení makroskopických zbytkových napětí byla zvolena metoda (jedné expozice bez referenční látky) s detekcí difraktovaného záření na paměťové fólii [1 – 3]. Hlavní parametry použité metody: úhel dopadu záření CrK $\alpha$  na analyzovaný povrch  $\psi 0 = 45^\circ$ , vzdálenost plošného detektoru od povrchu vzorku  $D = 46$  mm, průměr cylindrického kolimátoru 1,7 mm, symbol analyzované difrakční linie {211}. Chyba měření napětí podle předpokladu nebyla vyšší než 40 MPa. Bylo použito statické měření (plocha ozářeného povrchu cca 2,5 mm<sup>2</sup>), vrtané vzorky 1 až 5.

Výsledky jsou zobrazeny v následujících tabulkách.



Tabulka 3-2-Změřená zbytková napětí vzorek 1 body 1-8A před a po rozřezání

Místo	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8A
$\sigma$ (MPa) nerozřezaný	-279	-309	-340	-349	-348	-331	-289	-342
$\sigma$ (MPa) rozřezaný	-207	-295	-	-341	-321	-271	-	-300

Tabulka 3-3-Změřená zbytková napětí vzorek 1 body 1-8B před a po rozřezání

Místo	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	8B
$\sigma$ (MPa) nerozřezaný	-398	-382	-403	-415	-333	-368	-338	-367
$\sigma$ (MPa) rozřezaný	-365	-373	-	-327	-400	-463	-	-400

Tabulka 3-4-Zbytková napětí  $\sigma$  na řezných plochách vrtaných vzorků 1 až 5 před po rozřezání

Místo	vzorek 1		vzorek 2		vzorek 3		vzorek 4		vzorek 5	
	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B	1A	1B
$\sigma$ (MPa) nerozřezaný	-279	-398	-375	-366	-303	-300	-314	-485	-252	-331
$\sigma$ (MPa) rozřezaný	-207	-365	-371	-347	-298	-374	-309	-435	-346	-372

### 3.6.4 Diskuse výsledků difrakce na vzorcích z materiálu C45

Na všech analyzovaných oblastech byla zjištěna pouze tlaková zbytková napětí (

- 3-4). Rozptyl hodnot napětí naměřených před rozřezáním na straně A (- 349 MPa; - 279 MPa) a na straně B (-415 MPa; - 333 MPa) byl v rozmezí intervalu experimentální chyby  $\Delta\sigma = \pm 40$  MPa. Naměřená zbytková pnutí na straně A - vstupu nástroje jsou nižší než pnutí na straně B. Rozdělením vzorku došlo ke snížení zbytkových pnutí. Došlo však k růstu rozptylu hodnot naměřených napětí na ca. 135 MPa, napětí na straně A bylo stále vyšší než na straně B. Pokles zbytkových tlaků, pozorovaný ve všech měřených místech s výjimkou vzorku 3 (1B) a obou bodů na vzorku 5 nepřekračuje rámec experimentální chyby měření.

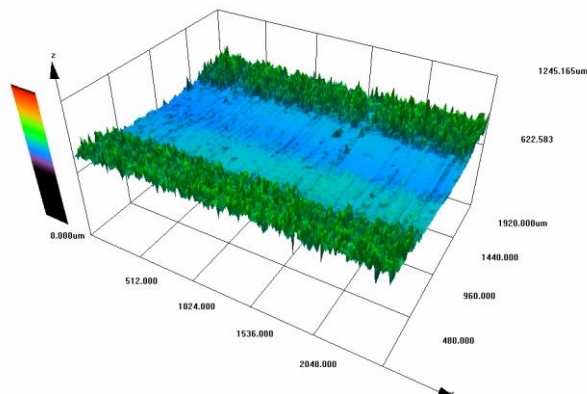
### 3.7 Vliv povrchových morfologií na integritu povrchu

Žádný povrch nelze obrobit tak, aby na něm nezůstaly stopy po obrábění, nebo jiných technologických procesech. Specifický způsob obrábění zanechá na povrchu charakteristickou topografii-tento vytvořený povrch je buď následně zpracováván v dalších technologických operacích, nebo je ponecháván jako finální. Vzniklé morfologie povrchu jsou v dílenských podmínkách měřeny jako drsnost povrchu. Z hlediska integrity povrchu se jedná o jeden z jejích nejdůležitějších faktorů. Avšak v komplexním pohledu integrity povrchu je to stále jen dílčí činitel. Drsnost povrchu ovlivňuje únavové vlastnosti povrchových vrstev. Nerovnosti povrchu je nutné považovat za zárodky budoucího únavového poškození, které znamenají riziko rozvinutí prvních únavových trhlin.

Z dílenského pohledu je měření povrchových morfologií (drsnosti) obrazem celého řezného procesu, tedy od charakteru (obrobitelnosti) materiálu, do stavu nástroje, jak je

naostřen, zdali se na řezných hranách již projevují známky degradace, jako trhliny, vyhloubeniny na čele nástroje apod. Dále je nutno připočíst i vliv stroje a řezných podmínek, jako je rychlost posuvu, průřez třísky apod. Dále jsou to vibrace stroje, které jsou funkcí kvality upnutí a tuhosti celého konstrukčního řetězce stroje. Nejčastěji se tyto vlivy pokoušejí vměstnat do jediného parametru střední drsnosti Ra, což je z hlediska dílenské praxe přijatelné, však vzhledem k parametrům integrity povrchu zcela nedostačující.

Problémem dílenského měření drsnosti je, že se jedná zpravidla o měření lineární, což podstatu povrchových morfologií nevystihuje. Lepším přístupem je monitorování povrchu ve 3D, ale vyhodnocení nelze provést pouze pomocí standartních drsnoměřů a profilometrů. Tuto charakteristiku je možno měřit pouze pomocí optických mikroskopů s automatickým zaostřováním v ose z, nebo konfokálních laserových mikroskopů. Obrázek 3-15 zobrazuje příklad výřezu z vrtané plochy pomocí z laserového konfokálního mikroskopu. Obráběným materiálem byla konstrukční uhlíková ocel C45. Je patrné, že nástroj při vstupu do materiálu (směrem zleva do prava) podléhal vibracím, což se projevilo jako nekvalitní řez. Poté se situace ustálila a odpor materiálu další chvění mimo osu řezu utlumil. Ve střední části měření se projeví některé dosud jevy, jako tvoření nárůstku na břitu nástroje, který se projevil jako pravidelné rýhování. Tyto jevy by nebyly dokumentací drsnoměrem postižitelné a zůstaly by bez 3d analýzy povšimnutí. Výsledky popisující celou plochu povrchu z hlediska jejího reliéfu dovolují postihnout praktické dopady. V tomto případě umožnily zjistit počáteční chvění nástroje a na to lze zareagovat změnou řezného procesu popř. geometrií nástroje. Pokud by bylo měření provedeno tradičně pomocí profiloměru, zřejmě by nebyly zjištěny nijak zásadní rozdíly.



Obrázek 3-15– 3D pohled na plochu vyvrtaného otvoru – nástroj probíhal ve směru šipky vpravo

Pro potřeby měření integrity povrchu je nutno brát v potaz 2 rozdílné výchozí soubory dat:

- nominální povrch – značí ten, co je předepsán na výkresu
- reálný povrch – ten který je skutečně změřen s odlišnostmi od nominálního.

Tyto geometrické odchylky lze definovat jako:

- makroodchylky – odchylky prvního a druhého řádu

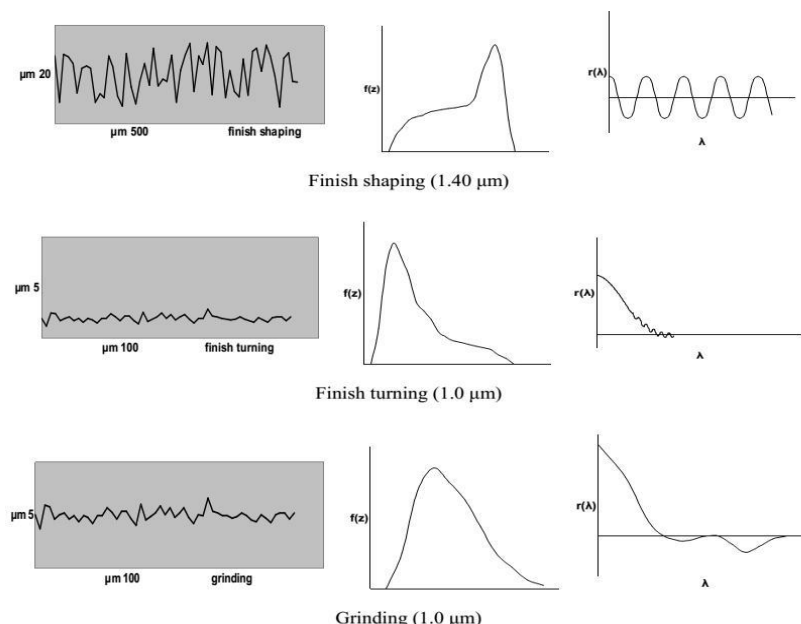
– mikroodchylky – odchylky vyšších řádů  
Tyto charakteristické stopy zobrazuje následující Tabulka 3-5:

Tabulka 3-5– odchylky od nominálního povrchu [6]

řád odchylky	odchylka	příčina
1	odchylky tolerance (kruhovitosť, válcovitosť)	chyby v pohybu nástroje, elastická deformace, opotřebenění nástroje, chyby upnutí výrobku
2	vlnitost	nesouosost nástroje, vibrace, nehomogenita obráběného materiálu
3	rýhy	stav hrany nástroje, tvar třísek
4	trhliny	stav ploch nástroje, mechanismus tvorby třísek
5	krystalická struktura	nehomogenity v chemickém složení, koroze
6	formování krystalů	nepravdelnosti a deformace mřížky

Získaná textura povrchu je složitou funkcí interakce nástroje, obrobku a stroje. Toto lze vyhodnocovat statistickými metodami. Problém je, že tyto procesy vznikají v povrchu náhodně. Vznik těchto nerovnoměrností lze přibližně popsat dvěma funkcemi: distribucí výšky nerovností  $f(y)$  a autokorelační funkcí  $R(\lambda)$ . [6]  $f(y)$  představuje pravděpodobnost, že dané měřené místo leží ve stanovené odchylce od střední čáry profilu. Řídí se Gaussovou distribucí. Tato funkce poskytuje základní představu profilu drsnosti o základních funkčních možnostech a omezeních povrchu (zatížitelnost, koroze apod). V první fázi se určuje klasický parametr  $R_a$  a  $R_q$ . Dalšími měřenými parametry jsou nejčastěji sklon  $\zeta$  ( $R_{sk}$ ) – tento vyjadřuje „plnost“ povrchu, kdy povrchy s vysokým úhlem sklonu lze definovat, jako prázdné a povrchy s malým úhlem plné. Špičatost  $\xi$  ( $R_{ku}$ ) vyjadřuje „ostrot“ mikronerovností. Při normálním rozdělení má hodnotu 3. Při  $\xi > 3$  je povrch definován jako ostrý a při  $\xi < 3$  je označován jako hrbolatý. [6]

Autokorelační funkce  $R_{yy}(\lambda)$  nebo  $R(\lambda)$  zobrazuje a vysvětluje periodické a náhodné jevy, které se vyskytují v procesu měření povrchových morfologií. Tuto funkci lze analyticky zobrazit jako klesající exponenciální funkci, která odpovídala náhodné a periodické složce výskytu jednotlivých povrchových morfologií. Počáteční peak je též ukazatelem náhodnosti. Následující obrázek 3-16 zobrazuje typickou autokorelační funkce pro některé technologické postupy dokončování. [6]



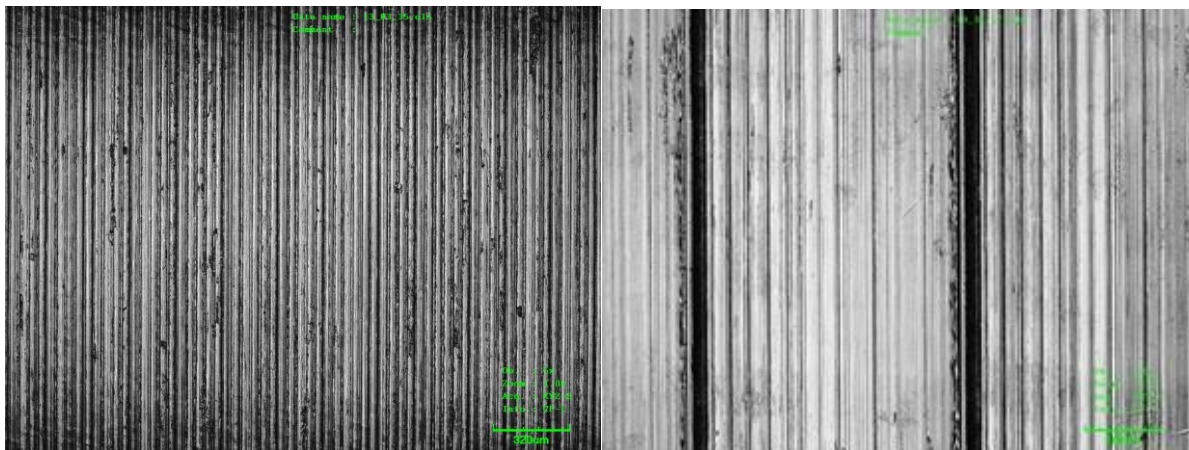
Obrázek 3-16 – typické průběhy autokorelační funkce [6]

Dalšími standarty ve zkoumání povrchových morfologií je například norma ISO 12085:1996 tato popisuje charakter profilu bez filtrace vlnitosti, nebo ISO 13565-2:1996, která popisuje rozvrstvenou charakteristiku honovaných povrchů válců motorů.[6]

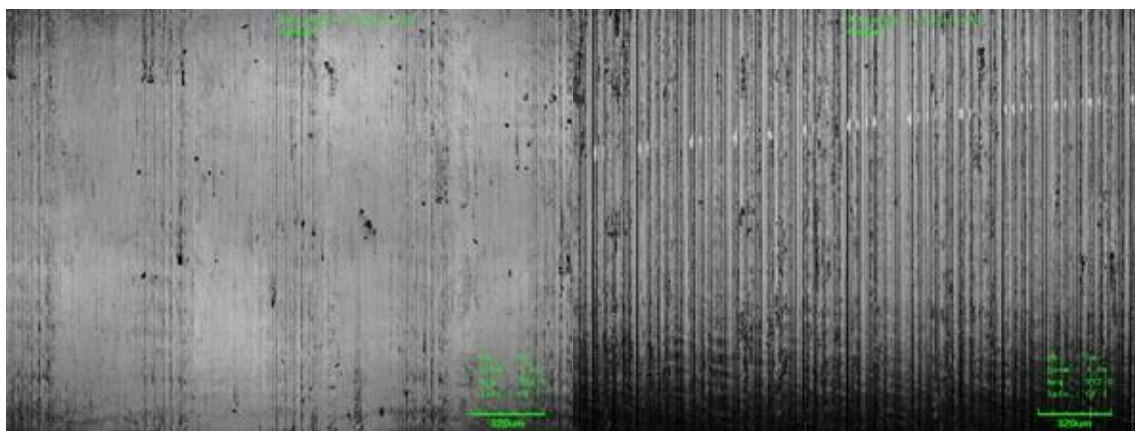
V procesu vytváření, měření a vyhodnocování jsou v poslední době patrné některé trendy. Výsledné morfologie povrchu při procesu třískového obrábění zásadně závisí na rychlosti posuvu. Při nízké rychlosti posuvu a řezné rychlosti je kvalita povrchu velmi nízká z důvodu vytváření diskontinuální třísky a tvorby nežádoucí hrany. Hloubka řezu ovlivňuje tyto parametry pouze omezeně [6].

### 3.8 Možný postup k prověření vlivu povrchových morfologií na integritu povrchu

Ve studii [22], která byla zaměřena na vyhodnocení stavu povrchu na vyhotovených otvorech. V průběhu experimentu bylo použito 7 vzorků: (č. 3,5,6,7,10,11,12), které byly zdokumentovány laserovým konfokálním mikroskopem a profilometrem DIAVITE DH-5. Na následujícím snímku je zobrazen náhled stavu povrchu vzorků snímáný konfokálním laserovým mikroskopem.



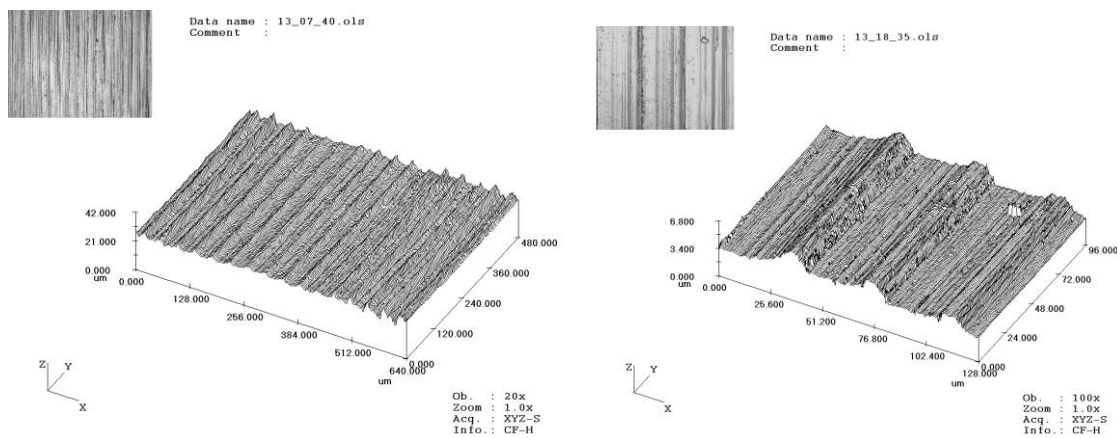
Obrázek 3-17-a) vzorek 3 50x zvětšení b) vzorek 5 100x zvětšení [22]



Obrázek 3-18- a) vzorek 6 50x zvětšení b) vzorek 12 100x zvětšení [22]

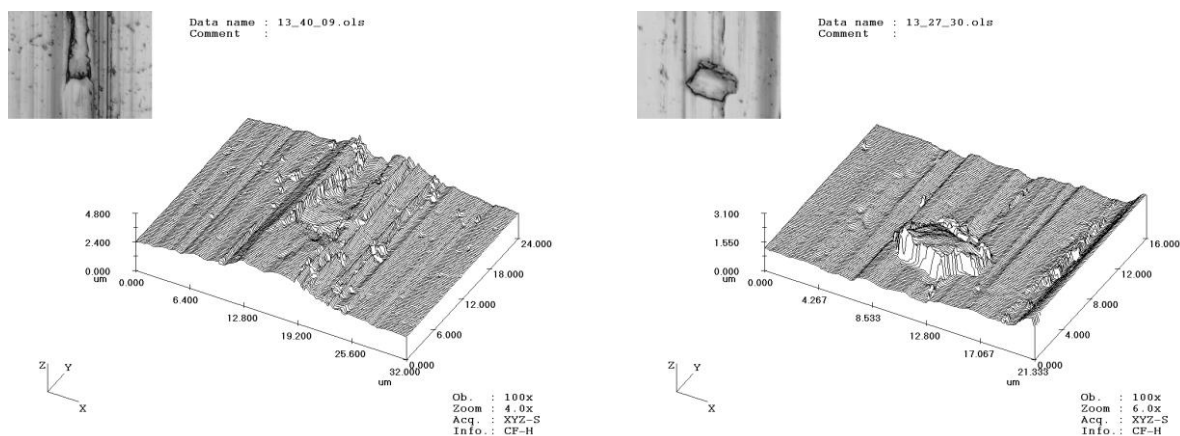
Obrázek 3-17 a Obrázek 3-18 zobrazuje dokumentaci měřených ploch. Mezi vzorky 6-11 nebyl patrný rozdíl. Z těchto obrázků lze usoudit za jakých podmínek bylo provedeno vrtání

otvorů. U vzorku 3 lze konstatovat značnou podobnost se vzorkem 12. Drsnost povrchu byla pomocí konfokálního mikroskopu měřena u vzorků č. 3 viz obrázek 3-19 - obrázek 3-21. Profilometrem pak byl proměřen profil povrchu všech uvedených vzorků.



Obrázek 3-19– Povrch vzorku č. 3 – konfokální mikroskop LEXT [22]

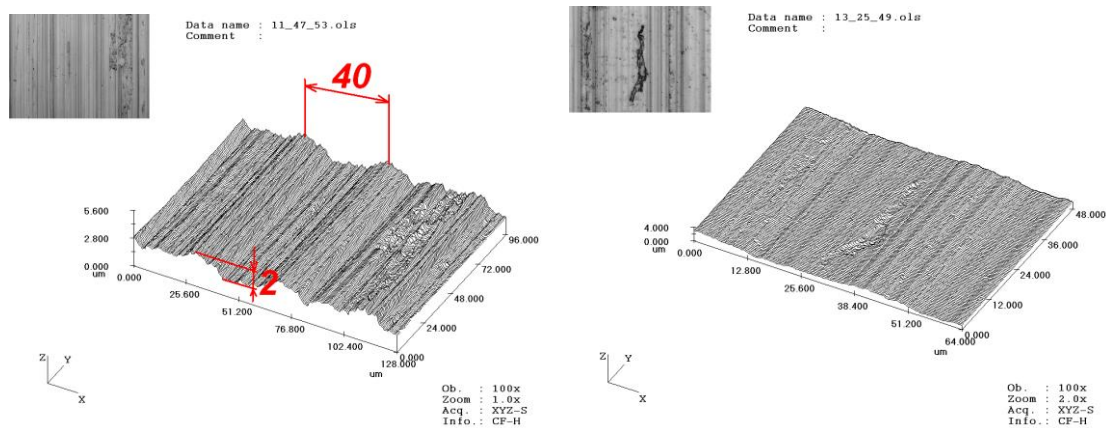
Povrch vzorku je pravidelně drážkovaný. Průměrná výška jednotlivých výstupků (resp. hloubka prohlubní) dosahuje  $2\ \mu\text{m}$ . Perioda (vzdálenost), s jakou se výstupky střídají je  $40\ \mu\text{m}$ . To odpovídá posuvu na otáčku při použití vnitřního rohového nože s VBD při soustružení tohoto vzorku. Profil, který je vytvářen řezem 3D modelu na obr. 3-31 je odrazem geometrie VBD, jejího nastavení vzhledem k vrtanému otvoru a také již zmíněným posuvem. Tento vzorek nebyl válečkován, což vyplývá nejen z geometrie povrchu. Při detailním pozorování stavu povrchu pak byly nalezeny jak „defekty“ ve formě vyvýšenin, jejich velikost byla rozmanitá, ale ve většině případů nepřesáhla  $10\ \mu\text{m}$  a výšku  $2\ \mu\text{m}$ . Mohly být způsobeny např. ulpěním mikročástek uvolněného kovu, nebo zakotvením nečistot do povrchu materiálu. Přítomny byly též prohlubně, které vykazovaly protažení ve směru soustružení. Jejich šířka dosahovala až  $10\ \mu\text{m}$  a délka několika desítek mikrometrů. Obrázek 3-20 pak zachycuje jak vyvýšeniny, tak i prohlubně na povrchu tohoto vzorku.



Obrázek 3-20- Znárodné defekty na vzorku č. 3 [22]

Na hrubší části vzorku byla naměřena drsnost  $R_a=0,62\ \mu\text{m}$  při objektivu 50x a  $R_a=0,56\ \mu\text{m}$  při objektivu 100x.

**Povrch vzorku č.12** je pravidelně drážkovaný, charakter povrchu odpovídá hrubší části vzorku č.3. Průměrná výška jednotlivých výstupků (resp. hloubka prohlubní) dosahuje  $2\ \mu\text{m}$ . Perioda (vzdálenost), s jakou se výstupky střídají je  $40\ \mu\text{m}$ . To odpovídá nastavenému posuvu na otáčku při použití vnitřního rohového nože s VBD při soustružení tohoto vzorku.



Obrázek 3-21– Rýhovaný povrch vzorku č.12 [22]

Rozměry jednotlivých defektů jsou patrné z obrázků, jejich hloubka opět nepřesáhla  $1\ \mu\text{m}$ .

### 3.8.1 Drsnost povrchu – dotkový profilometr Diavite DH – 5

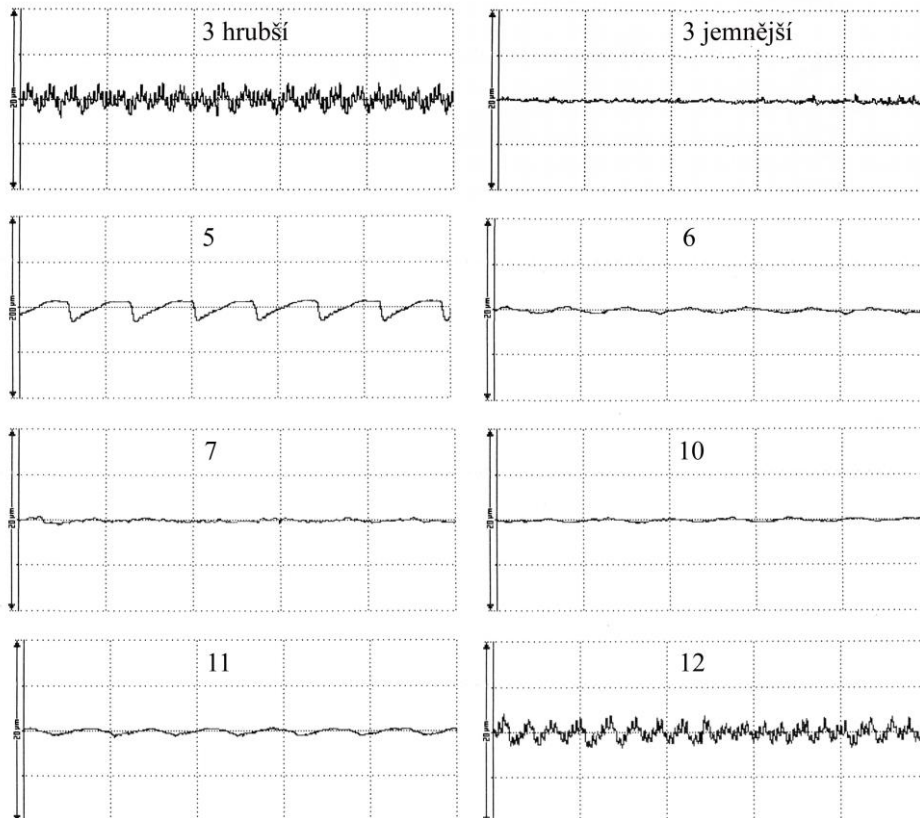
Stanovení drsnosti  $R_a$  a ostatních charakteristik vyplývajících z profilu povrchu bylo provedeno dotkovým profilometrem. Probíhalo pomocí pohybu přiloženého diamantového hrotu na předem stanovené vzdálenosti. Stanovena byla též hodnota mezní vlnové délky (Cutt off), která má za úkol oddělit drsnost od vlnitosti povrchu. Tato činnost se projevila jako nikterak jednoduchá, neboť bylo potřebné nalézt na vzorku část dlouhou cca 5mm. Ta by neměla obsahovat jakékoliv defekty, rýhy a škrábance, které by vlastní měření ovlivnily a mohlo by tak dojít ke znehodnocení výsledků. Na druhou stranu rýhy či defekty, které by vedly ke zkreslení výsledků, by však musely být velice znatelnými anomáliemi na profilu povrchu, aby byly schopny ovlivnit výsledné hodnoty. Proto byly stanoveny vždy 3 hodnoty drsnosti  $R_a$  z každého vzorku a z nich spočítán průměr. Měření, které se průměrné hodnotě drsnosti nejlépe přiblížilo bylo vyhodnoceno jako to, které odpovídajícím způsobem charakterizuje povrch vzorků. Na vytištěném záznamu z profilometru bylo bohužel často patrné ovlivnění vlastního měření rýhami a defekty, které byly způsobeny nevhodnou manipulací se vzorky po jejich vyhotovení. Proto bylo nutné měření opakovat a záznam považovat za správný ve chvíli, kdy se na profilu nevyskytovaly anomálie. Následující

obrázek 3-22 obsahuje souhrn všech profilů povrchu, které neobsahovaly defekty a lze je tudíž považovat za odpovídající.

Drsnost povrchu byla stanovena za těchto podmínek dle normy:

$L_m = 4\text{mm}$

Cutt off = 0,8mm

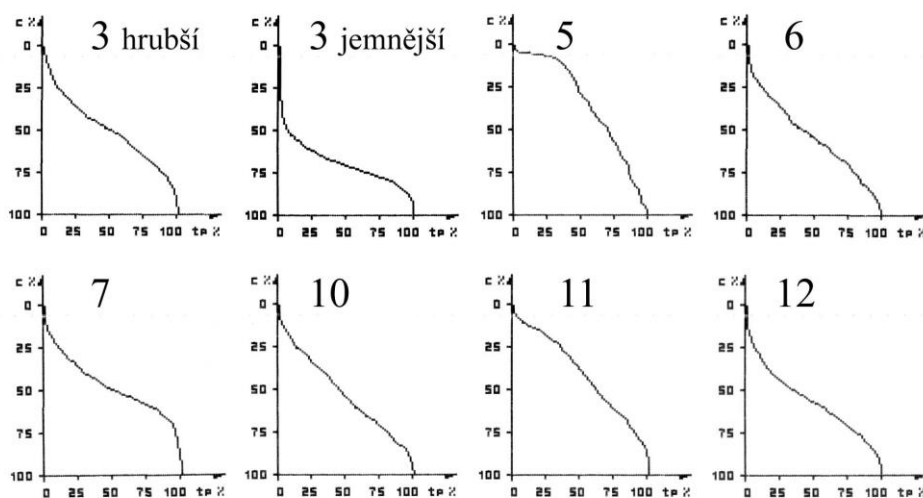


Obrázek 3-22– Profily všech měřených vzorků [22]

Z uvedených záznamů vyplynulo, jakým způsobem ovlivňuje proces válečkování geometrii povrchu. Dochází k vyhlazování a zpevňování povrchu a zatlačování jednotlivých nerovností. Výjimkou se může zdát profil vzorku č. 5, což je způsobeno pouze odlišným rozsahem na ose Y, kdy ostatní vzorky mají rozsah y-ové osy 20 $\mu$ m a vzorek č. 5: 200 $\mu$ m.

Tabulka 3-6– Zjištěné hodnoty Ra, Rz.[22]

Vzorek č.	Ra [ $\mu$ m]	Rz [ $\mu$ m]
3 - hrubší část	-0,63	3,6
3 - jemnější část	0,11	0,8
5	6,13	22,4
6	0,16	0,7
7	0,12	0,7
10	0,11	0,5
11	0,21	0,8
12	0,57	3,2



Obrázek 3-23– Nosné křivky s označením vzorků. [22]

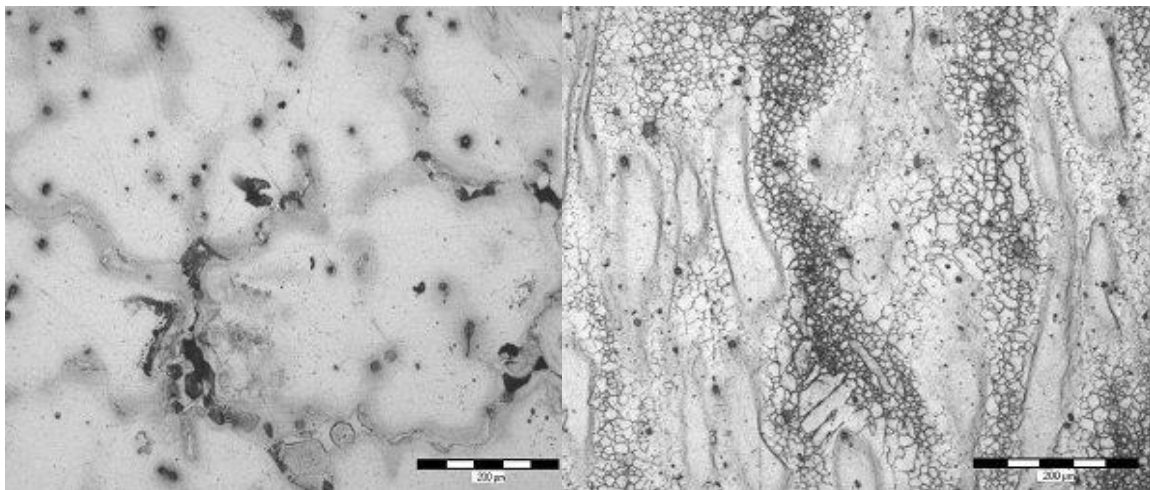
Nosná křivka viz obrázek 3-23 profilu udává podíl materiálu ve vztahu k výšce řezu provedeném na profilu. Bývá označována jako Abbottova křivka. Její tvar společně s profilem povrchu dává představu o geometrických aspektech povrchu. Za nejdůležitější lze považovat strmost Abbottovy křivky. Čím je křivka víc strmější, tím větší je pravděpodobnost, že dalším vzájemným kontaktem s materiálem protikusů bude docházet ke snížení drsnosti, resp. i změně strmosti nosné křivky. Se strmostí křivky se mění i tvar profilu a vyznačuje se ostřejším průběhem. Čím je průběh méně strmý (má tendenci se přiblížit se ke směru osy x), tím je více materiálu zastoupeno ve spodní části profilu a povrch lze považovat za více „nosný“. Nosné křivky se vlivem válečkování mění a lze nalézt i souvislost mezi jejich průběhem s naměřenými hodnotami drsnosti. Čím větší plocha pod nosnou křivkou je zastoupena v horní části, tím je



drsnost vyšší. Vlivem vzájemného pohybu součástí s protikusem se mění i tvar nosné křivky, kdy částečná linearita má tendenci dosáhnout zakřivení, které lze např. nalézt na vzorku č. 7 a 12. Nosné křivky jsou odrazem směru, ve kterém probíhalo měření drsnosti a proto nezohledňují směr kolmý na měření. Z toho lze usuzovat, že i tvar nosné křivky u vzorku č. 11 by se vlivem vzájemného pohybu s protikusem měnil a tím pádem by klesla i drsnost povrchu vzorku a byla by menší než  $Ra=0,21 \mu\text{m}$  [21].

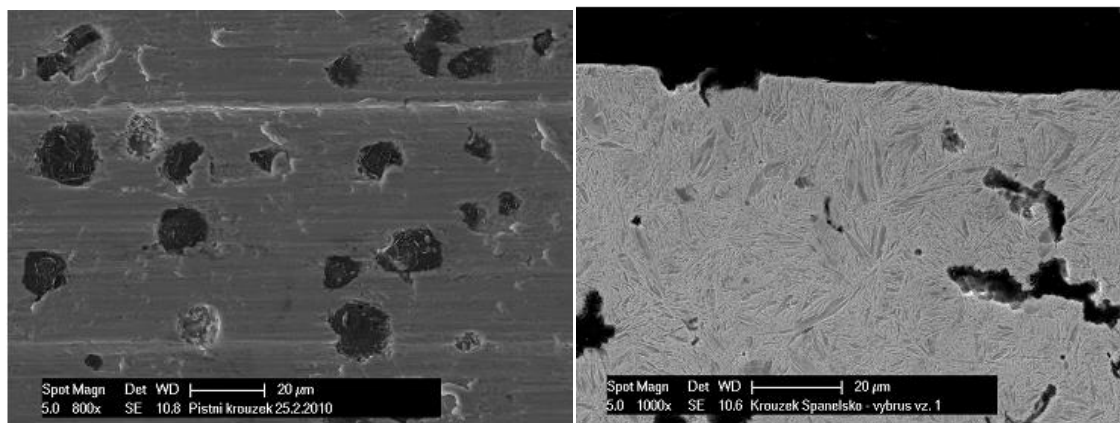
### 3.9 Vliv struktury a mikrostruktury materiálů na povrchovou integritu

V základních teoriích pružnosti a pevnosti je materiál vnímán z hlediska mechanických vlastností jako čistě izotropní a plně homogenní oblast kontinua. Realita tomuto stavu v žádném případě neodpovídá. Stav mikrostruktury je základní podstatou mechanických vlastností celého výrobku, avšak i mikrostruktura není 100 izotropní a působí na ni mnoho vlivů. Jedním z nejpodstatnějších vlivů je technologický stav materiálu, zejména se jedná o proces protváření materiálu, jelikož většina materiálů je polykrystalických, tj. skládají se ze zrn, které jsou jak v netvářeném, nebo žíhaném stavu přibližně pravidelné a orientací danou odvodem tepla popř. bez orientace. Protvářením materiálu za tepla (např. válcováním) dojde ke značnému ovlivnění výchozí struktury, zejména k protažení zrn ve směru tváření a orientaci strukturních součástí v jednom směru-vznik vláknité struktury viz obrázek 3-24.



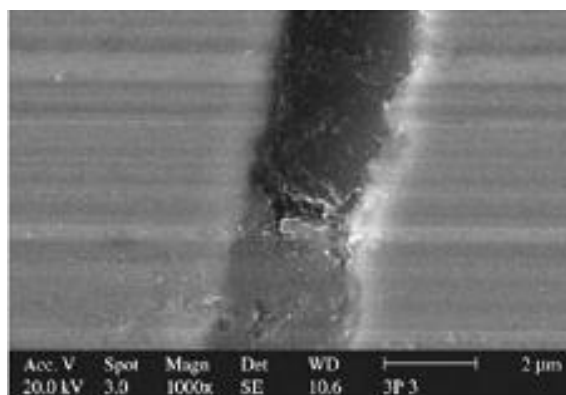
Obrázek 3-24- a) Struktura Mg slitiny AZ-61 odlévaná b) Struktura Mg slitiny AZ 61 tvářená [23]

Mechanické vlastnosti strojní součásti se mění vzhledem k poloze vektoru protváření materiálu. Analogicky také dochází ke změnám povrchových vlastností. Pokud by byla u těchto materiálů měřena tvrdost, tažnost a zřejmě i únavová životnost, tak by zřejmě výsledky byly rozdílné při zkoumání při navzájem odlišných směrech i přesto, že bude povrch vytvořen stejným způsobem za stejných rezných podmínek. Další důležitým parametrem struktury jsou její heterogenity, které rozdělují na očekávané a neočekávané. Tyto heterogenity nemusí být vždy na závadu, např. u šedé litiny s volným uhlíkem jsou grafitové útvary nezbytnou strukturní složkou.



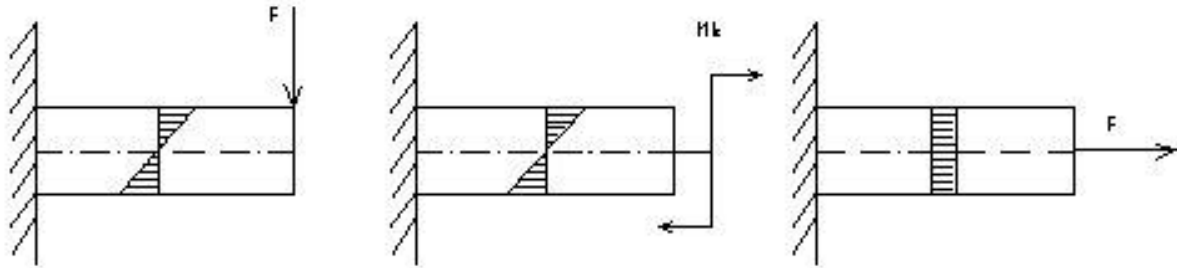
Obrázek 3-25– Povrch litinového pístního kroužku

Obrázek 3-25 zobrazuje, že grafické útvary jsou heterogenní součástí mikrostruktury materiálu. V závislosti na jejich tvaru a umístění tyto útvary porušují integritu struktury materiálu. Konkrétně v případě litiny grafické útvary vytváří mikrovruby, na kterých je lokálně koncentrováno provozní namáhání. Grafické lupínky v tomto případě způsobují křehkost materiálu. Základní matrice litiny je nejčastěji feritická, nebo feriticko-perlitická a bez přítomnosti grafických částic (tedy spíše kavit po nich) by zřejmě materiál vykazoval mnohem vyšší míru rázové houževnatosti a samozřejmě i tažnosti. Díky těmto specifickým vlastnostem tolik rozdílných například od konstrukčních ocelí běžných jakostí vykazuje povrch litinových výrobků přítomnost velkého množství mikrovrubů, které snižují její mechanické vlastnosti. Grafické útvary v šedé litině mohou působit příznivě v kontaktních spojích (styčné třecí plochy, například spojení lože obráběcího stroje s posouvacími součástmi). Zde mají grafické částice pozitivní vliv na tribologické vlastnosti třecích materiálů, především hrubší grafické částice působí mezi třenými materiály jako mazivo. Vzniklé póry po vypadlých částicích grafitu fungují jako mikrozervoary pro použitý lubrikant. Podobně jako grafit mohou působit i karbidy u nástrojových slitinových ocelí, které taktéž tvoří heterogenní součást struktury materiálu. Tyto karbidy jsou příčinou vysoké tvrdosti a odolnosti proti abrazi. Mohou být ale taktéž příčinou následného únavového poškození. Je známo, že častá prvotní příčina destrukce bříty nástroje je způsobena defektem karbidického tvaru popř. v jeho blízkosti (účinek koncentrátoru napětí).



Obrázek 3-38 - vypadlý grafit na povrchu součásti z šedé litiny. [6]

Nežádoucími strukturními fázemi jsou samozřejmě i nekovové vměstky a ostatní defekty jako jsou např. řediny a dusíkové bodliny u povrchů nekvalitně provedené formy při odlévání, nebo chybné metalurgie odlitků. Tyto vady též porušují integritu nejen povrchu materiálu a díky své křehkosti a vrubovému účinku zvyšují náchylnost k lokálnímu únavovému porušení. Tyto vměstky jsou velmi rizikové zejména v oblastech podpovrchových vrstev při ohybovém a torzním namáhání a jejich kombinací. Důvodem je koncentrace napětí na povrchu (viz. obrázek 3-26).



Obrázek 3-26- Namáhání povrchů [17]

### 3.10 Integrita povrchu Ti slitin

V současnosti je jedním z nejdůležitějších neželezných materiálů titan – v praxi jsou však většinou používány pouze slitiny titanu. Slitiny Ti jsou používány tam, kde slouží jako vysoce namáhané součásti (letecký a vojenský průmysl, kosmický výzkum, medicínské aplikace). Jejich nepříjemnou technologickou vlastností je zejména citlivost na vytváření mikrotrhlin, tepelně ovlivněných zón a tahových zbytkových napětí. Toto je často příčinou snížené meze únavy a náchylnosti ke korozi pod napětím. Níže je zobrazen výrazný vliv podmínek při obráběcích operacích. V provedených experimentech [24] byla obráběna slitina Ti6Al4V, která je velmi často používána při konstrukci vysoce namáhaných součástí letadlové techniky. Při šetrném broušení byla dosažena nižší tvrdost, ale výrazně byly zlepšeny únavové vlastnosti oproti konvenčnímu způsobu broušení. V případě „šetrného broušení“ byla dosažena mez únavy  $\sigma_c$  až 372 MPa. Při konvenčním méně šetrném broušení tato hodnota poklesla až na hodnotu  $\sigma_c = 83-92$  MPa. Tento rozpor bude zřejmě značně narážet na požadavek po výkonových ztrátách a dlouhých obráběcích časech, které mohou výrobu značně prodražit a taktéž je možno se snadno dostat mimo optimální obráběcí podmínky [24].

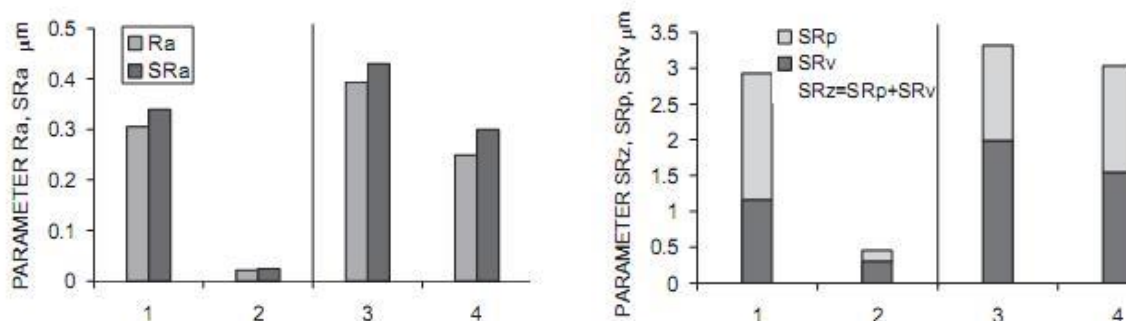
### 3.11 Integrita povrchu při obrábění kalených ocelí

Při obrábění tvrdých ocelí o tvrdosti často i více než 60 HRC a použití vysoce tvrdých řezných materiálů s vysokou rychlostí (směsná keramika, slinuté karbidy) lze dosáhnout vysokých parametrů povrchu o hodnotě Rz okolo 1  $\mu\text{m}$ . Pro výrobce může znamenat značnou úsporu nákladů a řezných časů oproti tradičním způsobům obrábění. Tato metoda obrábění je známá jako vysokorychlostní obrábění [25]. Zkoumání vytvořených povrchů touto metodou probíhá určitou dobu, většinou byly tyto studie omezené na zkoumání parametrů Rz.

První studie 3D topologie vytvořených povrchů byly provedeny ve studiích Klockeho [26] a Grzesika Wanata [27]. Jedním z nejdůležitějších výsledků této studie je, že tyto metody obrábění zanechávají na vytvořeném povrchu jinou morfologii oproti tradičním metodám

obrábění. Například povrchy s negativní šikmostí, které mají dobré předpoklady odolávat valivému namáhání, mohou být dosaženy touto metodou [25].

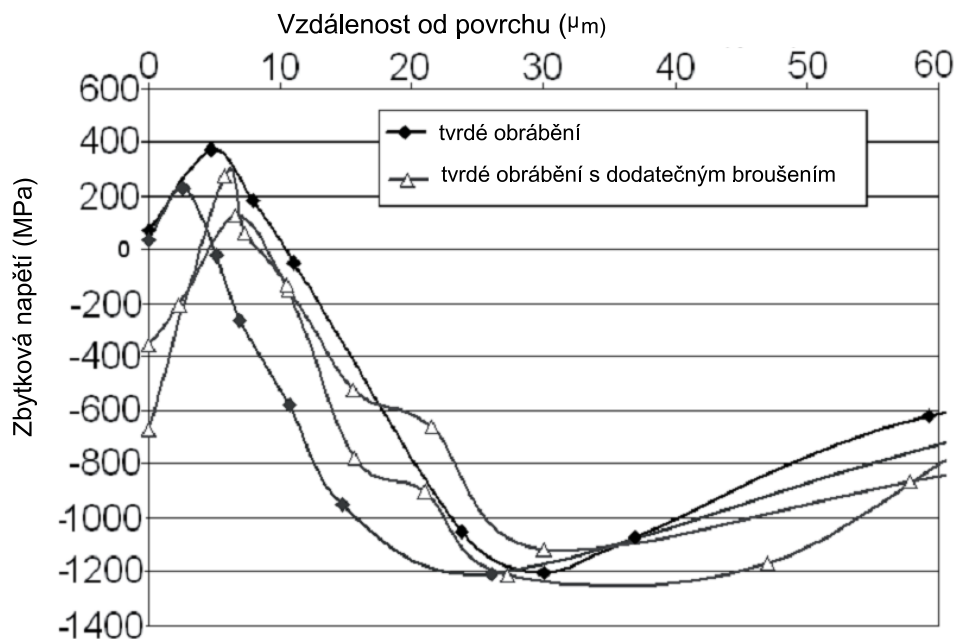
Integritu takto vytvořených povrchů nelze považovat za optimální, zejména v důsledku vysokých požadavků na mez únavy a na odolnost proti vzniku pittingů. Nejčastějším problémem je vznikající tzv. „bílá vrstva spálenin“, která vede k nerovnoměrnému rozložení vlastností povrchu, jako je například tvrdost a nízká hladina příznivých tlakových zbytkových napětí v podpovrchové oblasti [25]. Pro dosažení těchto požadavků jsou při použití metody tvrdého obrábění použity speciální metody dokončování, jako je broušení nekonečným pásem, nebo broušení kotoučem zejména z CBN. Posléze lze naměřit příznivou hladinu zbytkových napětí ve vzdálenosti v řádech  $\mu\text{m}$  od povrchu, navíc je téměř odstraněna nežádoucí bílá vrstva. Souhrn vysokorychlostního tvrdého obrábění s broušením se nazývá hybridní proces obrábění. Při studii [25] byl proveden experiment s vysoce přesným CNC soustruhem s řídicím systémem Siemens 840 D. V prvním experimentu byl použit CBN - trojúhelníková řezná destička s úhlem čela  $20^\circ$  o zaoblení  $0,05\text{ mm}$ , řezná rychlost  $v_c = 100\text{ m/min}$ , posuv  $f = 0,1\text{ mm/ot}$ , hloubka řezu  $a_p = 0,3\text{ mm}$ . Tento test byl označen jako HT1. Druhá série testu s označením HT2 měla následující parametry. Jako řezný materiál byla použita směšná keramika Sandvik's CC650, řezná rychlost  $v_c = 115\text{ m/min}$ , posuv  $f = 0,1\text{ mm/ot}$ , hloubka řezu  $a_p = 0,3\text{ mm}$ . U testu HT1 bylo provedeno dodatečné broušení vzorků nekonečnými pásy s nalepeným zrnem o velikosti  $30$  a  $9\ \mu\text{m}$ , každý o trvání  $9$  vteřin. Pás vibroval s výchylkou cca.  $1\text{ mm}$  s frekvencí  $12\text{ Hz}$ . U testu HT2 proběhlo finální dokončení pomocí brusných kotoučů s velikostí zrna  $29\ \mu\text{m}$ . Frekvence oscilace byla cca  $12\text{ Hz}$ . Byla aplikována přítlačná síla  $40\text{ N}$  a amplituda  $3,5\text{ mm}$ . Nejdříve byly pomocí profiloměru změřeny 2D a 3D distribuce drsnosti.



Obrázek 3-27– a) dosažené drsnosti Ra a plošná drsnost Sra. Sloupec 1 - čisté obrábění HT1, sloupec 2 obrábění HT1 + dokončení nekonečným pásem, sloupec 3 - obrábění HT2, sloupec 4 - obrábění HT2 + superfiniš [25] b) Dosažené hodnoty SRz (velikost od vrcholu peaku do spodu údolí), velikosti SRp – maximální velikost peaku, SRv, maximální hloubka údolí [25]

Z dosažených výsledků, viz obrázek 3-27, je patrné, že po tvrdém soustružení HT1 vznikají zejména vysoké peaky, avšak při dodatečném broušení je tento poměr opačný. Při soustružení HT2 vznikaly zejména hluboké reliéfy. Dodatečné superfinišování poměr mezi velikostmi peaků vyrovnává [25]. Při broušení nekonečným pásem poklesla hodnota RSm z původní hodnoty  $62,5$  na  $20,5\ \mu\text{m}$  oproti superfinišování, kde tato hodnota poklesla z  $79,5$  na  $62,5\ \mu\text{m}$ . Parametr sklonu profilu  $R\Delta q$  poklesl zhruba na  $4^\circ$ .

Dalším parametrem bylo vyhodnocení distribuce zbytkových napětí. Měření probíhalo pomocí rentgenové difrakce při Breg-Brettano konfiguraci. Obrázek 3-28 zobrazuje výsledky.



Obrázek 3-28- Distribuce zbytkových napětí [25]

Při povrchu jsou koncentrována nejčastěji tahová, která v řádu několika μm přechází do špičky a posléze hodnota napětí klesá až k tlakovým. Dodatečným broušením lze tuto nepříznivou kolísavou hodnotu snížit. Získané výsledky prokázaly, že povrch obrobku vytvořený metodou tvrdého obrábění+dokončení nekonečným brusným pásem bude zřejmě vykazovat příznivější vlastnosti, z hlediska únavového poškození, než tvrdé obrábění+broušení brusným kotoučem [25].

### 3.12 Integrita povrchu křehkých materiálů

V průmyslové praxi je již zcela běžné obrábět i materiály, které jsou považovány za křehké. Problémem je však zejména obtížná opracovatelnost těchto slitin a těžko dosažitelná reprodukovatelnost – ta je zcela klíčová zejména při výrobě, která je citlivá na přesnost: (mikroelektronika – výroba čipů apod.). Nezanedbatelné jsou v tomto případě také požadavky na ekonomickou návratnost. Rozdíl oproti obrábění například konstrukčních ocelí je, že se u těchto materiálů nevyskytuje dostatečná míra plastické deformace. Porušení má charakter křehkého lomu s omezenou lokální plastickou deformací ve velmi malém objemu na hranici obrobek-nástroj [23]. Zejména v případě výroby elektrotechnických komponent, jako je příprava polovodičových substrátů pro výrobu integrovaných obvodů, nebo například solárních panelů, je integrita povrchu značně důležitou vlastností-výrazně ovlivňuje výslednou jakost produkce. Typickou technologií, která je pro tento typ výroby charakteristická je výroba polotovarů pro polovodičové součástky. Základem je nejčastěji monokrystal vytvořený pomocí Czochralského metody a vyčištěný pomocí zonální tavby. Dále následuje dělení tohoto velkého polotovaru na jednotlivé waffery.

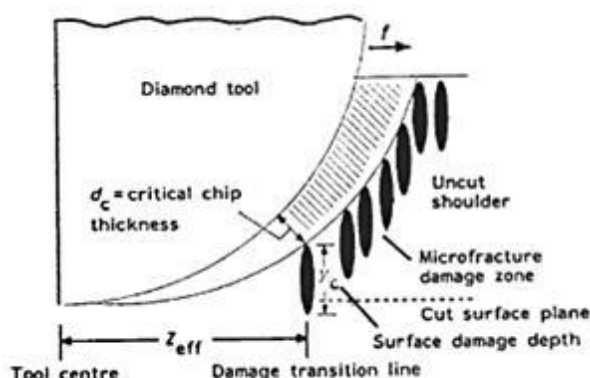
Dále následuje vyřezání potřebného kusu materiálu z něj, na němž je dalším postup vytvoření kvalitního povrchu pro následující epitaxní růst a dopování příměsí. Proto je nutno

zabývat se vlastním mechanismem obrábění těchto materiálů, jelikož z jejich specifických požadovaných vlastností lze vyčíst budoucí problémy integrity vytvářených povrchů.

Z publikovaných prací [28] je patrné, že v této problematice je důležitým parametrem zejména iniciační velikost vznikající trhliny. Velikost deformační energie plasticky deformované oblasti závisí od velikosti deformovaného objemu. Zatímco energie trhliny závisí na velikosti postiženého místa. Plastická deformace začíná být podstatná zejména v oblasti, kde deformace klesá. Z tohoto důvodu je objem materiálu deformovaného plasticky menší, než je kritická mez a pokud nedojde k působení dalších vlivů, zřejmě nenastane ani iniciace trhliny [28]. Tímto je zaveden pojem kritické hloubky trhliny, který je funkcí deformovaného objemu v křehkém materiálu. Z hlediska pozice výrobce produktu je důležité dosáhnout stavu technologického působení v „plastickém“ režimu. Byl učiněn pokus nahradit vznikající povrchové a podpovrchové zárodky trhlín kvazi-statickou indentací Vickersovým indentorem [29]. Při působení silou menší, než je kritická nevznikají obvykle vážnější nepříznivé povrchové poruchy [23]. Tento problém lze rozšířit ještě na tloušťku ubírané třísky. Při růstu tloušťky třísky musí růst i kritická síla na vznik porušení v relaci ke kritické síle třísky, nebo ekvivalentní hloubce průniku. Jedna z teorií je Biffanova teorie. Kritická tloušťka třísky vzniká porovnáním indentace s broušením diamantovým kotoučem.

$$dc = \psi \left[ \frac{E}{H} \right] \left[ \frac{Kc}{H} \right], \quad (14)$$

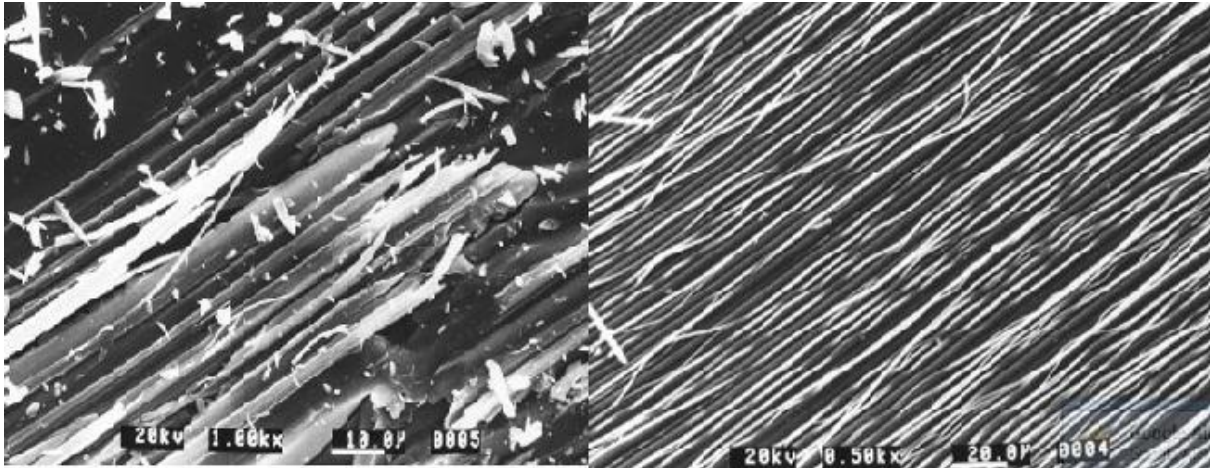
Kde  $\psi$  je bezrozměrná konstanta závislá na geometrii indentoru.  $E$  je Youngův modul pružnosti,  $dc$  - kritická hloubka vniku,  $Kc$  – rázová houževnatost a  $H$  – tvrdost ve Vickersových stupních. Například při broušení sodného skla byla hodnota  $\psi$  stanovena 0,15 a kritická hloubka vniku v řádu 10-100 nm. Dalšími parametry jsou samozřejmě materiálové charakteristiky obráběného materiálu. Obrázek 3-29 zobrazuje, že při reálném obrábění dochází ke kombinaci křehkého mechanismu porušení a lokální plastické deformaci. Pásmo čistě plastické deformace lze klást zhruba do oblasti „ $dc$ “. Výsledek je závislý též na příslušné míře posuvu nástroje. Z rovnice 14 vychází následující vzorec:



Obrázek 3-29- Závislost kritické hloubky řezu na geometrických charakteristikách nástroje [23]

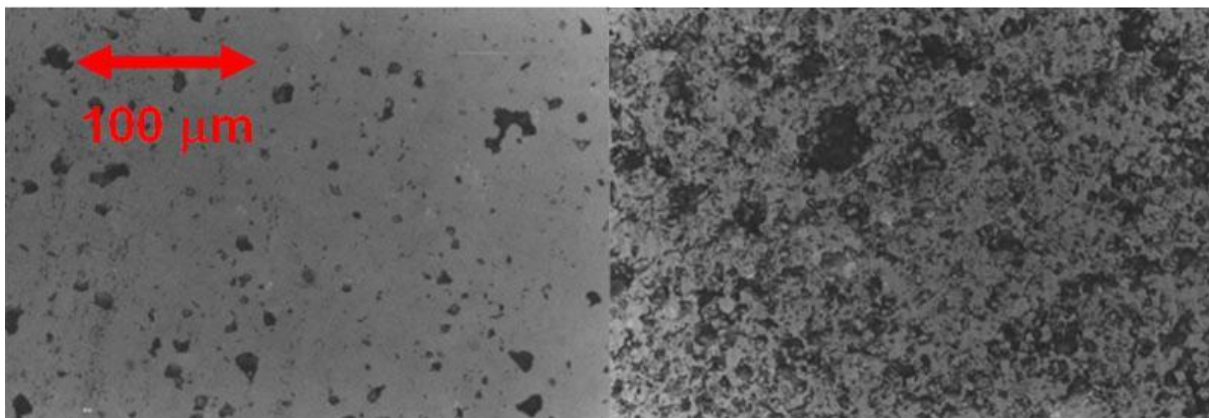
$$f_c = d_c \sqrt{\frac{R}{2(d_c + y_c)}} \quad (15)$$

kde  $y_c$  je hloubka povrchového poškození a  $R$  je poloměr použitého nástroje [23]. Obrázek 3-30 znázorňuje, jaké typické znaky vykazuje křehké povrchové porušení



Obrázek 3-30- a) test obrábění sodného skla – zatížení indentoru 0,9 N b) test obrábění sodného skla – zatížení indentoru 0,78 N [23]

V tomto testu byl použit diamantový indentor, který přejíždí zadanou silou po povrchu sodného skla a na snímcích z elektronového mikroskopu je patrné, že v tomto rozmezí se nachází kritická hodnota mezi křehkým a tvárným porušením. Dalším provedeným experimentem bylo obrábění piezoelektrické PZT keramiky, která má kritickou velikost třísky cca 170 nm viz Obrázek 3-31. Byly provedeny 2 testy, první s třískou o tloušťce 0,1  $\mu\text{m}$  a druhý s tloušťkou třísky 4,9  $\mu\text{m}$  [23].

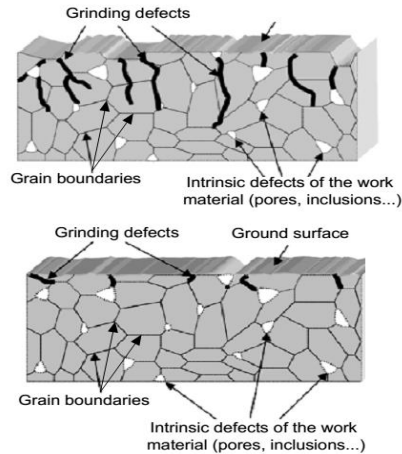


Obrázek 3-31-a) obrábění PZT keramiky s velikostí třísky pod kritickou mezí dc 170 nm b) obrábění PZT keramiky s velikostí třísky nad kritickou mezí dc 170 nm [23]

V případě prvního testu bylo dosaženo výsledné drsnosti povrchu  $R_a - 11 \text{ nm}$ . V případě použití druhé řady testu byla dosažená drsnost  $R_a - 240 \text{ nm}$ . Další kritickou aplikací integrity povrchu u křehkých látek je například výroba komponentů ze sintrovaného  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pro vysokoteplotní aplikace. Korund je velmi atraktivním materiálem díky své vysoké tvrdosti, teplotní odolnosti a vysoké chemické stálosti. Avšak toto je zároveň příčinou nesnadné obrábělnosti, zejména opracování na konečný tvar je značný problém. Obrábění je prováděno nejčastěji pomocí diamantového kotouče za stálých otáček. To je však často příčinou povrchových trhlin a tvárných porušení v závislosti na řezné síle. Toto je samozřejmě jednou z příčin degradace těchto výrobků. Tyto porušení sahají do hloubek v řádu desítek  $\mu\text{m}$ .

Pro jejich odstranění by bylo nutno zařadit ještě další operaci. Vznik těchto poškození lze kontrolovat pouze pomocí změny posuvu a řezné rychlosti. [6]

Obrázek 3-32 zobrazuje vznik povrchových defektů při řezu kotoučem stálou rychlostí.



Obrázek 3-32– Vznik poškození u řezání keramických materiálů [6]

Pro snížení nebezpečí vzniku těchto poškození je nutno použít regulaci výkonu a opatrný nájezd nástroje do řezu, ale nikdy nelze samozřejmě toto poškození zcela vyloučit.

### 3.13 Zkoumání integrity povrchu při technologických operacích probíhajících za relativně nízkých silových zatíženích

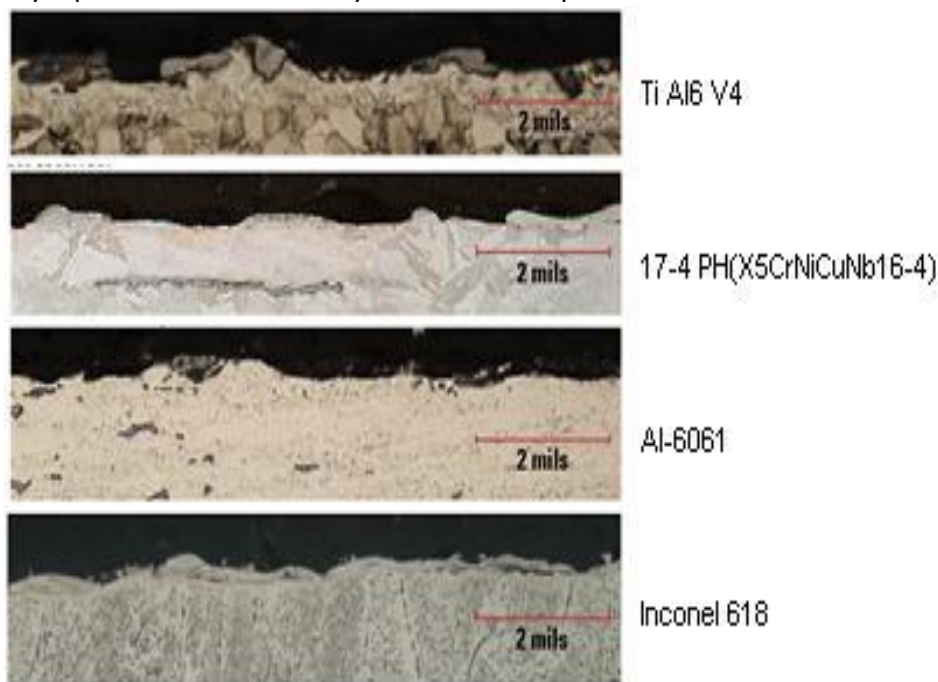
Zbytková napětí vznikají i při relativně nízkých teplotách obrábění např. pomocí elektroerozivního obrábění. Tato metoda umožňuje velmi efektivně obrábět i takové materiály, které konvenčními metodami třískového obrábění jsou definovány jako těžko-obrobitelné. Materiál obrobku není již odebírán mechanicky, ale je díky tepelné energii, jejímž prostřednictvím je materiál taven a odpařován v bezprostředním okolí nástroje v dielektrickém médiu. Tím je umožněno, že obrobek je schopen kopírovat i velmi složité geometrické tvary nástroje. Uvolněné částičky materiálu jsou kapalným médiem dále odplavovány. Avšak, tento proces neprobíhá zcela 100 % - část materiálu ztuhne v místě působení výboje a vznikne kráter. Výsledkem je vysoký podíl mikrotrhlin a pórů v povrchových vrstvách, které zapříčiňují jeho nedostatečné parametry vytvořených vrchních vrstev [30].

V průběhu času se tato metoda obrábění stala zcela běžnou v průmyslové praxi, ale bylo provedeno i mnoho studií s cílem vytvořit model tohoto procesu. Z hlediska integrity povrchu mezi nejdůležitější patří studie Ferreiry [23] (mikroobrábění Cu-W elektrodou a efekt různých nastavení proudu a napětí na mikrostrukturu a topologii). Ve studii [31] se prof. Kharna zabýval zejména mikroanalýzou odstraňovaných úlomků materiálu a vlivu napětí a hustoty proudu na jejich mikrostrukturu. Smyslem bylo pochopení mechanismu jejich odebírání. Jedním z dalších byli například prof. Kiyak [19], který studoval vliv nastavení EDM procesu na výslednou drsnost. Zde bylo dosaženo zajímavých výsledků, například že vysoké hodnoty proudu a vysoká frekvence působí negativně na drsnost. Naopak působí příznivě nižší hustota proudu a frekvence. Tento výsledek bude v praxi konfrontován s požadavkem na co nejvyšší produktivitu pracovního procesu. Pomocí metody EDM je produkována vysoká koncentrace energie v povrchu, jejímž konečným důsledkem může být bílá degradovaná vrstva vzniklá přetavením materiálu. Následně vzniká tepelně ovlivněná zóna v závislosti na technologických



podmínkách podobně jako např. u svařování. Zde jsou častým průvodním jevem mikrotrhliny, což je pro náročné požadavky moderních průmyslových odvětví na integritu povrchu nepřijatelné. Tato situace vedla ke značné nedůvěře společností produkujících letecké komponenty a díly pro automobilový průmysl. Tyto společnosti však nové technologické postupy do značné míry ignorovaly. Avšak EDM technologie je potřebná zejména díky tomu, že je schopna vyrábět velké série značně komplikovaných součástí, které nelze jiným způsobem vyrobit.

Ve studii [32] byly zkoumány vzorky titanové slitiny TiAl6V4, Inconelu 618 a Al-6061 a korozivzdorné oceli 17-4 PH(X5CrNiCuNb16-4). Na obrobení vzorků byla použita uhlíková elektroda na stroji Makino EDNC Ram EDM. Záštitu nad tímto testem držela firma Lockheed Martin. Při obrábění titanové slitiny byly redeponované globulární clustery menší, než 0,013 mm. Přetavená vrstva a tepelně ovlivněná zóna byla o mocnosti do 0,01 mm. Mikrotrhliny nebyly zjištěny. Vzorky nerezové oceli nevykazovaly měřitelnou tepelně ovlivněnou vrstvu ani mikrotrhliny. Přetavená vrstva byla o tloušťce pohybující se v mezích okolo 0,005 mm. Redeponované kruhové oblasti byly o průměru 0,093 mm. V případě obrábění Al slitiny nebyly taktéž měřitelné žádné mikrotrhliny ani tepelně ovlivněné zóny. Přetavená vrstva vykazovala tloušťku 5,1  $\mu\text{m}$  s redeponovanými kruhovými clustery o rozměrech 5,8  $\mu\text{m}$ . Na vzorcích z materiálu Inconel nebyly taktéž zjištěny žádné trhliny ani tepelně ovlivněné zóny a přetavená vrstvička byla tenčí než 18  $\mu\text{m}$  viz obrázek 3-33.

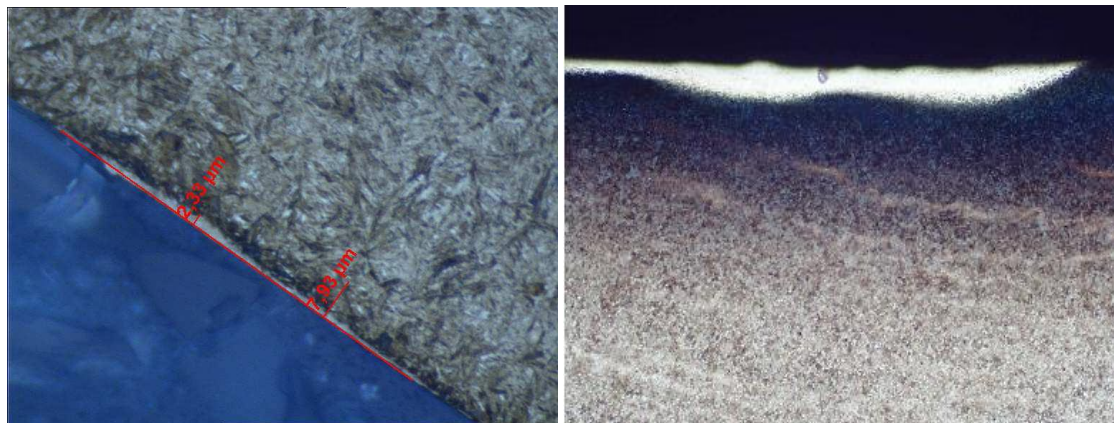


Obrázek 3-33- Příčné výbrusy vzorky obrobené pomocí EDM [32]

### 3.14 Současné aplikace integrity povrchu v průmyslové praxi

Nejčastější dokončovací obráběcí technologií je broušení. Při broušení je chronickým problémem tepelné ovlivnění povrchové vrstvy, kdy při tření nástroje o obrobek vzniká při oddělování třísky velké množství tepla. V závislosti na nastavení řezných podmínek část tepla odchází s třískou, omezená část tepla je odvedena nástrojem. Odvod tepelné energie nástrojem při broušení je omezen díky horší tepelné vodivosti materiálu nástrojů oproti běžně používaným kovovým materiálům (ocel). Nezanedbatelná část tepla je pohlcena vznikajícím

povrchem a zde dochází k nežádoucím jevům. Struktura je ovlivňována zahřátím, do systému je vnesen stupeň degradace. Pokud samozřejmě nedojde k místnímu přehřátí zejména hran výrobku při neopatrné koncové úpravě je technologie naprosto vyhovující (brusné spáleniny) viz obrázek 3-34.



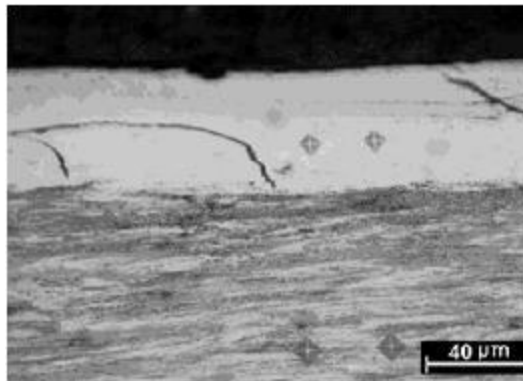
Obrázek 3-34– Brusné spáleniny [33]

Detekce vzniku brusných spálenin v povrchových vrstvách po obrábění je nejčastějším způsobem kontroly integrity povrchu v průmyslové praxi. Je to způsobeno tím, že brusné spáleniny značně snižují výslednou jakost vytvořeného povrchu. Ze silně degradovaného místa mohou růst snadno únavové trhliny, které zásadním způsobem ohrožují další provozuschopnost daného zařízení. Pro sledování těchto jevů se často využívá metody měření Barkhausenova šumu. Pro měření touto metodou jsou již komerčně vyráběny přístroje, které jsou využívány zejména při měření brusných spálenin a při kontrole sériové výroby obvykle v automobilovém průmyslu. Výhodou metody Barkhausenova šumu oproti rentgenové difrakci je, že dává určitou směrnou hodnotu ohledně kvality povrchových vrstev, se kterou je již možno nějakým způsobem pracovat, tj. rozhodnout, zda se daná hodnota mění v určitých místech, či se neobjevují periodické jevy po technologických operacích apod. Nevýhodou je, že nelze zjistit přesné číslo hodnoty zbytkových napětí v daném místě, nýbrž určitou integrální hodnotu celkového stavu. Taktéž je nutno vzít v úvahu ten fakt, že měření je relativně rychlé, tedy může být použito i v sériové výrobě.

Další častou aplikací metod integrity povrchu je její nasazení při obrábění superslitin. Obrábění niklových slitin jako je například Inconel 718 je značně velký problém. Tyto materiály se v poslední době čím dál častěji používají při nasazení do vysoce silově a tepelně namáhaných součástí, jako jsou turbokompresory, letecké turbíny, součásti elektráren atd. Nesnadné obrábění slitiny Inconel souvisí zejména s vysokou houževnatostí a velmi špatnou tepelnou vodivostí. Zvláště při dokončování broušením je tento materiál náchylný k tvorbě brusné spáleniny. Z tohoto důvodu se pro broušení slitin Inconel doporučuje používat vysoce pórovité kotouče z CBN [34].

Nevyhovující výsledky z pohledu integrity povrchu při obrábění Inconelu jsou dosahovány často u nástrojů opatřených destičkami z řezné keramiky. Díky své nízké tepelné vodivosti tyto nástroje způsobují vznik nepříznivé bílé vrstvičky na výsledných produktech. Někteří výrobci letadel dokonce zakazují svým subdodavatelům tyto nástroje používat na

obrábění součástí z Inconelu a jiných superslitin na podobné bázi. Problematikou převodu metod integrity povrchu do praxe a relevanci výsledků se v současnosti zabývá mnoho odborníků. Celá tato problematika zá samozřejmě závažné ekonomické důsledky. K zavedení dodatečné kontroly jsou nutné finanční prostředky, kterých se v současnosti mnoha společnostem nedostává a je na to nutno nahlížet i z úhlu pohledu manažera, který nebude mít radost z toho, že se bude nevyhnutelně zvedat též zmetkovitost, popřípadě náklady na vícepráce. Tato bílá vrstva působí vždy nepříznivě. V optickém mikroskopu má podobu slabě viditelného bílého povlaku, v elektronovém mikroskopu prakticky není zachytitelné.

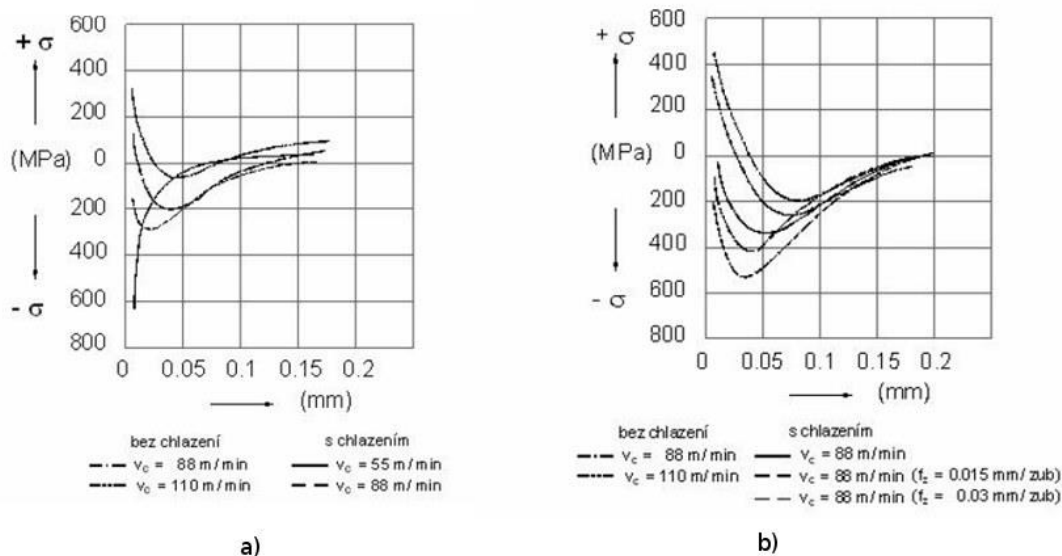


Obrázek 3-35– Bílá vrstva formována při soustružení oceli ANSI 1065 (odpovídá přibližně ČSN 412071) [6]

Tato bílá vrstva viz Obrázek 3-35 je výsledkem fázové transformace (nejčastěji martenzit) za velmi intenzivního mechanického namáhání a vysoké teploty. Nejčastěji se objevuje při broušení (brusné spáleniny). Zde je na jednotku odebraného materiálu relativně velmi vysoká energie, která je ponejvíce proměněna v teplo. Tato energie se soustředí nejvíce na povrchu. Tato vrstva je tvrdá a křehká. Tvorbu, nebo nevytvoření této nežádoucí vrstvy lze ovlivnit pomocí obráběcích podmínek, tj. rychlosti obrábění, použití řezné kapaliny apod. Dalším faktorem bude obráběný materiál. Při obrábění kalených ocelí dochází k nejintenzivnějšímu vývinu tepelné energie. Komplexnímu zkoumání integrity povrchu je věnována pozornost například ve studii [35], kdy je hodnocen proces intenzifikace řezného procesu, který je jedním ze směrů, kterým se ubírá současný vývoj výrobní technologie. V procesu zkoumání integrity povrchu při intenzivních způsobech obrábění jsou tedy důležité zejména přesnost rozměrů, drsnost a mikrostruktura a stav povrchové vrstvy. Se zvyšováním rychlosti a energetického působení na povrchovou vrstvu lze samozřejmě předpokládat, že se gradient těchto změn povrchu ještě dále zvýší. V tomto případě jsou velmi důležité obráběcí podmínky.

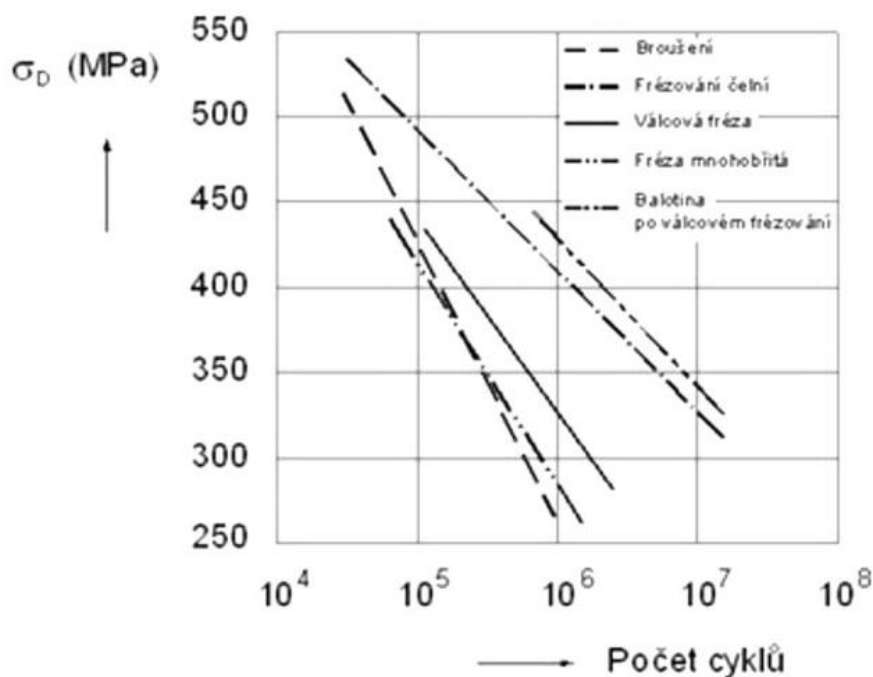
Ve studii [35] byl zkoumán vliv těchto podmínek na obrábění titanové slitiny. Výsledky byly získány při frézování titanové slitiny při čelním frézování nástrojem s pozitivními a negativními destičkami slinutých karbidů řady K, s chlazením a bez chlazení. Čelní frézování hlavou o průměru 125 mm, osazenou destičkami s pozitivním úhlem čela, bez chlazení, vykazovalo v povrchové vrstvě tahová napětí, která přecházela v hloubce cca 0,05 mm v napětí tlaková. Tato napětí se v hloubce 0,1 mm blížila nule a přecházela do napětí tahových. Chlazení za stejných podmínek vyvolávalo v povrchové vrstvě tlaková napětí, která směrem do hloubky materiálu přecházela do nuly a do tahu (obrázek 3-36). Čelní frézování frézovací hlavou osazenou destičkami s negativními úhly čela, bez chlazení, vyvolalo také tahová napětí v povrchové vrstvě, ale tato napětí přecházela v hloubce 0,05 mm do tlaku. Další průběh napětí

směřoval k nulové hodnotě a do tahových napětí. Chlazení za stejných podmínek vyvolává tlaková napětí v povrchové vrstvě, která v hloubce 0,2 mm přechází do nuly a do tahu [35]



Obrázek 3-36- a) Čelní frézování nástrojem s pozitivním úhlem čela bez chlazení a s chlazením b) Čelní frézování nástrojem s negativním úhlem čela bez chlazení a s chlazením [35]

Ověřování vlivu způsobu a podmínek výroby na životnost součástí lze provádět např. únavovými zkouškami na vzorcích s různými stavy napjatosti v povrchové vrstvě, vyvolanými **obráběním**. Výsledky únavových zkoušek uvádí obrázek 3-37, kde jsou zaznamenány průběhy časované meze únavy vzorků dokončených broušením a frézováním.



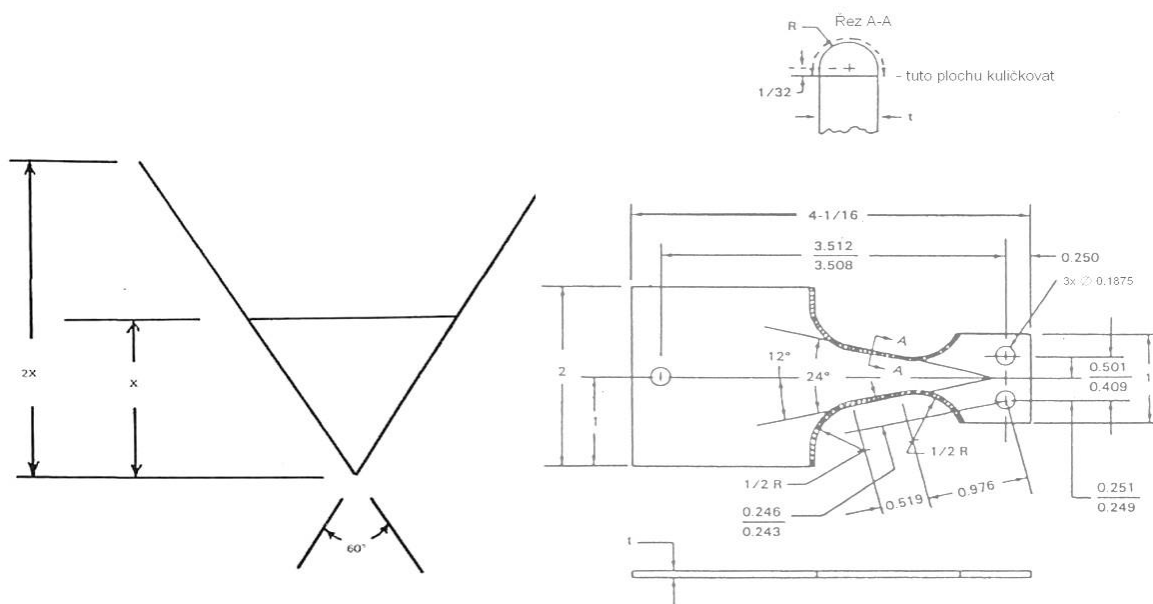
Obrázek 3-37- Průběh časované meze únavy vzorků dokončených různými metodami obrábění [35]

Studium vlastností povrchové vrstvy napomáhá hodnocení vlivů technologických procesů a pracovních podmínek na jakost, tj. na vlastnosti povrchové vrstvy a na zbytková napětí. Aby bylo možné doložit správnost názorů na řešenou problematiku a dát k dispozici konkrétní výsledky, je nutné provádět funkční zkoušky (např. únavové zkoušky, zkoušky tření apod.), kde různé způsoby dokončení funkční plochy lze využít pro stanovení její jakosti a stavu zbytkových napětí. Tyto poznatky se potom promítnou do odolnosti součástí při jejich namáhání a ovlivní jejich a životnost, stejně jako povedou k upřesňování pracovních podmínek, za kterých funkční plocha vznikala [35].

### 3.15 Norma integrity povrchu

Jako první byla v USA stanovena směrná norma zabývající se blíže integritou povrchu. Jedná se o normu ANSI B211.1–1986. Stanovuje základní předpoklady pro stanovení parametrů integrity povrchu souhrnným způsobem. Vychází ze statistického hodnocení jednotlivých nepříznivých vlivů, jako jsou: absorbce, ochuzení slitiny, trhliny, krátery, změny tvrdosti, vměstky, přehyby, rýhy, metalurgické změny, důlky, jámy, zbytková napětí apod. Tyto parametry jsou získávány ze standardních zkoušek:

Měření textury povrchu, vizuální, mikrostrukturní zkoušky, měření mikrotvrdosti, metalografie, měření profilu zbytkových napětí. Pro tuto normu byla vytvořena I metodika měření únavy se speciálním únavovým vzorkem. Tyto jsou pochopitelně používány jen v odůvodnitelných případech, jelikož zkoušky únavy jsou zdlouhavé a náročné na přístrojové vybavení.



Obrázek 3-38– a) Vzorek pro měření únavy (všechny rozměry v anglických palcích) b) symbol plochy kontrolované na integritu povrchu [36]

Tato norma je založena na tom, že shromažďuje jednotlivé aspekty povrchu a pokouší se je dát do vzájemné souvislosti.

Pro stanovení parametrů integrity povrchu je potřebný tzv: **Minimální soubor dat** (The **minimum data set**) který zahrnuje rychlé relativně jednoduché prověření materiálu na povrchové jevy. Jedná se především o měření mikrotvrdosti a textury povrchu v součinnosti s

metalografií. Tedy jedná se o data, která jsou relativně snadno získatelná u většiny průměrně vybavených laboratoří a průmyslových provozů. **Standardní soubor dat** (The **standard data set**) zahrnuje výsledky z *minimálního souboru dat* doplněné o profily zbytkových napětí a výsledky ze zkoušek vysokocyklové únavy. [36]

#### Minimální soubor dat

Minimální soubor dat zahrnuje pro minimálně dvě úrovně intenzity procesu tyto informace:

- a) Materiál, jeho tvrdost a metalurgický stav
- b) Proces, úroveň intenzity procesu a provozní parametry
- c) Drsnost povrchu Ra
- d) Mikrosnímek povrchu (zvětšení 1000x), a to v takovém počtu, který bude reprezentovat stav (všechny oblasti, pokud jsou odlišné) celého povrchu.
- e) Průběh mikrotvrdosti (příčný výbrus)

#### Standardní soubor dat

Standardní soubor dat zahrnuje pro minimálně dvě úrovně intenzity procesu tyto informace:

- a) Informace z *minimálního souboru dat*
- b) Průběh (profil) zbytkových napětí
- c) Vysokocyklová Woehlerova (F-N) křivka

Referenční hodnota, Woehlerova (F-N) křivka nebo základní mez únavy materiálu

Obrázek 3-38 označuje symbol označující kontrolované, především funkční plochy z hlediska integrity povrchu a tedy nejčastěji plochy vystavené otěru, tlaku popřípadě jinému namáhání, které vede později k únavovému poškození. Vzhledem ke značné ceně za získání těchto dat by mělo být s tímto symbolem nakládáno samozřejmě úsporně. Taktéž některá data nejsou snadno získatelná (například metalografie z vnitřních ploch apod).

Dalším postupem je vytipování pro určitý materiál a způsob obrábění rizikové reliktivity. Například pro titanovou slitinu TiAl6V4 to bude zejména tepelné ovlivnění, zvýšená drsnost povrchu, plastická deformace a trhliny a praskliny. V tabulkách je dále možnost dočíst se předpokládaný hloubkový účinek jednotlivých dějů. Například broušení na čisto bude plastická deformace zasahovat do cca. 0,05 mm. Zadavatel zakázky by si před zařazením těchto požadavků měl uvědomit, co si vlastně od tohoto slibuje a měl by stanovit reálně splnitelná kritéria, aby se tato věc nestala v budoucnosti podnětem k neoprávněným reklamám, nebo slevám při přejímání.

#### 3.15.1 Vyhodnocení přínosu normy

Tato norma stanovila základní rámec pro aplikaci integrity povrchu do průmyslové praxe. Poskytuje přijatelný návod pro produkci většiny druhů strojních dílů. Poskytuje

relativně přístupný nástroj pro pracovníky, kteří se integritou povrchu ve své praxi příliš nezabývají. Na druhý pohled však nelze přehlédnout její značné problémy. Tyto však vyplývají ze samotné podstaty integrity povrchu.

Integrita povrchu by měla být komplexní charakteristika zachycující stav povrchu komplexně, ale její aspekty jsou vzájemně jen velmi těžko porovnatelné. Rozhodně se nedá říci, který aspekt je pro tu danou aplikaci důležitější a který méně. Problémem je zřejmě, že tyto charakteristiky nelze zabrat jediným experimentem. Ke slibným experimentálním možnostem by patřila zřejmě metoda Barkhausenova šumu. Tato dává určitý souhrn vlastností povrchu obsažený v jedné charakteristice. Jejím problémem je ten fakt, že na její výsledky je nutno nazírat jako na "černou skříňku", tedy ne vždy je zřejmé, co vlastně je měřeno a zda jsou výsledky správné. V rámci experimentálního programu byly vyzkoušeny některé nekonvenční metody, které by mohly dát určitý obraz o stavu povrchu, a nebylo by nutno zaznamenávat příliš mnoho parametrů, které lze využít v laboratorních podmínkách.

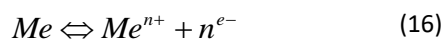
## 4 Analýza povrchových vlastností pomocí elektrochemie

Do této práce byla zařazena kapitola o elektrochemii z důvodu, že stav povrchu má zřejmě i vliv na elektrochemické vlastnosti. Základní myšlenkou byl zejména ten fakt, že stav povrchu ovlivňuje zejména korozní rychlost měřených součástí. Elektrochemie je vědní disciplínou, která se zabývá zkoumáním chemických reakcí na rozhraní elektrody a elektrolytu. Elektrolyt je buď roztok, nebo tavenina obsahující elektricky nabitě částice "ionty". Ty se objeví v roztoku díky disociaci (rozpadu) molekul na jednotlivé atomy s valenční vrstvou ochuzenou, nebo naopak obohacenou o elektrony. Elektrolyty se rozpadají buď neúplně – slabé elektrolyty, které obsahují jak disociované ionty, tak neutrální molekuly. Silné elektrolyty, úplná disociace molekul. Rozklad krystalové mřížky probíhá ve dvou krocích

- molekuly rozpouštědla vytrhávají z krystalové mřížky jednotlivé atomy.
- Solvatace – molekuly rozpouštědla obalí atomy látky. Natočí se k nim stranou s opačným nábojem.

V roztoku vzniká iontová vodivost. Díky menší pohyblivosti iontů je vodivost roztoků nižší, než je tomu u "konvenčních" vodičů elektrického proudu. Díky stejnému počtu kladných a záporných iontů se elektrolyt chová navenek chemicky neutrálně. Nejčastějším využitím elektrochemie je elektrolýza, která je používána v mnoha průmyslových odvětvích. Elektroodový potenciál

Při vložení kovu do elektrolytu se část kovu začíná v něm rozpouštět a tvořit ionty s tím že elektrony zůstávají vázány v kovu a kladné ionty přecházejí do roztoku. Tento proces probíhá až do doby, kdy vznikne dostatečný potenciálový rozdíl a tato reakce se zastaví. V literatuře se tento stav označuje jako ustavení dynamické rovnováhy. Proces postupuje dle rovnice 16.



Tento potenciál je dán: Nernstovou rovnicí:

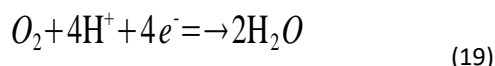
$$E = E^{\circ} + \frac{0,059}{n} \log[Me^{n+}] \quad (17)$$

Kde  $E^{\circ}$  je standardní elektroodový potenciál ve V, také nazývaný  $E_{red}$  jako standardní redukční potenciál ve V.  $n$  je počet elektronů uvolněných při ionizaci a  $Me^{n+}$  je koncentrace iontů v roztoku.



Tento potenciál nelze měřit napřímo. Je nutné vždy měřit oproti elektrodě, jejíž potenciál je znám. Všechny tyto potenciály jsou vztahovány k  $H_2$ , o kterém je předpokládáno, že má potenciál 0V. Běžně se lze setkat s termínem „standardní vodíková elektroda. Za tuto je považována elektroda z platiny, pokrytá platinovou černí, sycená plynným  $H_2$  za standardního atmosférického tlaku 101 325 Pa za teploty 273,15 K, ponořená do roztoku se střední aktivitou vodíkových iontů ( $H^{+}$ ) = 1. Zde probíhá reakce:





Prvky, které snadno odevzdávají elektrony, jsou v této řadě nalevo od H. Tyto snadno podléhají oxidaci např: kovový K na K<sup>+</sup> apod. Kovy napravo od H jsou považovány za ušlechtilé, tyto naopak elektrony ochotně přijímají. Ionty těchto kovů přítomny roztoku mají tendenci se redukovat. Při ponoření elektrod vytvořených z dvou různých kovů s odlišným potenciálem do elektrolytu začne probíhat při uzavření elektrického obvodu proud. Je to příčina korozních vlastností kovových materiálů a ochrany před ním, kdy složka, nebo fáze s vyšší elektronegativitou koroduje druhou složku. Pokud naopak je do roztoku zaveden elektrický proud jedná se o: elektrolýzu.

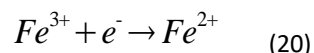
#### 4.1 Korozní kovy z elektrochemického hlediska

Při elektrolýze přecházejí ionty degradovaného kovu do roztoku, nebo tvoří nerozpustné sloučeniny, které zůstávají na povrchu kovu. Tato reakce musí být doprovázena reakcí redukční (depolarizační), která spotřebovává elektrony, které ztrácí korodující kov viz rovnice 21. Podle této rovnice tedy v roztoku přebývají elektrony. Tyto se mohou uplatnit při vývoji H, například podle rovnic 22 a 7. Jinou možností je vyredukování kyslíku dle rovnice:

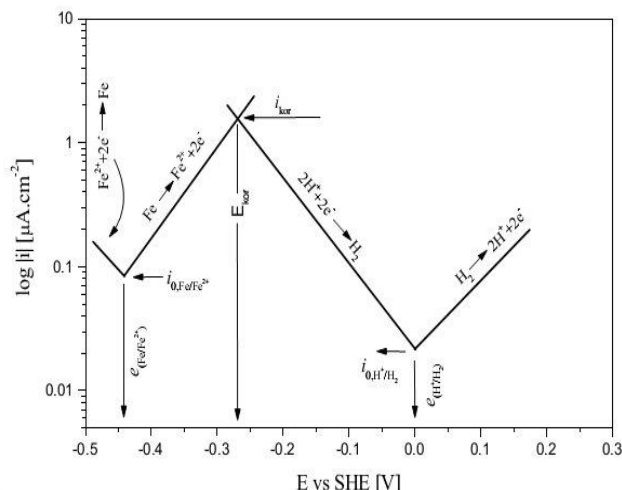
Tabulka 4-1- Potenciály jednotlivých poloreakcí

Redoxní pár	[V]	Redoxní pár	[V]
Li <sup>+</sup> /Li (s)	-3,04	Co <sup>2+</sup> /Co (s)	-0,28
K <sup>+</sup> /K (s)	-2,92	Ni <sup>2+</sup> /Ni (s)	-0,25
Na <sup>+</sup> /Na (s)	-2,71	Sn <sup>2+</sup> /Sn (s)	-0,14
Ca <sup>2+</sup> /Ca (s)	-2,5	Pb <sup>2+</sup> /Pb (s)	-0,13
Al <sup>3+</sup> /Al (s)	-1,66	2 H <sup>+</sup> /H <sub>2</sub> (g)	0
Mn <sup>2+</sup> /Mn (s)	-1,18	Sn <sup>4+</sup> /Sn <sup>2+</sup>	0,15
Zn <sup>2+</sup> /Zn (s)	-0,76	Cu <sup>2+</sup> /Cu (s)	0,34
Cr <sup>3+</sup> /Cr (s)	-0,74	Ag <sup>+</sup> /Ag (s)	0,8
Fe <sup>2+</sup> /Fe (s)	-0,44	Pt <sup>+</sup> /Pt (s)	1,19
Cd <sup>2+</sup> /Cd (s)	-0,4	Cl <sub>2</sub> /2 Cl <sup>-</sup> (g)	1,36
Tl <sup>+</sup> /Tl (s)	-0,34	Au <sup>+</sup> /Au (s)	1,5

Rychlost oxidace je stejná, jako rychlost redukce. Pokud by to tak nebylo, docházelo by k hromadění náboje v elektrodách. [27] Další možností by je redukce rozpuštěného oxidačního činidla, například v případě rozpouštění Fe:



Zároveň na povrchu elektrody probíhá vylučování H<sub>2</sub> podle rovnice [32]. U každé reakce je rovnovážný potenciál a výměnná proudová hustota. Rovnovážné potenciály obou reakcí  $e_{Fe/Fe^{2+}}$   $e_{H^+/H_2}$  nemohou být na jednom povrchu odděleném. Dochází zde ke změně rovnovážných potenciálů na jeden společný potenciál E<sub>kor</sub>. Viz obrázek 4-1



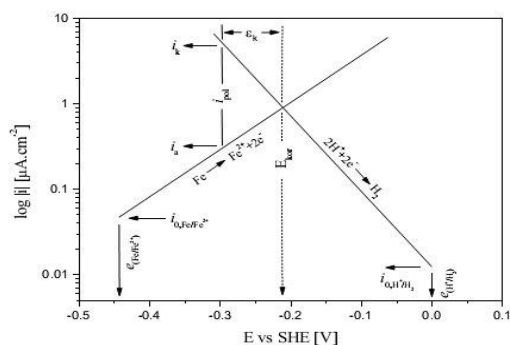
Obrázek 4-1– Změna potenciálů poločlánkových reakcí na smíšený (korozní) potenciál [32]

Při smíšeném korozním potenciálu existují dva druhy přepětí –  $\eta_a = E_{kor} - e_{Fe/Fe^{2+}}$  na anodické straně a  $\eta_k = E_{kor} - e_{H^+/H_2}$  na straně katodické. Zde neprobíhá proud, jelikož proudové hustoty jsou stejně velké, ale díky tomu, že mají opačný směr, tedy se vzájemně kompenzují. Na elektrodě probíhá nevratná celková reakce  $Fe + 2H^+ \rightarrow Fe^{2+} + H_2$  | když elektrodou v tomto případě žádný makroskopický proud neprochází. Dílčí anodická proudová hustota je označována jako korozní proudová hustota  $i_{kor}$ . [32]

#### 4.1.1 Katodická polarizace

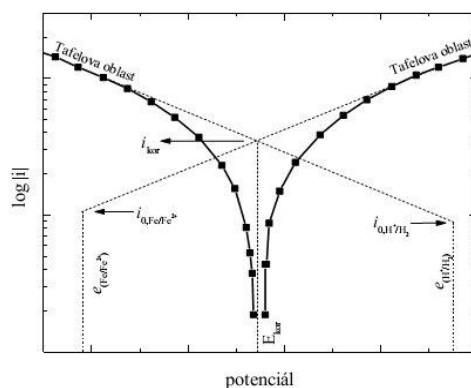
Postup při měření je ten, že je nejdříve měřena katodická část křivky a poté anodická. Anodická křivka odpovídá rozpouštění a při jejím měření dochází ke změnám na povrchu elektrody. Pokud je elektroda katodicky polarizována, do měřené elektrody je dodáván přebytek elektronů z vnějšího zdroje, tj. je měněn potenciál elektrody směrem k zápornějším hodnotám a je odečítán proud protékající touto elektrodou [42].

Pokud je změněn potenciál o hodnotu  $\epsilon_c = E - E_{kor}$  dochází ke snížení rychlosti anodické reakce z  $i_{kor}$  na  $i_a$  a je roven proudu, který při daném potenciálu protéká elektrodou, tedy  $i_{pol} = i_k - i_a$ .



Obrázek 4-2– Změna potenciálu z  $E_{kor}$  hodnotu  $E_k$ , která způsobí průchod proudu  $i_{pol}$  elektrodou [42]

Anodickou a katodickou oblast nelze měřit odděleně, ale pouze součtovou křivku viz obrázek 4-2 . Při malé polarizaci, tedy pokud je rozdíl potenciálů  $\epsilon_k$  nízký je  $i_k$  jen nepatrně vyšší, než  $i_a$ , tedy celkový proud protékající systémem je taktéž velmi malý. Pokud se katodická polarizace bude zvyšovat (zároveň se zvyšuje  $\epsilon_k$ ) zvyšuje se  $i_k$  a zároveň  $i_a$ . Pokud se nachází dostatečně daleko od korozního potenciálu, tak je  $i_a$  zanedbatelná oproti  $i_k$  a součtová křivka odpovídá katodické křivce vylučování  $H_2$ . Tato experimentálně naměřená křivka je zobrazena a v semilogaritmických souřadnicích je v blízkosti korozního potenciálu zakřivená, při vyšších potenciálech má lineární průběh. Tato lineární oblast se nazývá Tafelova oblast.



Obrázek 4-3– experimentální polarizační křivka s vyznačenými oblastmi, kde lze provádět Tafelovu analýzu [42]

Při extrapolaci Tafelových oblastí viz obr. 4-3 lze získat korozní proudovou hustotu  $i_{kor}$  jako ukazatel korozní rychlosti, dále lze získat korozní potenciál  $E_{kor}$  a sklony Tafelových oblastí  $\beta_a$  a  $\beta_k$ . Délka této lineární oblasti na katodické křivce je omezena většinou přibližně na jednu proudovou dekádu. Při vyšších proudových hustotách dojde k zakřivení experimentální polarizační křivky, které je způsobeno zejména vyčerpáním aniontů  $H_2$  v okolí elektrody, tzv: koncentrační polarizace, nebo gradientem odporu prostředí. Vyšší koncentrace iontově rozpuštěných látek snižuje koncentrační polarizaci, zvyšuje vodivost prostředí, tedy rozšiřují Tafelovu oblast. Existuje ještě anodická polarizace, která je analogická měření katodické křivky. Potenciál se posune směrem ke kladným hodnotám a je způsoben odebráním elektronů z elektrody. Rychlost tohoto děje (rozpuštění) se zvyšuje na úkor katodického děje, tedy celkový proud má hodnotu nejčastěji  $i_{pol} = i_a - i_k$ . Tato křivka bývá většinou silně zakřivená a je obtížné zde nalézt lineární oblast. Při kontaminaci elektrolytu rozpustnými korozními produkty může dojít taktéž k nežádoucímu zakřivení těchto vznikajících křivek, a tedy musí být velmi přísně dodržována čistota a hygiena při měření viz obrázek 4-3. [42]

#### 4.1.2 Měření polarizačního odporu

Jedná se o běžnou metodu na měření korozní rychlosti. Její výhodou je vysoká citlivost na stav měřeného povrchu, což bylo samotným účelem měření, zda se podaří touto metodou odhalit minimální rozdíly při měření stavu vytvořeného povrchu. Její provedení je relativně rychlé (jeden test, který byl prováděn v rámci experimentální části této práce trval cca. 14 min) oroze je reakce kdy probíhá oxidace na anodě a redukce na katodě podle rovnic:

$$j_k = -j_0 \exp\left(\frac{-\eta}{b_k}\right) \quad (21)$$

$$j_a = -j_0 \exp\left(\frac{-\eta}{b_a}\right) \quad (22)$$

kde  $j_a$  je anodická proudová hustota a  $j_k$  je katodická proudová hustota,  $j_0$  je výměnná proudová hustota,  $\eta$  je předpětí,  $b_a$  a  $b_k$  jsou konstanty. Nutno je splnit podmínku elektroneutality

$$j_k + j_a = 0 \quad (23)$$

Tímto jsou obě poloreakce vzájemně spřaženy. V průběhu reakce se potenciál  $E$  samovolně posune na hodnotu tak aby se obě rychlosti vyrovnaly, je ustaven tzv: korozní potenciál  $E_{kor}$ . Princip metody je ten, že na polarizační křivce v lineárních souřadnicích existuje lineární úsek v okolí korozního potenciálu. Délka tohoto úseku závisí na velikosti Tafelových konstant a je v řádu až desítek mV. Převrácená hodnota směrnice tohoto úseku udává polarizační odpor. Tento je nepřímo úměrný korozní proudové hustotě, nebo též korozní rychlosti  $i_{kor}$ . Tuto lze vypočítat ze Stern-Gearyho rovnice [29].

$$i_{kor} = \frac{\beta_a \beta_k}{2,303 R_p (\beta_a + \beta_k)} \quad (23)$$

$1/R_p$  je směrnice lineární části polarizační křivky.  $R_p$  je měrný polarizační odpor v  $\Omega m^2$ , tedy jedná se o jednotku odporu na měřenou plochu. Směrnice  $\beta_a$  a  $\beta_k$  lze určit z anodické a katodické větve polarizační křivky. Je nutná výraznější polarizace od samovolného korozního potenciálu, aby došlo k potlačení katodické v oblasti anodické polarizace a naopak.

## 5 Měření povrchového napětí

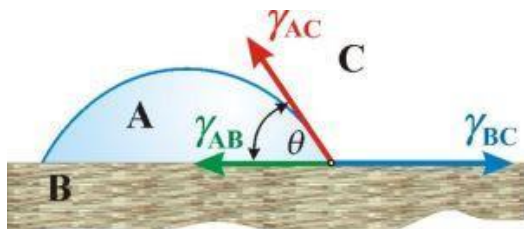
K měření tohoto typu napětí vedla následující úvaha. Předpokladem je, že obrábění ovlivní velikost povrchové energie tím více, čím větší energie je do něj vložena. Povrchová energie je práce potřebná k vytvoření jednotkové plochy nového povrchu. Povrchové napětí je síla v rovině povrchu, kterou působí jednotková délka mezifází proti snahám o zvětšení. Termín povrchová energie a povrchové napětí popisují stejný jev, jejich hodnoty a jednotky sobě odpovídají. Termín povrchové napětí vznikl prvotně z úvahy, že kapalina „má kůži“, která vyvíjí určitou sílu na jednotku plochy. Proto se v případě kapalin mluví spíše o povrchovém napětí a u pevných látek o povrchové energii.[5]. Tento termín je známý zejména u zkoumání fyzikálních vlastností kapalin. Jednotlivé molekuly kapaliny na sebe působí přitažlivými a odpuzivými silami. Pokud je molekula umístěna do objemu, síly se vzájemně vyrovnávají a výslednice sil je nulová. V povrchové vrstvě je však molekula kapaliny obklopena z jedné strany molekulami plynu, nebo pevné látky. Molekuly kapaliny jsou intenzivněji přitahovány molekulami kapaliny než vzduchu a jelikož každý systém se snaží dostat do rovnováhy snížením své energie. I v tomto případě se systém snaží snížit svoji energii tím, že sníží plochu volné hladiny. Nejmenší poměr objemu k povrchu má koule, kapalina se tedy „snaží“ pokud možno zaujmout tento tvar. Jelikož se jedná o energii a ta je definována jako síla působící na dráze  $l$  v tomto případě ji lze definovat jako:

$$\gamma = \frac{dF}{dl} \quad (24)$$

kde  $\gamma$  je veličina povrchového napětí (energie) v  $\text{Nm}^{-1}$ ,  $dl$  je element délky, na kterou z obou stran působí element síly  $dF$ . V případě pevných látek je situace komplikována tím, že molekuly jsou u sebe blíže, působí na sebe vyšší silou a tyto molekuly jsou relativně pevně vázány a nemohou se snadno přeskupovat a tím snižovat svoji potencionální energii. Volná povrchová energie pevných látek lze popsat jako míru porušení chemických vazeb při vzniku nového povrchu. Tuto situaci lze vysvětlit tak, že je k dispozici těleso, které bude nutno rozřezat a tím jsou tedy vytvořeny nové povrchy je spotřebovaná energie pro jejich vytvoření. Zde je je nutno počítat ještě s disipací energie, a tím se ztrátami. Toto je z důvodu, že nelze celou energii využít pro řezání, ale jsou zde ztráty vodivosti, tělesa zářením tepla apod.

### 5.1 Měření povrchové energie

Povrchovou energii nelze přímo měřit. Většinou je nutno použít nepřímých metod, které jsou většinou založeny na faktu, že p velikost povrchové energie pevných povrchů ovlivňuje smáčivost. Přímou metodu lze použít pouze u materiálů křehkých. Zde lze k tomuto účelu využít metodu štěpení, při níž se rozevívá předem vytvořená trhlinka a je měřena síla k tomu nutná. Pro měření je obvykle běžně používána nepřímá metoda založená na Youngově rovnici viz Obrázek 5-1. Jedná se o rovnováhu sil na rozhraní pevné, kapalně a plynné fáze. Plynná atmosféra je vzduch, měřený vzorek představuje pevnou fázi.



Obrázek 5-1- měření povrchové energie [37]

Tuto rovnici lze vyjádřit takto:

$$\gamma_{bc} - \gamma_{ab} = \gamma_{ac} \cos \theta \quad (25)$$

Jednotlivé veličiny popisuje obrázek 5-1.

Výpočet dále probíhá například pomocí Fowkesovy teorie[37]. Mezifázová energie  $\gamma$  je energie potřebná pro vznik jednotkového povrchu a její velikost je taková, aby umožnila převod molekul z objemu do fázového rozhraní. Určitou variací na tento způsob měření jsou inkousty s povrchově aktivní složkou, které se aplikují na povrchy, u kterých je nutno změřit povrchové napětí, zejména pokud se jedná o povrchy opatřené nějakým druhem nátěru, který by při nedostatečné povrchové energii neměl dostatečnou adhezi. Mezní hodnota bývá většinou 38 mN/m<sup>2</sup>. Pro povrchy s nižší povrchovou energií bývá obtížná adheze a je jí nutno docílit speciálními postupy, například naleptáním apod. Tento příklad se týká zejména plastů. V běžné strojírenské praxi je častým problémem provedení například nátěru pozinkované strojní součásti. Toto je nutno řešit nejčastěji například použitím speciálních barev apod. Další aplikací je například odlévání olověných broků, kdy se roztavené olovo nechává odkapávat z výšky do vody. Díky povrchovému napětí se ustaví rovnováha mezi povrchovou a vnitřní energií a kapka zaujme pozici s co nejmenší energií, tedy kulový tvar. Aplikací opačného jevu, tedy snížení povrchové energie jsou zejména skla s velmi nízkou smáčivostí, kdy kapky netvoří vrstvu, ale rozprostírají se a snadno odtékají. Důvodem zařazení této kapitoly do této práce je ten, že v rámci experimentu byla učiněna zkouška (pokus), zda se projeví změna povrchové energie při různě obrobených površích.

## 6 Experimentální koumání stavu integrity povrchů vzorků elektrochemickou potenciometrií a měřením velikosti povrchové energie

Autorem byl proveden pokus, zda je možno zjistit stav povrchu nekonvenční metodou, jelikož, jak již vyplývá z teoretické části jednotlivé metody zkoušení integrity povrchu, jsou zdlouhavé a ne vždy jednoduše vyhodnotitelné. Bylo zkoušeno, zda se projeví rozdíly mezi různě intenzivním broušením. Jako materiál vzorku byla použita ocel. X155CrVMo12.1 (ČSN 419573). Vzorky byly tepelně zpracovány zakalením při teplotě 1050°C. Posléze byly vzorky 2x popouštěny při teplotě 530°C po dobu dvou hodin. Výsledná tvrdost byla změřena na 62 ± 2 HRC. Vzorky byly vyrobeny z jednoho pásu o tloušťce 10 mm a šířce 60 mm. Vzorky byly poté obrobena podle dispozice, které zobrazuje tabulka 6-1.

Tabulka 6-1 – Použité vzorky řezné podmínky

Vzorek	brusný kotouč	chlazení	obráběcí podmínky
1	A 99B 60J 9V	n	v=35m/s, přísuv 0,07 mm/zdvih
2	A 98 46J 9V	Blasocut 2000CF	v=35m/s, přísuv 0,07 mm/zdvih
3	Norton 3SG 60J VX	n	v=35m/s, přísuv 0,07 mm/zdvih

Drsnost povrchu byla nejdříve změřena na profiloměru Homel Etamil T8000 v laboratoři metrologie ZČU.

Tabulka 6-2 – Naměřená drsnost povrchů vzorků

Vzorek	Drsnost Ra[ $\mu\text{m}$ ]	R max [ $\mu\text{m}$ ]
B1-1	0,77 ± 0,11	6,25 ± 0,15
B2-1	0,38 ± 0,08	3,05 ± 0,12
B3-2	0,9 ± 0,06	5,63 ± 0,2

Výsledná drsnost byla proměřena na přístroji Alicona. Tento přístroj umožňuje získání hodnot 3d drsnosti s následujícími výsledky.

Tabulka 6-3– drsnost vzorků naměřená na přístroji Alicona – vzorek B1-1

Veličina	Hodnota	Jednotka	Popis
Sa	503.11	nm	Průměrná střední plošná drsnost
Sq	639.24	nm	Střední kvadratická drsnost
Sp	2.7528	$\mu\text{m}$	Maximální naměřená výška
Sv	3.3661	$\mu\text{m}$	Minimální naměřená výška
Sz	6.1189	$\mu\text{m}$	Největší rozdíl

Tabulka 6-4– drsnost vzorků naměřená na přístroji Alicona- vzorek B2-1

Veličina	Hodnota	Jednotka	Popis
Sa	439.55	nm	Průměrná střední plošná drsnost
Sq	560.39	nm	Střední kvadratická drsnost
Sp	2.7416	$\mu\text{m}$	Maximální naměřená výška
Sv	2.7866	$\mu\text{m}$	Minimální naměřená výška
Sz	5.5283	$\mu\text{m}$	Největší rozdíl

Tabulka 6-5– drsnost vzorků naměřená na přístroji Alicona – vzorek B3-2

Veličina	Hodnota	Jednotka	Popis
Sa	464.28	nm	Průměrná střední plošná drsnost
Sq	588.62	nm	Střední kvadratická drsnost
Sp	3.2054	μm	Maximální naměřená výška
Sv	3.1156	μm	Minimální naměřená výška
Sz	6.321	μm	Největší rozdíl

Výsledky měření drsnosti zobrazuje

tabulka 6-2 - tabulka 6-5. Jako první experiment byla měřena povrchová energie s tím cílem, zda se projeví rozdíly mezi různě zpracovanými vzorky.

vzorek	drsnost ra[μm]	r max [μm]
b1-1	0,77 ± 0,11	6,25 ± 0,15
b2-1	0,38 ± 0,08	3,05 ± 0,12
b3-2	0,9 ± 0,06	5,63 ± 0,2

## 6.1 Tenziometrie

Pro měření povrchového napětí lze použít více metod, například speciální barvy, které při nanesení na měřený povrch zanechají plochu. Pokud povrchové napětí dosáhne mezní hodnoty, na kterou je barva dimenzována, přestane být nanesená vrstva souvislá. Pro praktické měření více vzorků se používají tzv: tenziometry. Jejich princip je relativně jednoduchý: Na měřený povrch je nanesena kapka tekutiny o známých vlastnostech, tato vytvoří kapku, na které se snímá kontaktní úhel, který svírá s podložkou. Povrchové napětí je vypočítáno z Youngovy rovnice. [38] Příklad tenziometru zobrazuje obrázek 6-1.



Obrázek 6-1– Ukázka goniometru/tenziometru fy Ramé/Hart [39]

Na površích, kde by tuto metodu nebylo možno použít, nebo je nutno získat údaje z větší plochy vzorku, jsou používány jiné metody například Wilhelmyho metodu [38-39].

## 6.2 Experimentální aparatura a postup měření

Vzorky byly před vlastním měřením statických kontaktních úhlů smáčení očištěné následujícími způsoby: omytí chloroformem, omytí ethanolem a omytí v ultrazvukové lázni (UZ) v chloroformu a následným omytím v etanolu. Pro měření byla použita aparatura SEE System (MU Brno) umožňující měření tvaru kapky a výpočet volné povrchové energie. Každé měření bylo 5× opakováno a z těchto měření byla vypočtena střední hodnota směrodatná



odchylka (max.  $\pm 2^\circ$ ) kontaktního úhlu smáčení. Měření byla prováděna při laboratorní teplotě  $21^\circ\text{C}$ . Pro výpočet volné povrchové energie byly použité následující smáčecí kapaliny: ethylen glykol (EG) a diiodomethan (DIM). Všechny chemikálie byly čistoty p.a.

### 6.3 Výsledky měření

Tabulka 6-6– Vypočtené celkové volné povrchové energie ( $\text{mJ}/\text{m}^2$ )

Způsob čištění	Vzorek		
	B1-1	B2-1	B3-2
Nečištěné	43,7	38,9	48,2
Chloroform	38,4	48,9	31,8
EtOH	37,7	36,3	35,3
UZ ( $\text{CHCl}_3+\text{EtOH}$ )	44,2	52,4	47,2

#### 6.3.1 Výsledky experimentu měření pomocí tenziometru

Výsledky měření zobrazuje tabulka 6-7. Za předpokladu, že jsou výsledky měření úhlu smáčení smysluplné až po důkladném vyčištění povrchu v ultrazvuku, pak jako relevantní lze vyhodnotit rozdíly mezi povrchovou energií všech tří vzorků. U dvojice B1-1 a B3-2 není ovšem pozorovaný rozdíl tak vysoký, aby se bez dalšího výzkumu mohl udělat jednoznačný závěr o rozdílném stavu jejich povrchu. Rozdíl mezi touto dvojicí a třetím vzorkem B2-1 však signifikantní nepochybně je. Tento vzorek B2-1 má nejvyšší povrchovou energii, která může být způsobena deformací povrchových struktur vyvolaných obráběním, resp. chemickou změnou povrchu (oxidace díky zvýšení teploty při obrábění). Pro posouzení vlivu chemických změn by bylo vhodné studovat rovněž prvkové složení povrchových vrstev pomocí vhodných metod jako je XPS, IČ či Ramanova spektroskopie nebo případně EDX (ve spojení s rastrovací elektronovou mikroskopií).

Tabulka 6-7- Kompletní přehled naměřených úhlů smáčení

Způsob čištění	Vzorek					
	B1-1		B2-1		B3-2	
	$\theta/\text{Smáčecí kapalina}$		$\theta/\text{Smáčecí kapalina}$		$\theta/\text{Smáčecí kapalina}$	
	EG ( $^\circ$ )	DIM( $^\circ$ )	EG( $^\circ$ )	DIM( $^\circ$ )	EG( $^\circ$ )	DIM( $^\circ$ )
Nečištěné	47,22± 0,41	34,21± 0,91	25,74± 0,86	30,67± 0,68	25,33± 3,77	31,6 1±0,36
Chloroform	70,35± 1,04	42,10± 0,94	67,68± 0,57	41,24± 1,27	68,59± 0,58	54,7 1±1,42
EtOH	66,68± 0,93	44,28± 1,44	58,24± 0,68	48,60± 1,81	66,63± 0,80	47,3 2±2,11
UZ ( $\text{CHCl}_3+\text{EtOH}$ )	50,61± 1,40	32,15± 1,54	19,58± 0,64	18,42± 2,44	36,47± 1,32	29,5 9±2,06

## 6.4 Měření stavu povrchu pomocí lineární polarizace

Se stejnými vzorky B1-1, B2-1, B3-2 jako v případě měření pomocí tenziometru byl proveden pokus, zda se to, co se projevilo u měření povrchové energie, projeví při měření elektrochemických charakteristik. Jako měřicí přístroj byl použit Bio-Logic VSP, jako elektrolyt byl použit roztok 3,5% NaCl. Roztok byl napuštěn ve skleněné cele, ve které byla zapojena měřicí elektroda z Pt a referenční kalomelová (HgCl). Po ustálení elektrodového potenciálu byl stanoven čas 300 sec (5 min), který je obvykle při měření materiálů na bázi Fe používán. Posléze byl obvod sepnut a postupně bylo zvyšováno napětí, tak aby byla změřena jak katodová, tak anodová oblast. Výsledkem procesu měření jsou předpokládané korozní rychlosti v mm/rok vypočítané z Tafelovy analýzy a korozní potenciál měřený oproti standardní kalomelové elektrodě. Pro zvýšení spolehlivosti byly provedeny vždy 3 zkoušky. Z průběhů vyplývá, že měření probíhalo bez větších problémů a poruch, které by se projevily schody a zdeformovanými tvary měřených křivek. Tyto poruchy na měřícím řetězci zřejmě signalizovaly nějaký zásadní problém, jako je silně potrhaný povrch po nešetrném obrábění apod.

Tabulka 6-8– Získané výsledky z elektrochemického měření

Vzorek 1	korozní rychlost [mm/rok]	korozní potenciál mV vs Ref
1 měření	0,0818	-469
2 měření	0,1378	-485
3 měření	0,242	-498
<b>Vzorek 2</b>		
1 měření	0,1133	-443
2 měření	0,0453	-427
3 měření	0,01868	-445
<b>Vzorek 3</b>		
1 měření	0,2031	-484
2 měření	0,2917	-509
3 měření	0,2601	-512

Ze získaných výsledků viz tabulka 6-8 je patrné, že mezi jednotlivými vzorky nebyly naměřeny příliš velké rozdíly, navíc se projevily poměrně rozdíly mezi jednotlivými měřeními, které dané měření značně zkreslily. Přijatelné rozmezí hodnot korozního potenciálu v tomto testu bylo získáno pouze u vzorku č. 3. Pozitivním zjištěním byly výsledky u vzorku 1 a 3, které byly obrobena přibližně na stejnou jakost podobnými obráběcími podmínkami, tyto vykazují přibližně stejnou hladinu korozního potenciálu. Tato oblast bude zřejmě vyžadovat další zkoumání a více vzorků. Tato metoda tedy neukázala příliš velký rozdíl. Měření pomocí tenziometrie zřejmě poskytuje lepší výsledky.

## 7 Integrita povrchu šedé litiny

Autor si dovolil zařadit tuto kapitolu do této práce z důvodu, že by chtěl integritu povrchu prozkoumat nejen z pohledu třískového obrábění, ale že by bylo možno ji i částečně ovlivnit skrz metodu, která by byla schopna vrstvu materiálu naopak přidávat. Zvláště u šedé litiny by tato metoda mohla být velmi dobře využita. Použití šedé litiny je velmi široké díky jejím specifickým vlastnostem. Mezi přednosti lze počítat lubrikační vlastnosti uhlíkových částic a tím zlepšení tribologických parametrů styčných ploch. Výhodné jsou tlumící vlastnosti, které jsou využívány při konstrukci obráběcích strojů. Mezi další pozitivní vlastnosti lze počítat samozřejmě i přijatelná cena a vynikající slévárenské vlastnosti (zabíhavost). Grafitické útvary vyloučené ve struktuře zasahující do vrchních vrstev materiálu zapříčiňují mimo jiné značnou heterogenitu povrchu a z ní vyplývají některé problémy, které je nutno posléze řešit.

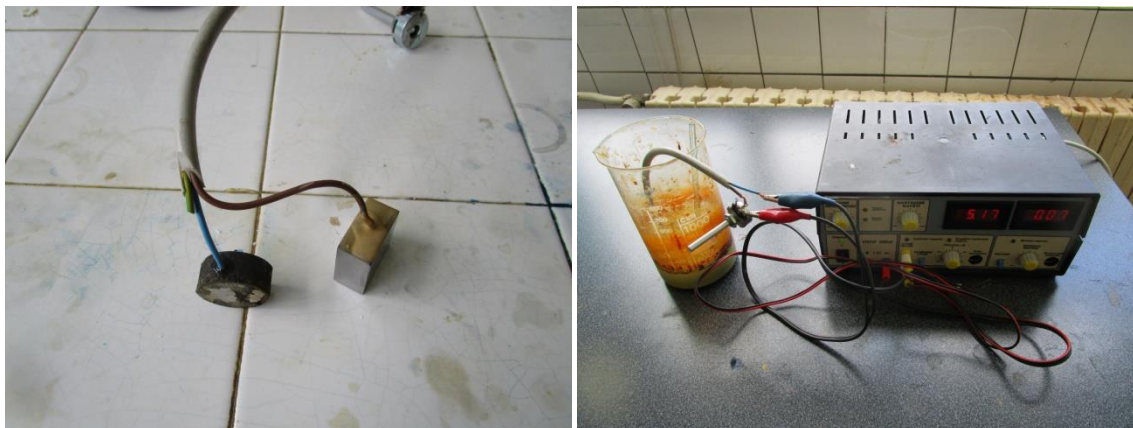
U vybraných aplikací se tato heterogenita povrchu může projevit značně negativně. Zejména se jedná o galvanické pokovení, nebo při opatření třecích ploch ložiskovou kompozicí. V případech, kdy lze předpokládat nedostatečnou adhezi zamýšleného povlaku při povlakování může docházet na povrchu součásti určeném k vytváření neprokovených ostrovů, nebo jiných vad v místech přítomnosti lupínku, nebo kuličky grafitu. V případě speciálních aplikací je nutná komplexní eliminace vlivu uhlíku na povrchu. Tato situace má několik možných řešení. Obvyklým postupem je vypálení za vysoké teploty. Tento postup je však možno použít pouze u některých případech, kde je k dispozici příslušné vybavení, navíc může dojít k nežádoucímu ovlivnění mikrostruktury. Toto se zatím spíše využívá v laboratořích, není mnoho informací, že je tato technologie využívána i v průmyslu.

Autor by v tomto odstavci chtěl navázat na fakta vyplývající z fotografií, kdy byla obráběna uhlíková ocel C45 (ČSN 412050), kdy je na obrázcích 8-16 – 8-19 patrné, že funkci povrchu přebírá materiál, který je ve vrstvě „nahrnutý“ na stávající povrch. Proto vyvstala otázka, zda nelze tento překryvný materiál vytvořit. Požadavek na tento povrch by bylo možno shrnout jako: rychle, levně a bez větších nároků na vybavení bez použití toxických chemikálií.

V rámci této práce byl vyzkoušen jiný proces a to pokrytí galvanicky vyloučenou vrstvou Fe, která by měla grafitické útvary pokud možno zakrýt a tím eliminovat jejich vliv. V případě povlakování obráběné součásti by mělo dojít k napravení lokálně potřhaného a deformovaného povrchu. Pro takové účely je běžně využíván proces tvrdého chromování, nebo mikronávary. Je samozřejmé, že tento představovaný proces není univerzálně použitelný. Jedná se o proces relativně neznámý. Tento proces byl využíván v 50. letech 20. století při obnově opotřebovaných ocelových tiskařských štočků. V tomto experimentu je učiněn pokus, zda lze tuto technologii využít pro zlepšení integrity povrchu šedé litiny. Nejedná se v tomto případě čistě jen o galvanické vyloučení jiného kovu na povrchu Fe součástí, ale pokrytí povrchu součásti tím samým materiálem na bázi Fe, ze kterého je vytvořena samotná matrice. Tyto vyloučené vrstvy jsou velmi tenké a mechanické vlastnosti lze tímto procesem ovlivnit pouze velmi málo. Výsledkem je vrstva vysoce čistého Fe. Na prokázání, zda má proces nanášení vrstvy železa vliv na integritu povrchu bylo použito bezproudé niklování.

## 7.1 Použité vzorky

Jako zkušební materiál byly použity vzorky ze šedé litiny s lupínkovým grafitem, použité v předchozím experimentu. Vzorky byly obrobeny do formy kvádrů o rozměrech 30x30x20 mm. V horní části vzorku byl vyvrtán otvor o průměru 3 mm, aby mohl být instalován izolovaný Cu drát, který bude vodivě spojen se vzorkem. Posléze byla provedena kontrola vodivosti drátu se vzorkem a spoj byl zalit pryskyřicí, aby nedošlo k nežádoucímu spojení drátu s elektrolytem. Vzorek určený k povlakování byl vybroušen na metalografických papírech a posléze vyleštěn diamantovou pastou o velikosti zrn 3 $\mu$ m. Jako anoda byla použita taktéž šedá litina.



Obrázek 7-1- a) Upevnění vzorku na kabelu b) Uspořádání měřící aparatury

Pro opatření vrstvou Fe byly použity návody z publikace [47]. Aby bylo dosaženo dostatečného přilnutí povlaku bylo nejprve přikročeno k chemickému alkalickému odmaštění. Na 1 l odmašťovacího roztoku bylo použito:

- 46 g  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (vodního sklo)
- 44 g  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  (fosforečnan sodný terciální)
- 10 g NaOH (hydroxid sodný)

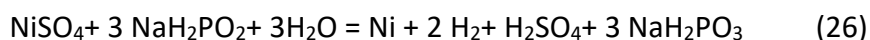
Navážené suroviny byly vloženy do kádinky a doplněna voda na 1l roztoku. Aby povrch nestačil zkorodovat byl do roztoku potopen ihned po vybroušení a vyleštění. Pro elektrolytické vyloučení Fe byla použita následující receptura pro výrobu 1 l roztoku:

- 180g síranu železnatého  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (zelená skalice)
- 40g síranu hořečnatého  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (hořká sůl)
- 27 g kyselého hydrogenuhličitanu sodného  $\text{NaHCO}_3$  (jedlá soda)

Lázeň pracuje za pokojové teploty a proudové zatížení je 0,1-0,15 A/dm<sup>2</sup>[1]. Pro elektrolýzu byl použit zdroj stejnosměrného proudu, který umožní získat napětí až do 30 V a proud do 10 A. K jemnému nastavení proudu byl použit drátový potenciometr s přípustným zatížením 4W a hodnotou 200  $\Omega$ . Jelikož o dané technologii nebyly známy bližší informace bylo nejdříve postupováno tak, že bylo postupně časové intervaly zvyšovány z 30 min na 1 h a posléze 2 h, 3 h. Pro zkoumání povrchu byl použit metalografický mikroskop Carl Zeiss, který umožňuje snímání ve 3D, lze tedy využít při zkoumání drsnosti a vlnitosti vytvořeného povlaku.

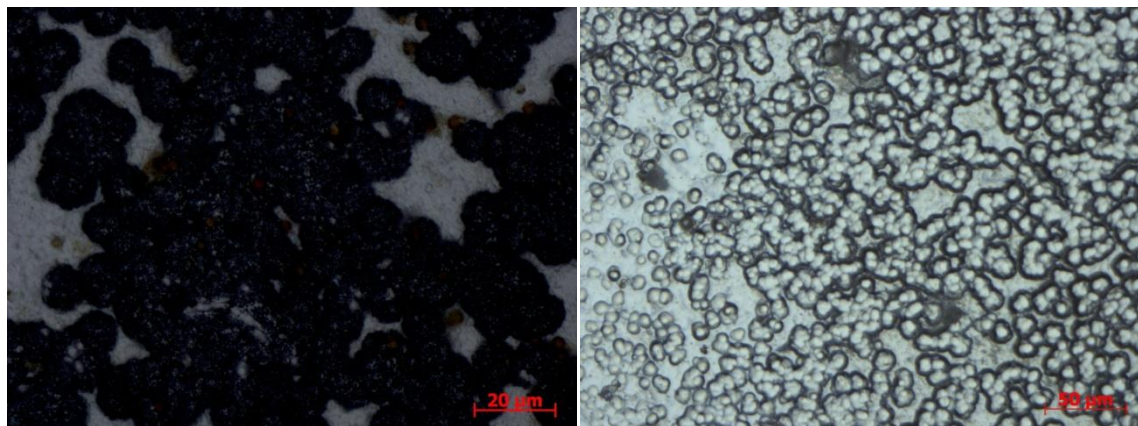
## 7.2 Chemické niklování

Jedná se o povlak Ni a P. Je to často používaná povrchová úprava ocelových, měděných mosazných dílů. Omezeně lze aplikovat i na Al slitiny. Pomocí této technologie lze částečně nahradit i tvrdé chromování. V procesu vytváření této vrstvy se jedná o auto-katalytickou reakci, která je používána k nanesení slitiny Ni a P na požadovaný substrát bez použití elektrického proudu. Pomocí procesu lze snadno vytvořit rovnoměrnou tloušťku až 80  $\mu\text{m}$  pokovení i na tvarově složitých dílech. Po pokovení je vytvořená vrstva amorfni. Tvrdost podle obsahu P ve vrstvě (obvykle 5-12%) dosahuje 400-650 HV. Otěruvzdornost podle jednotek TWI dosahuje 14-24. Po tepelném zpracování (žhánání na 400 °C po dobu cca 60 min) lze dosáhnout tvrdosti až 800-1100 HV a otěruvzdornosti 8-15 TWI. Koeficient tření při styku s protikusem vyrobeným z oceli činí zpravidla 0,2 s mazivem a 0,4 bez maziva. Lze vytvořit vrstvy v řádu až 80  $\mu\text{m}$ . [48] Reakce probíhá při teplotě 80 – 90 °C a je důležité dodržet vysokou čistotu a přesnost. Vytváření Ni-P (možné kombinace i NiB, NiCoP, NiWP) povlaku probíhá podle rovnic [49]:

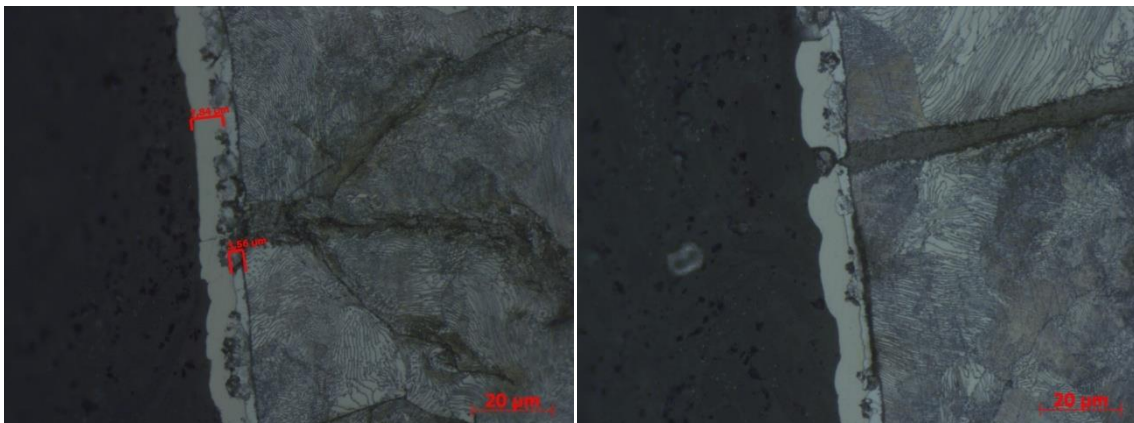


## 7.3 Experiment „železení“

Jelikož nebyly k dispozici bližší údaje k nastavení proudu, byl nejdříve proveden experiment s napětím 5 V. Plošný obsah vzorku byl stanoven na 3000 mm<sup>2</sup>, proud byl nejdříve nastaven na 0,06 A. Doba procesu byla nejdříve 30 min. Tato doba se však ukázala jako krátká viz Obrázek 7-2.

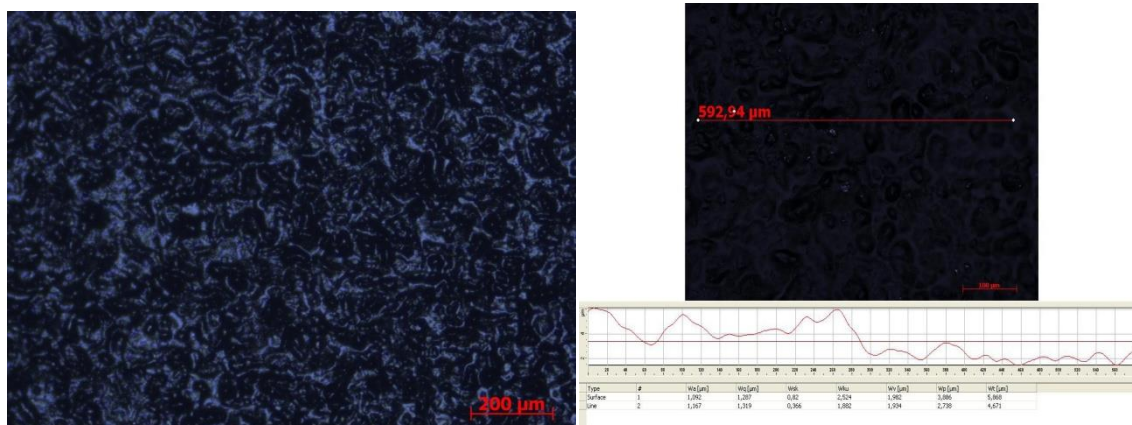


Obrázek 7-2- a) Železení 30 min 200x zvětšení, grafitové útvary jsou stále patrné b) Železení 1 h 1,5 h niklování 200x zvětšení, na povrchu jsou viditelné výstupky

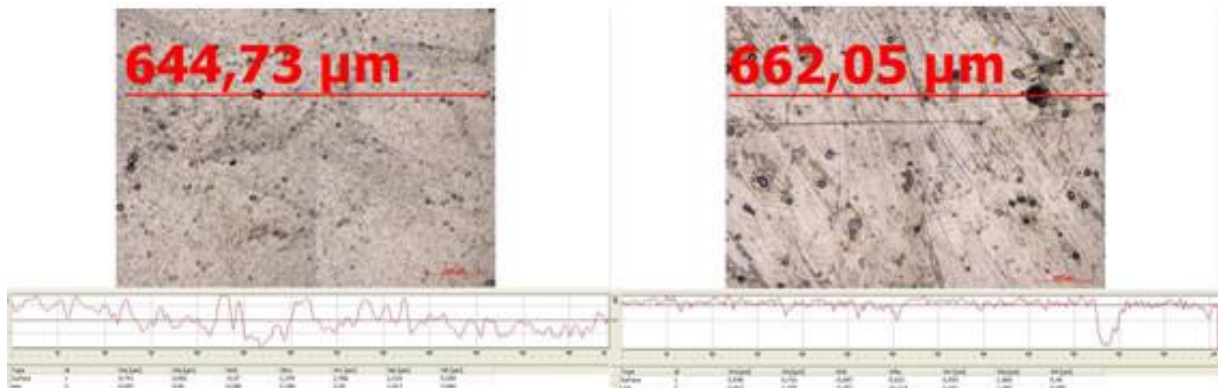


Obrázek 7-3- a) Výbrus Litina 1 h železení 1,5 h niklování 500 x zvětšení, patrné zastavení působení grafitického lupínku Fe vrstvou b) Výbrus Litina 1 h železení 1,5 h niklování 500 x zvětšení, Při nedostatečně vrstvě Fe se působení uhlíkových částic ne zcela zastaví

Ze snímku Obrázek 7-3 je patrné, že Fe vrstva do značné míry je schopná zastavit působení uhlíkových částic na povrchu litiny. Je patrné, že ne všude je toto zastavení zcela dokonalé, je však možno předpokládat, že tento vliv bude alespoň velmi oslaben. Pro kvalitní pokrytí celého povrchu litiny byl nakonec čas železení zvýšen na 2 hodiny viz Obrázek 7-4. Z následujících snímků jsou patrné výstupky na železeném povrchu. Z měření pomocí metalografického mikroskopu je patrné, že tyto výstupky jsou v řádu několika  $\mu\text{m}$ . Působení těchto výstupků bude mít zcela jistě svůj vliv. V některých speciálních případech by mohly mít tyto výstupky přínosné dopady. Zejména pokud by se jednalo o aplikace spojené s namáháním třením, kdy tyto výstupky znamenají snížení stykové plochy mezi dvěma součástmi. Vzorek byl vždy niklován tak, že jedna strana vzorku byla po železení obroušena a vyleštěna, aby došlo k obnovení neovlivněného povrchu.

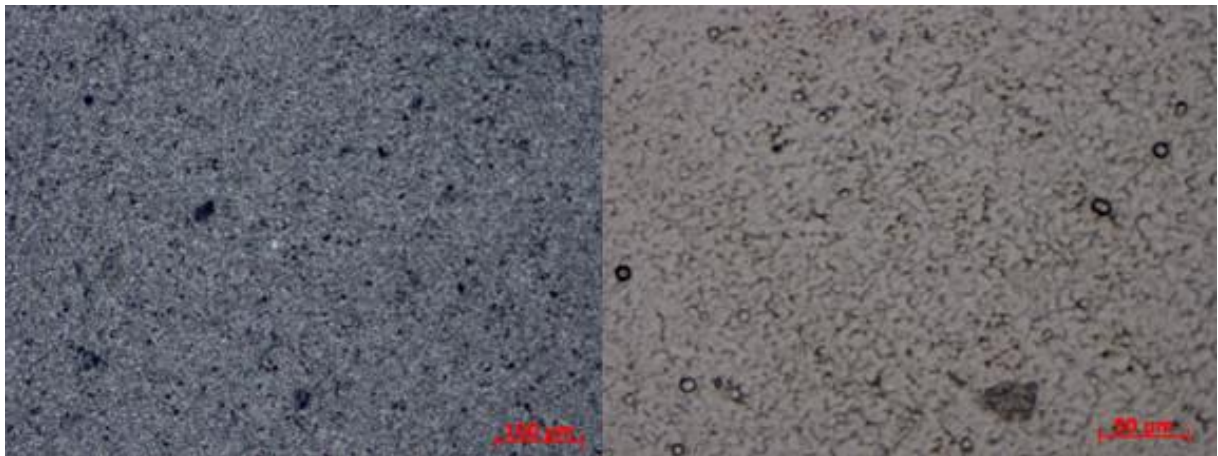


Obrázek 7-4- a) 2 h železení 200x zvětšení, velikost výstupků do 5  $\mu\text{m}$  b) 2 h železení 50x zvětšení

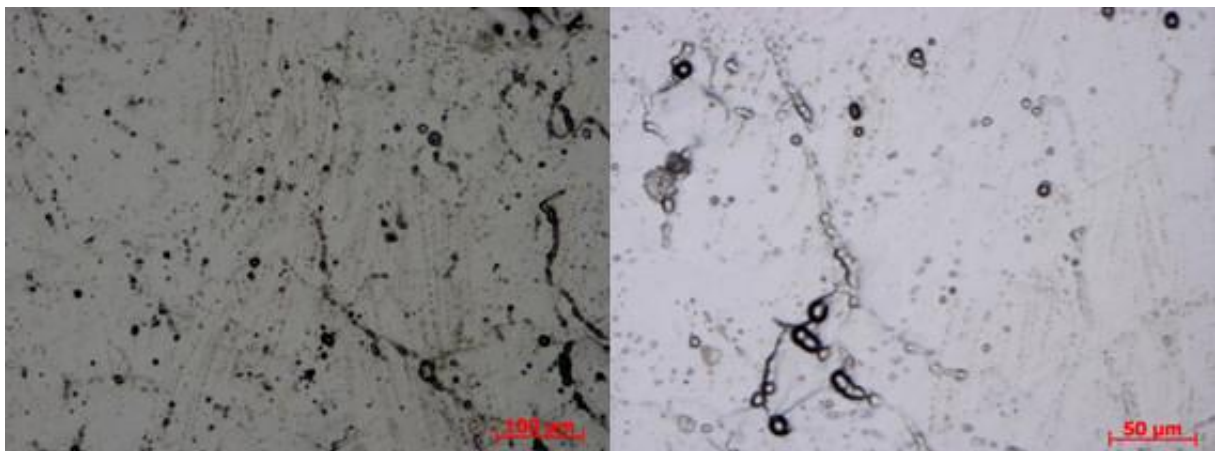


Obrázek 7-5-a) 3h železení 1,5 h niklování 200x zvětšení drsnost vyšší, ale uhlíkové částice nejsou viditelné b) pouze niklování 1,5 h 200x drsnost nižší, než při předprocesu železení, otvory zřejmě procházejí skrz celý povlak

Jelikož se na površích vzorků neustále objevují velké množství výstupků. Bylo však nezbytné zjistit, zda se jejich výskyt dá nějakým způsobem omezit. Možnou cestou by bylo zřejmě i přebroušení vzniklého povrchu pokud by byla vytvořena silnější vrstva. Bylo však zjištěno, že výstupky se vyskytují zejména na straně k elektrodě. Na straně odvrácené od elektrody je vytváření vrstvy mnohem pomalejší, avšak povrch je téměř bez těchto výstupků.



Obrázek 7-6-a) 2 h železení odvrácená strana od elektrody 100 x zvětšení b) 2 h železení 2 h niklování odvrácená strana od elektrody 200 x zvětšení



Obrázek 7-7-a) Pouze niklovaná strana vzorku 100x viditelné stopy grafitu pod vrstvou b) Pouze niklovaná strana vzorku 200x zvětšeno

Zde je patrné, že působením železení u tohoto vzorku došlo k pozitivnímu ovlivnění povrchu. Grafitické útvary na povrchu litiny jsou v tomto případě zcela překryty viz Obrázek 7-6 – 7-7. U pouze niklovaného povrchu je patrné, že k překrytí grafitických útvarů došlo, ale i přesto jsou grafitické útvary pod povlakem patrné.

#### 7.4 Kontrola korozní rychlosti

Pro hlubší zjištění bylo provedeno zhodnocení korozní rychlosti pomocí potenciostatu. Byl použit přístroj firmy Biologic typ SP150. Jako elektrolyt byl použit 3,5 % roztok NaCl v destilované vodě. Měřicí aparatura byla v tříelektrodevém zapojení, vzorek, platinová a referenční kalomelová elektroda. Měření probíhalo tak, že byl nejdříve měřen korozní potenciál po dobu 20 min, kdy je předpokládán ustálení jeho hodnoty. Poté je zapnuta polarizace od -0,025 - +0,025 V od změřeného korozního potenciálu  $E_{cor}$ . Výsledek byl vyhodnocen v programu ECLab od firmy Biologic. V následující Tabulka 7-1 jsou zobrazené získané výsledky.

Tabulka 7-1- Získané výsledky měření korozního potenciálu a korozní rychlosti

	<b>Vzorek 1 neovlivněný</b>	<b>Vzorek 2 neovlivněný</b>
Korozní potenciál $E_{cor}$ [V]	-0.728	-0.695
Korozní rychlost [mm/rok]	0.012	0.016
	<b>Vz. 1 fe 2h</b>	<b>Vz. 2 fe 2 h</b>
Korozní potenciál $E_{cor}$ [V]	-0.637	-0.616
Korozní rychlost [mm/rok]	0.029	0.02

Ze získaných výsledků je patrné, že došlo k ovlivnění korozního potenciálu směrem k příznivějším nižším hodnotám. Naopak oproti předpokladům vzrostla korozní rychlost u povrchu, který byl železen oproti povrchu litiny s volným uhlíkem. Autor si tento výsledek prozatím nedokáže vysvětlit. Zřejmě toto měření souvisí s omezením vlivu uhlíku na korozní vlastnosti. Nedochozí však podle předpokladu k žádné výrazné změně korozního potenciálu.

#### 7.5 Diskuse výsledků experimentu „železení“

Jelikož o této metody nebylo možné nalézt dostupné údaje, bylo v tomto experimentu postupováno po krocích. Je předpoklad, že tato metoda nebude zdaleka univerzální a použitelná pro všechny případy. Její využitelnost bude zřejmě v případě specializovaných úloh, jako je adheze vrstev a povlaků, které jsou negativně ovlivněny volným uhlíkem na povrchu součásti. V případě přidávání materiálu na stěnu bude tento proces soupeřit s technologiemi jako mikronavařování apod. Zde bude pro tento postup kladné, že není ovlivněn uhlíkovým ekvivalentem. V případě elektrolytického tvrdého chromování je nutné používat sloučeniny Cr s oxidačním číslem VI, které jsou všechny označovány jako látky T+, tedy vysoce toxické a navíc karcinogeny, které vyžadují speciální povolení k zacházení. V případě představené povrchové úpravy jsou používány sloučeniny netoxické, navíc snadno dostupné.



## 8 Hlavní řešený experiment

Hlavním řešeným problémem bylo vyhodnotit parametry integrity povrchu otvorů vyrobených nekonvenčními vrtacími nástroji. Hlavním problémem při řešení technologie vrtání je zejména nedostatečná produktivita práce, kterou již z charakteru obráběcího procesu není jednoduché příliš zlepšit. Další problém je nepříliš vysoká přesnost vytvořených otvorů. Pro vytvoření vysoce přesného otvoru je nutno použít vrtací nástroj o menším průměru, než je požadovaný a posléze použít výhrubník a výstružník. Toto výrazně snižuje produktivitu práce. Možným řešením je modifikace běžných vrtacích nástrojů, který by všechny tyto nástroje integroval. Výsledkem byl nástroj, který je opatřen tvářecím elementem, který provede kalibraci otvoru na přesnost až IT6 a protváří povrchové vrstvy za účelem zvýšení životnosti.

### 8.1 Použité rezné podmínky pro obrábění

Pro vrtání bylo použito vertikální obráběcí centrum MCV 750 A na pracovišti ZČU - KTO. Rezná rychlost byla  $v_c = 50$  m/min, posuv  $f_{ot} = 0,08$  mm/ot. Všechny zkoumané otvory měly průměr 12 mm.

### 8.2 Použité materiály

Zkušebním materiálem se stalo 5 níže uvedených slitin. Jedná se o průřez nejpoužívanějšími materiály v průmyslové praxi. Vyvinuté nástroje byly směřovány zejména na obrábění součástí vyrobených z těchto slitin. Není však vyloučeno použití i pro jiné kovové materiály.

- Uhlíková nelegovaná konstrukční ocel C 45 (ČSN 412 050)
- Nástrojová vysokolegovaná nástrojová ocel D 3 (ČSN 419 436)
- Šedá litina GG 20 (ČSN 422420)
- Hliníková slitina AA6082
- Superslitina na bázi Ni Inconel 718

Výběr výše uvedených materiálů měl za snahu vytvořit průřez často používaných materiálů pro časté aplikace. Tyto materiály mají z hlediska integrity povrchu specifické problémy, každý však poněkud jiného charakteru.

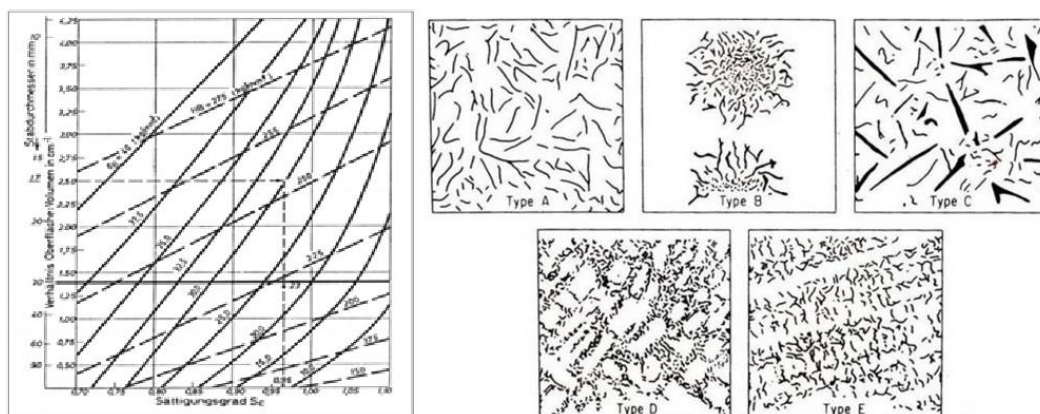
#### 8.2.1 Šedá litina GG20

Šedá litina GG 20 je jedním z nejběžněji používaných konstrukčních materiálů s nižšími nároky na mechanické vlastnosti (oproti použití oceli). Z hlediska konstrukční praxe může být použití tohoto materiálu velmi přínosné, pokud bude využito jeho specifických předností a bude konstruktér respektovat i limity této slitiny. Šedá litina je slitina Fe a C s dalšími prvky, které její vlastnosti značně ovlivňují, mezi nejdůležitější patří Si, Mn, S a P. Strukturně se jedná zejména o perlit s ostrůvky feritu a v něm jsou uloženy grafitové útvary, které jsou viditelné na výbrusu ve formě lupínků. Představa lupínkového feritu je však nesprávná, grafit je zde vyloučen především ve formě lístků, které de fakto porušují integritu perlitické matrice, jelikož hrany lístků mají velmi značný vrubový účinek, tedy snižují mechanické vlastnosti, jako mez pevnosti a nejvíce je snížena houževnatost, jelikož křehký grafit praská mnohem snadněji, než houževnatý ferit a perlit. Jedná se o materiál křehký, jeho prodloužení měřené při tahové

zkoušce se pohybuje maximálně do 1 % procenta. Tento materiál má však výborné tlumící vlastnosti při namáhání vibracemi a jeho cena je ekonomicky přijatelná. Technologické vlastnosti tohoto materiálu jsou relativně vděčné. Litina typu GG 20 se snadno odlévá, má z běžných konstrukčních materiálů vynikající zabíhavost, její výrobu zvládne i méně vybavená slévárna a v závislosti na konstrukci při menších tloušťkách stěn odlitků a dodržení předepsané odlévací teploty nemá přílišné tendence ke tvorbě staženin.

Šedá litina je využívána při konstrukci méně dynamicky namáhaných dílů. Její výhoda je vysoká míra odolnosti proti namáhání tlakem. Šedá litina je z hlediska integrity povrchu problematická díky výskytu uhlíkových částic, které výrazně porušují integritu jak základní matrice, tak integritu povrchu, na druhé straně tyto částice působí při obrábění jako mazivo a při vypadnutí uhlíkové částice dochází ke vzniku mikrorezervoáru, kde je shromažďován olej, nebo jiný použitý lubrikant.

Z hlediska nastavení podmínek na obrábění je u tohoto materiálu zásadní problém, že se jedná o materiál vysoce heterogenní a jeho vlastnosti se mohou i na jednom kusu výrobku výrazně měnit. Například součást s vytvořenou tlustší a tenčí částí, pokud se tomuto nebude možno vyhnout, tyto dvě budou mít pravděpodobně zcela jiné vlastnosti viz. V tenčí části dojde pravděpodobně k vyššímu přechlazení a tím k silnějšímu sklonu tuhnout podle metastabilního diagramu Fe-Fe<sub>3</sub>C a tím vyšší pevnosti, tvrdosti a nižší houževnatosti, naopak v tlustší části bude matrice měkčí, jak je patrné z Collaudova diagramu Obrázek 8-1.



Obrázek 8-1 – a) Diagram závislosti mechanických vlastností odlitku na tloušťce stěny u šedé litiny [40] b) různé tvary grafitu v šedých litinách s lupínkovým grafitem [40]

Díky svým mechanickým vlastnostem nelze polotovar před výrobou protvářet a je tedy zde zachována lící struktura a tím je materiál značně anizotropní. Vlastnosti se mohou měnit podle značně širokého spektra, jelikož chemické složení není přesně určeno, ale řídí se tzv: stupněm eutektičnosti  $Sc$ , který znázorňuje vzdálenost skutečného bodu likvidu taveniny od bodu eutektického tuhnutí.

$$Sc = \frac{\%C}{4,23 - 0,3 (\%Si + \%P)} \quad (28)$$

Šedá litina GG 20 (ČSN 422420) použitá v tomto experimentu by měla odpovídat  $Sc$  - 0,93 - 0,99, její vlastnosti se tedy mohou lišit v relativně širokém rozsahu v závislosti na metalurgickém procesu. V závislosti na chemickém složení materiálu a podmínek při tuhnutí a případném očkování taveniny je možno obdržet různé modifikace uhlíku, který může mechanické vlastnosti a obráběcí charakteristiky šedé litiny výrazně ovlivnit. Lze říci, že pro

mechanické vlastnosti jsou nejlepší podmínky vyloučený grafit typu A neuspořádané pravidelné uložení grafitu, což lze zařídit chladnutím při optimálních podmínkách, pokud možno co nejjemnější grafit, což lze ovlivnit zejména metalurgickým procesem (očkovaním)

Obvyklé mechanické vlastnosti litiny GG20 jsou:

$R_m=200-250\text{Mpa}$ ,  $R_p 0,1=130-195\text{Mpa}$ ,  $A=0,3-0,8\%$ ,  $HB=60-80$

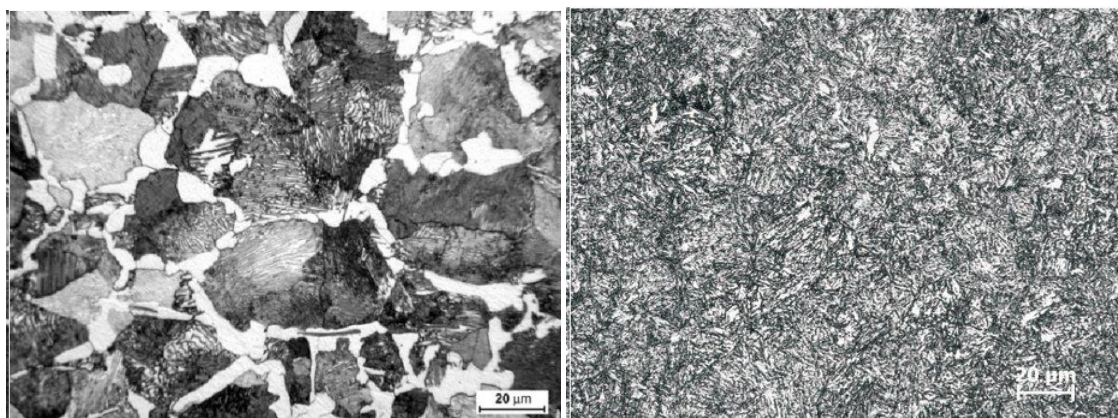
### 8.2.2 Ocel C45

Nelegovaná konstrukční uhlíková ocel C45 (ČSN 41 2050) je jednou z nejčastěji využívaných materiálů pro výrobu středně namáhaných dílů, pro které by již nestačila nelegovaná ocel běžných vlastností typu S 235 nebo S 355. Tato ocel je kalitelná viz tabulka 8-1, je vhodná též k povrchovému a laserovému kalení. Z hlediska integrity povrchu je důležité porozumět chování této oceli. Častější selhání součástí vyrobených z této oceli z důvodu špatné integrity povrchu by postihla zejména více namáhané klíčové díly konstrukcí. Tato ocel je používána jako referenční při zkouškách obrábění ostatních typů materiálů na bázi Fe. Obrobitelnost je hodnocena jako velmi dobrá. Obvyklé vlastnosti:  $R_m=650-800\text{MPa}$ ;  $R_p 0,2=400\text{MPa}$ ;  $A=20\%$ .

Tabulka 8-1- Chem složení materiálu C45 (ČSN12050)

Prvek	C	Mn	Si	Cu	P	S	Cr
[%]	0,42-0,5	0,5-0,8	0,17-0,37	<0,3	<0,03	<0,035	<0,3

Při použití tohoto materiálu při nízkých teplotách jsou zde následující parametry: nejnižší doporučená teplota použití ( $R_m = 830\text{MPa}$ ) při statickém namáhání:  $-50\text{ }^\circ\text{C}$ , při dynamickém  $-30\text{ }^\circ\text{C}$  (pro KCU 2 min = 39 J.cm<sup>-2</sup>), zde velmi záleží na výrobcu materiálu, jelikož při těchto aplikacích je rozhodující zejména nízké obsahy nežádoucích prvků S a P a nízký obsah Si, takový, který pouze zaručené přijatelné podmínky při odlévání. Struktura v základním stavu perliticko-feritická. Zakalená struktura je martenzitická, popřípadě bainitická při dodržení správného režimu TZ viz Obrázek 8-2. Po popouštění je struktura sorbitická.



Obrázek 8-2– a) struktura oceli C45 nezakalená b) struktura oceli C45 zakalená

Materiál bude z uvažovaných materiál nejlépe reagovat na deformaci protvářením při dokončování otvoru hladící částí. Reakcí materiálu na protváření se věnovalo mnoho studií, které potvrdily předpoklady že:

- Cyklické zpevnění je typické pro vyžíhané materiály.

- Cyklické změkčení je charakteristické pro materiály zpevněné následujícími postupy: deformačním zpevněním, precipitační vytvrzení, zpevnění martensitickou transformací, disperzním zpevněním dané cizími částicemi v matici. K cyklickému změkčení takto zpevněných materiál může, ale také nemusí dojít, vše závisí na stabilitě předchozího zpevnění a na zatěžovacích podmínkách. Z hlediska praktického použití materiál je cyklické změkčení nežádoucí. Zda se bude materiál cyklicky zpevňovat nebo změkčovat lze určit pomocí poměru  $R_m/Re$ . Pokud je poměr  $R_m/Re > 1,4$ , dojde k cyklickému zpevnění. Je-li poměr  $R_m/Re < 1,2$ , nedojde k cyklickému změkčení. Pro hodnoty ležící mezi 1,2 a 1,4 není chování jisté. Při obrábění tohoto materiálu zejména soustružením vznikají často povrchová zbytková pnutí mohou jak tahová tak tlaková v závislosti na parametrech procesu obrábění a vlastnostech materiálu. Materiál s vyššími hodnotami mechanických vlastností bude zřejmě vykazovat (vice tahových) zbytkových pnutí. Vliv parametrů procesu obrábění na zbytková pnutí je tedy následující: rychlost posuvu, zaoblení hrotu (*tool nose radius*) a úhel nastavení ovlivují zbytková pnutí. Hloubka úběru na druhou stranu pravděpodobně nemá vliv na zbytková pnutí. Následek zvýšení rychlosti posuvu z 0,05 na 0,25 mm/ot je nárůst zbytkových pnutí na hodnotu cca 500MPa, zatímco zvětšení zaoblení břitu nože z 0,2 na 0,8mm vede k zvýšení zbytkových pnutí na hodnotu 380MPa. Rostoucí obsah uhlíku má vliv na výrazné zpevnění během dynamické deformace uhlíkových ocelí tlakem. Tento materiál je považován při zkouškách obrobitelnosti považován za tzv. etalonový, přesto není u této oceli příliš velké množství informací z hlediska deformací a souvislostí mezi stavem povrchu a únavovými vlastnostmi. Přesto si lze celou řadu poznatků odvodit od struktury a chování ocelí s podobným chemickým složením a strukturním stavem. U tohoto materiálu budeme moci odzkoušet různé experimenty s rozsahem plastické deformace a souvislostí s dalšími projevy a vlivem na integritu povrchu. Pro experimenty bude zřejmě nejvhodnější sorbitická struktura díky své homogenosti dosažené tepelným zušlechťením.

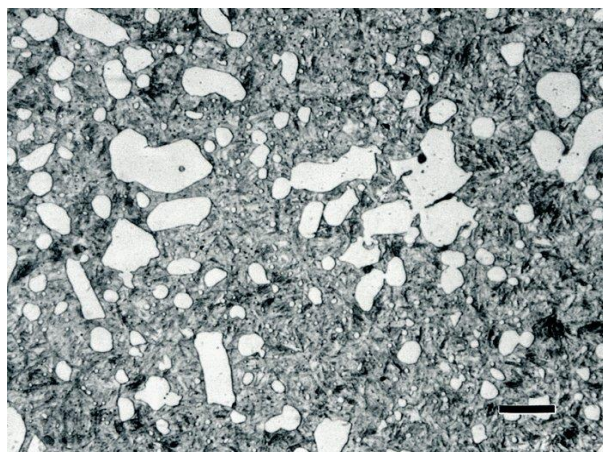
### 8.2.3 Ocel D 3

Materiál – ocel 19436 (*EN X210Cr12, DIN 1.2080, AISI D3*) Jedná se o vysoceuhlíkovou nástrojovou ocel tvářenou zastudena. Tento materiál vykazuje vysokou tvrdost, prokalitelnost a odolnost proti opotřebení. Kvalita těchto ocelí je proměnlivá v závislosti na výrobci. Díky obsahu relativně levných legur.

Tabulka 8-2- Chem složení oceli D3

Prvek	C	Cr	Mn	Ni	P	S	Si
[%]	1,8-2,5	11-12,05	0,2-0,4	<0,5	<0,03	<0,035	0,2-0,4

Tato ocel je často využíván při konstrukci forem pro tlakové lití hliníkových slitin a pro výroby z plastu. Taktéž je používána pro nástroje pro obrábění méně pevných materiálů, jako např: trafoplechy. Díky svému relativně širokému intervalu tuhnutí je využívána pro výrobu součástí tixoforingem. Z hlediska integrity povrchu je tato ocel problematická zejména díky mikrostruktuře, která vychází z filosofie její kompozice. Díky svému vysokému obsahu C a Cr je v její struktuře přítomno vysoké množství primárních karbidů viz Obrázek 8-3. Tyto tvrdé a křehké karbidy porušují integritu jak základní matrice, tak integritu povrchu a jejich destrukcí jsou vytvářena místa budoucího snadného únavového porušení. Tato ocel je prokalitelná v celém průřezu. Obrobitelnost v zakaleném stavu je poměrně obtížná z důvodu vysoké tvrdosti a abrazivním účinku karbidů. Ocel typu D3 neobsahuje Mo (V) - drahé legury. Molybden zde může objevit pouze jako nečistota z nesprávně vyříděného kovového odpadu, což se jeví jako zásadní problém posledních let při recyklaci kovových odpadů. D3 se tepelně vytvrzuje v oleji jako kalicím médiu (malé součásti mohou být austenitizovány ve vakuu a poté ochlazovány v plynu). Nástroje zhotovené z D3 jsou náchylné ke zkroucení a během kalení mohou praskat. Díky svému chemickému složení lze dosáhnout při zakalení tvrdosti v rozmezí 57 - 64HRC. Mechanické vlastnosti jsou značně ovlivněny stavem struktury, karbidy, velikost zrna a z důvodů častého karbidického vyřádkování značná anizotropie. Tato ocel je obtížně tvařitelná za tepla a má zhoršenou obrobitelnost ve stavu žíhaném naměkko. I přes vysoký obsah Cr má velmi nízkou korozní odolnost. Díky přítomnosti tvrdých karbidů má velmi značnou odolnost proti opotřebení.



Obrázek 8-3– Mikrostruktura oceli D3, leptáno 2% Nital, 1000x zvětšeno, v martenzitické matrici viditelné velké množství hrubých karbidů

Pro účely experimentu bude využívána ocel ve stavu žíhaném naměkko, jelikož se předpokládá, že ocel se v tomto stavu zpracuje na strojích a posléze teprve nechá zakalit a popustit. Zakalení se provádí z teploty 1060° C do oleje; popouštění je prováděno zpravidla 2x

dle požadované tvrdosti až na teplotu 500°C (55HRC). Tyto oceli jsou málo odolné proti adheznímu opotřebení-problémy při konečné úpravě povrchu a to při jakémkoliv způsobu. Rovněž tyto oceli mají nízkou odolnost proti tvorbě mikrotrhlinek. Tento faktor může hrát roli při dokončovací operaci je zde nutnost používat nižší tlaky nástroje na obrobek.

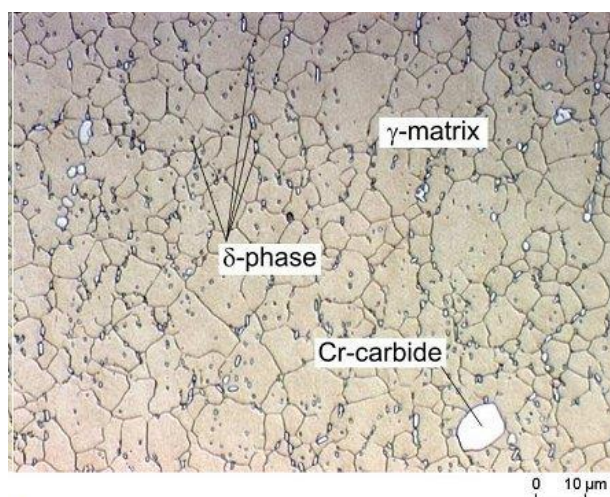
### 8.2.4 Inconel 718

Jedná se o precipitačně stárnutím vytvrditelnou superslitinu na bázi Ni. Chemické složení zobrazuje tabulka 2-1. Tato slitina je často využívána při konstrukcích součástí pracujících ve vysokých teplotách a při vysokém pracovním namáhání, jako jsou součásti spalovacích turbín letadel. Tato slitina je taktéž vysoce korozně odolná. Z tohoto materiálu lze vyrábět komplexní konstrukční díly, je dobře svařitelná bez zvýšeného rizika praskání svarů.

Tabulka 8-3– Chemické složení materiálu Inconel 718

Prvek	Ni (+Co)	Cr	Nb (+Ta)	Mo	Ti	Al	Co	C
[%]	50-55	17-21	4,7-5,5	2,8-3,3	0,65-1,15	0,2-0,8	< 1	< 0,08

Z předchozí Tabulka 8-3 je patrné, že pro výrobu této slitiny je třeba vyřešit velmi komplexní metalurgický proces. Dále že je třeba využít velké množství drahých legur (Ni, Mo, Nb, Ti), slévateľnost této slitiny je však přijatelná. Z hlediska integrity povrchu je tento materiál problematický zejména z důvodu jeho velmi špatné tepelné vodivosti a tendenci k značnému zpevnování při řezu. To se odráží v jeho velmi obtížné obrobiteľnosti.  $R_m = 960 - 1250 \text{ MPa}$ ;  $R_{p0,2} = 550-720 \text{ MPa}$ ;  $A = 30\%$ ;  $HRC = 36$  ( $HB=370$ ). Dalším problémem je při obrábění vytváření povrchové zdegradované vrstvy při nevhodně nastavených obráběcích podmínkách.



Obrázek 8-4– Mikrostruktura slitiny Inconel 718 [50]

Mikrostruktura Inconelu 718 zahrnuje austenitickou plošně středěnou FCC matici (nazývanou  $\gamma$ ), ve které jsou rozpuštěny další sekundární, viz Obrázek 8-4. Podstatou zpevnění je precipitace fáze  $\gamma''$ . Tato fáze vytváří lamely, které jsou koherentní s FCC maticí. Intermetalická fáze  $\gamma''$  ( $\text{Ni}_3\text{Nb}$ ) má tetragonální strukturu (BCT). Fáze  $\gamma$  je vytvořena procesem precipitačního vytvrzování. Tento proces zahrnuje rozpouštěcí žhání při teplotě 970 – 1175°C, po kterém následuje jedno, nebo více precipitačních ohřevů při teplotách 600 – 815°C.

Výsledkem je vznik mikrostruktury ve formě velkých zrn obsahujících precipitační fáze  $Ni_3Nb$  a dále četný výskyt karbidů po hranicích zrn. [50]

### 8.2.5 Al slitina AA 6082

Tvářený materiál AA 6082 též (AlSiMgMn, ČSN 42 4400, DIN 3.2315) :

Tabulka 8-4- Předepsané chemické složení materiálu AA6082

Prvek	Mn	Si	Mg	Ti	Zn	Cu	Fe
[%]	0,4-1	0,7-1,3	0,6-1,2	<0,1	<0,2	<0,1	<0,5

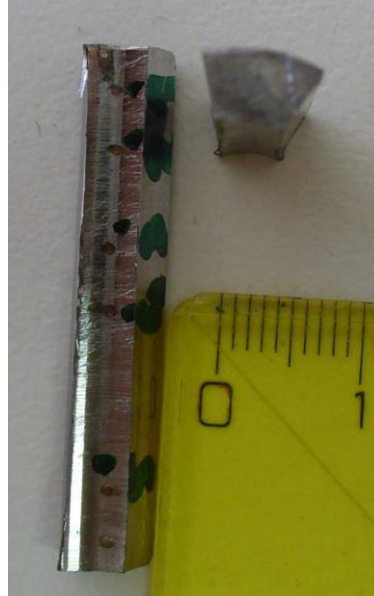
Materiál vykazuje velmi dobrou tvařitelnost při teplotách 450-500°C, leštitelnost a vykazuje vysokou míru odolnosti proti korozi, lze svařovat i eloxovat. Materiál vykazuje značnou houževnatost. Lze vytvrzovat stárnutím (T6). V nevytvrzeném stavu velmi špatná obrobiteľnosť reznými nástroji tj. "maže se", po vytvrzení dobrá opracovatelnost. Lze použít pro součásti pracující při středním zatížení a při provozních teplotách 50 až -70°C, lze využít i v potravinářství a leteckém průmyslu. Typické výrobky jsou kabiny letadel, vozidla, rámy dveří, nýtované mosty, stožáry. Struktura je závislá na chemickém složení, nečistoty způsobí tvorbu nežádoucích fází, dále důležité zpracování po odlití, bez rozpouštěcího žíhání - intermetalické fáze vyloučené po hranicích zrn - snížení mechanických vlastností. Pro dosažení lepších je třeba provést rozpouštěcí žíhání (teplota 500-570°C) s cílem dosáhnout jemných semikoherentních disperzních precipitátů uvnitř zrn. Při aplikaci deformace lze získat pevnost o ca 40 MPa vyšší (170 MPa) a mez kluzu z 60 až na 70 MPa. Při obrábění tvoří nárůstek na nástroji a tříška je špatně lámavá.

Obrobiteľnosť Al – slitin obecně zlepšuje přidavek prvků Cu, Mg, Mn, Zn, Ni, Cr, a výrazně ji zhoršuje Si od 5% z důvodu tvorby eutektika (tvrdých krystalů Si) s velmi nepříznivým abrazivním účinkem na nástroje. Z hlediska mikrostruktury zlepšují obrobiteľnosť Al slitin prvky, které tvoří s Al tuhý roztok jen do určitého obsahu a dále pak vytvářejí měkké a křehké sloučeniny, případně eutektikum, jako je např. Pb. Při obrábění těchto slitin bude na břitech nástrojů vždy probíhat adhezní opotřebení vlivem mikronavařování částeczek obráběného materiálu na břitu a s tím spojená tvorba nárůstku. Z tohoto důvodu je dobré volit pozitivní geometrii břitu. Dalším znakem obrábění – zvláště při vrtání jsou dlouhé třísky. Tento jev lze zmírnit zejména vhodně zvolenou reznou geometrií břitu (makro i mikro), optimální volbou rezné rychlosti a posuvu a použitím správné procesní kapaliny. V oblasti mikrogeometrie použít dokončování ostří technologií omílání a to již na hotovém nástroji nebo i s VBD. Pro dosažení optimálních obráběcích podmínek je podstatný rovnoměrný odchod třísek a s tím související minimální tření mezi nástrojem a třískami v zubové mezeře, což souvisí i s technologií výroby budoucího nástroje.

### 8.3 Použité vzorky

Obsahem této práce bylo prozkoumat materiálové charakteristiky povrchu po obrábění. Vzorky pro vrtání byly dodány ve formě válečků o průměru 20 mm a délce 35 mm. Po příslušném nařezání byly vzorky na pracovišti KTO provrtány vyvinutými vrtáky o průměru 12 mm. Tyto zkoumané vzorky byly po obrobení prstencovitě podélně rozříznuty, viz Obrázek 8-5. Pro každou metodu zkoumání, viz dále, byl použit zvláště k tomuto účelu označený vzorek. Pro porovnání byly použity 3 různé nástroje. Hlavním porovnávacím nástrojem byl od firmy

Hoffmeister, který byl v rámci projektu zkonstruován. Jako referenční byly použity nástroje R a O podobné koncepce, tedy vrtací nástroj vyrobený ze slinutých karbidů s kalibrovací částí, která. U konkurenčních se jedná se o nástroje od renomovaných firem, v práci budou označeny jako nástroje R a O.



Obrázek 8-5– Ukázka použitých vzorků

Pro prozkoumání rozdílů mezi jednotlivými typy nástrojů byly použity tyto metody:

- zkoumání povrchových morfologií
- zkoumání metalografické struktury v podpovrchových vrstvách
- zkoumání rázové odolnosti povrchu (impact test)
- měření podpovrchové mikrotvrdosti

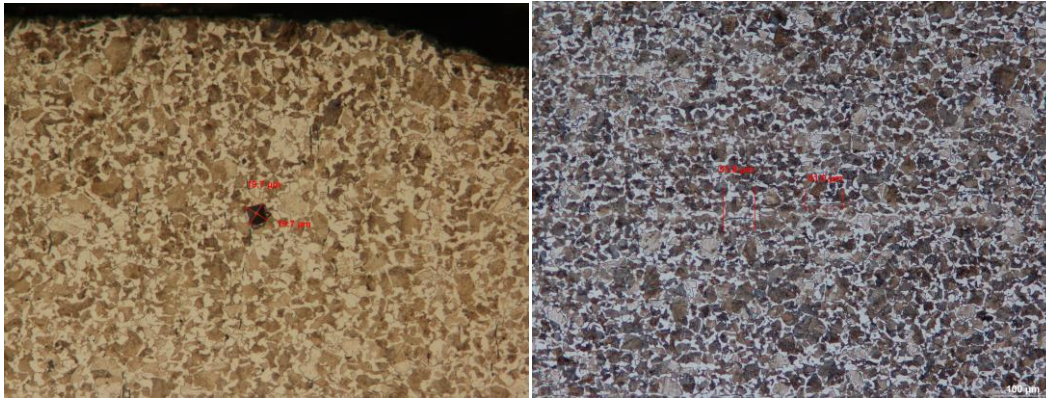
V průběhu testu bylo vyvrtáno 1000 otvorů. Avšak takové množství nebylo z kapacitních důvodů vyhodnoceno. V případě vyhodnocení povrchových morfologií a metalografických struktur byl použit vzorek z prvního otvoru. V ostatních testech byl použit vzorek z vrtání č. 1 a 1000. Důvod, proč byly vybrány 2 vzorky je ten, že v případě nástroje dochází k abrazivnímu opotřebení a tedy ke změně jeho geometrie - tím dochází i ke změně geometrie vytvořeného otvoru.

#### 8.4 Materiál C45 (ČSN 412050)

Materiál byl použit ve stavu normalizačně žíhaném. Díky tomuto způsobu tepelného zpracování lze obdržet rovnoměrnou strukturu se stejnoměrnými mechanickými vlastnostmi. Tato struktura vykazuje zpravidla horší obrobiteľnosť z dôvodu tvorby lamelárního perlitu oproti globulárnímu. Při žíhání naměkko je obrobiteľnosť také poněkud problematická, jelikož se materiál maže a tvoří nárůstky na nástrojích. Zakalený stav by nebyl vhodný, jelikož by nedošlo při vrtání k patřičnému protváření. Nejdříve byla provedena metalografická kontrola oduhličení povrchových vrstev, velikost feritického zrna a vyhodnocení vměstků viz. Obrázek



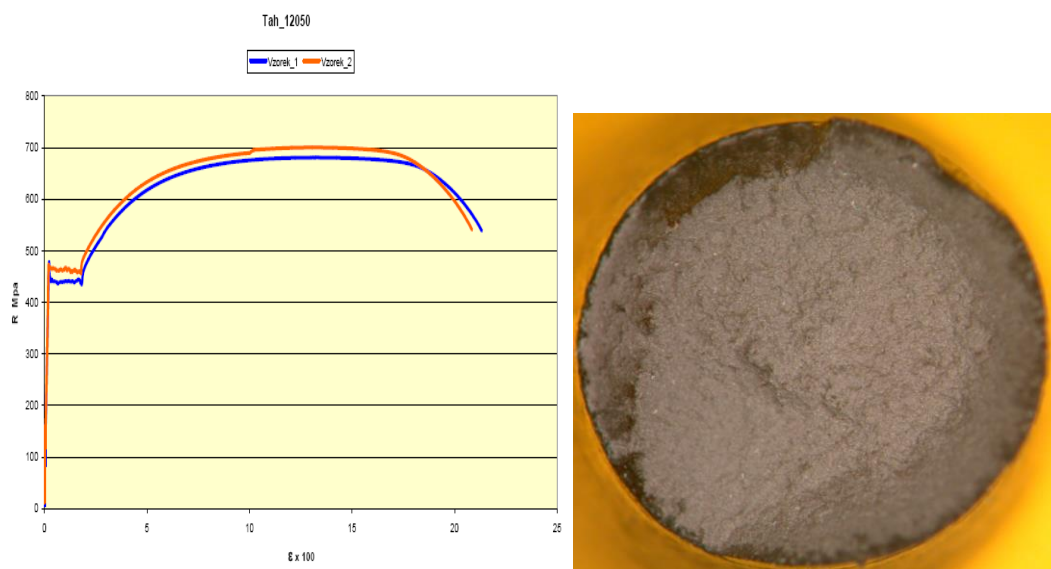
8-6. Vyhodnocení velikosti zrna bylo provedeno dle ASTM E 112-96E2, pomocí softwaru Lucie. Výsledná velikost stanovena podle této normy 11. Důležitým požadavkem je kontrola velikosti vměstků, zejména sulfidických, které mohou zapříčinit zrychlené šíření případných trhlin. Změřená délka nejdelších vměstků je 61  $\mu\text{m}$ . Tato hodnota není limitující pro použití této oceli. Tvrdost Brinell HB =  $180 \pm 2,5$ , což odpovídá normě.



Obrázek 8-6– a) kontrola oduhličení, změřeno prakticky zanedbatelné b) kontrola velikosti sulfidických vměstků, max 61  $\mu\text{m}$

#### 8.4.1 Statická zkouška tahem

Zkouška tahem byla prováděna podle normy EN 10002-1. Rozměry zkušebních vzorků byly  $D_0=10\text{mm}$ ,  $L_0=100\text{mm}$ . Tato ocel má ve stavu normalizačně žíhaném relativně vysokou tažnost, nízkou pevnost. Pomocí vhodné dokončovací operace bude zřejmě možné docílit vysoké míry zpevnění povrchu. Při deformaci bude převládat plastická deformace. Na diagramu tahové zkoušky se dle předpokladu objevila výrazná mez kluzu, která by při zkoušce tepelně zušlechtněného materiálu zřejmě zmizela viz obrázek 8-7.



Obrázek 8-7 – a) Diagram tahové zkoušky b) Lomová plocha po zkoušce tahem

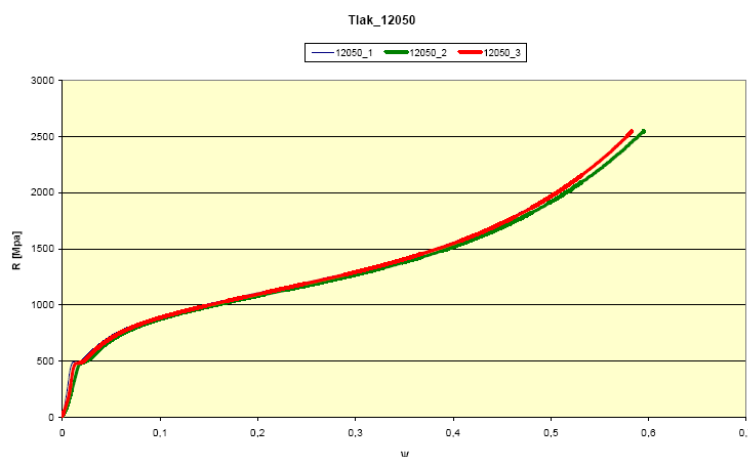
Z lomové plochy je patrný přetvárný lom houževnatého materiálu. Lom se vytvořil v osově části dutinovým mechanismem kolmo na osu tahu. Výsledky zobrazuje tabulka 8-5.

Tabulka 8-5– zkouška tahem materiálu C 45 (ČSN 412050)

Číslo vzorku	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Tažnost A <sub>10</sub> [%]
1	198485	442	681	21
2	219524	466	701	20,5
<b>Průměr</b>	<b>209 005 ± 14877</b>	<b>454 ± 17</b>	<b>691 ± 14</b>	<b>21 ± 0,35</b>

#### 8.4.2 Statická zkouška tlakem

Jedná se o material houževnatý, při této zkoušce nemůže zřejmě dojít k destrukci vzorku, pokud se zde nebude vyskytovat nějaký problém, jedná se tedy spíše o zkoušku technologickou a má za úkol zjistit, zda může docházet ke zpevnění povrchu při praktické aplikaci. Při zkoušce byla zaznamenána mez kluzu v okolí 500MPa. Při napětí 2500MPa došlo k poměrnému zkrácení 9mm. Průběh zobrazuje Obrázek 8-8.

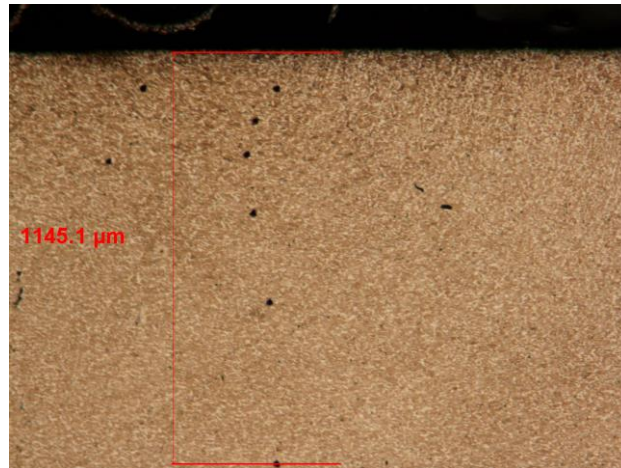


Obrázek 8-8– pracovní diagram zkoušky materiálu C45 (ČSN 412050) po zkoušce tlakem

Zkouška byla doplněna o příčný řez a kontrolu zpevnění ve zkušebním vzorku (Obrázek 8-9). Míra zpevnění byla zjištěna měřením tvrdosti HV 0,05. Měřena byla jak zpevněná tak i nezpevněná oblast a výsledky vzájemně srovnány. Důležité bylo zjištění, že hodnoty se ve zpevněné oblasti od sebe prakticky nelišily (Tabulka 8-6). Je taktéž patrná vytvořená textura a její směr viz obrázek 8-9. Na vzorku jsou zobrazeny polohy odkud byla měřena mikrotvrdość.

Tabulka 8-6- Hodnoty tvrdosti HV<sub>0,05</sub> měřené ve zpevněné a nezpevněné oblasti

Oblast	Měření 1	Měření 2	Měření 3	Měření 4	Měření 5	Měření 6	Průměr
Zpevněná	366	357	348	357	336	371	355±12
Nezpevněná	260	256	270	279	238	265	263±23



Obrázek 8-9- Ukázka zpevněné oblasti a její hloubka

Z dosažených výsledků je patrné, že rozdíl v hodnotách tvrdosti mezi zpevněnou a nezpevněnou oblastí činí ca 35%. Z uvedených měření vyplývá, že hodnota tvrdosti je významně ovlivněna plastickou deformací. Při tlakové plastické deformaci je tento vliv natolik významný a citlivý, že bude moci být toto měření využito pro zdokumentování plastické deformace po tváření povrchu vytvořeného otvoru.

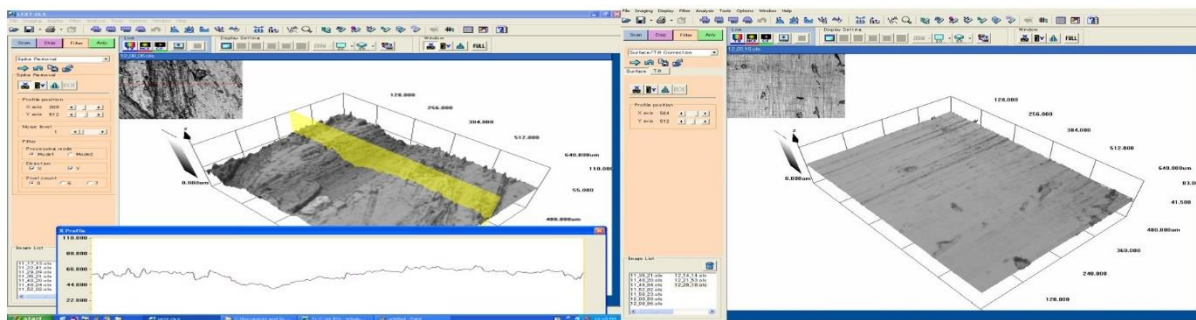
#### 8.4.3 Zhodnocení

Dodaný materiál je v požadované kvalitě dle normy ČSN 412050(C45). Ve stavu normalizačně žíhaném (perliticko-feritická struktura) může docházet k snadnému poškození povrchu (rýhy v měkkých feritických zrnech). U tohoto materiálu bude zřejmě docházet k výraznému zvýšení mechanických vlastností po konečném protváření (válečkování). Rovněž bude zřejmě docházet k výraznému snížení drsnosti již při nízkých hodnotách tlakového zatížení. U tohoto materiálu je možné docílit přesných rozměrů díky plastické deformaci vyvolané tlakovým namáháním (v porovnání s ocelí 19436). Z předchozích měření vyplynulo, že zřejmě bude možno dosáhnout zpevnění o 35%, až do hloubky 1mm. Z toho vyplývá, že i při ne zcela dokonale obrobeném povrchu jej bude možné pomocí dokončovacích operací upravit.

#### 8.4.4 Zkoumání povrchových morfologií

Pro zkoumání povrchových morfologií je velmi důležitá metoda snímání a zejména rozhodnutí, co vlastně bude v testu vyhodnocováno. V procesu zkoumání byl použit metalografický mikroskop Carl Zeiss s automatickým doostřováním v ose z, který díky motorizovanému stolku též umožňuje řízený pohyb v ose x-y. Jako další přístroj byl použit laserový konfokální mikroskop Olympus LEXT 3000. Vzorky byly usazeny na stolek mikroskopu a po celém obráběném povrchu zdokumentovány. Snímky byly poté seskládány vedle sebe v jeden soubor a tyto soubory byly vyhodnoceny.

### 8.4.5 Nástroj „R“

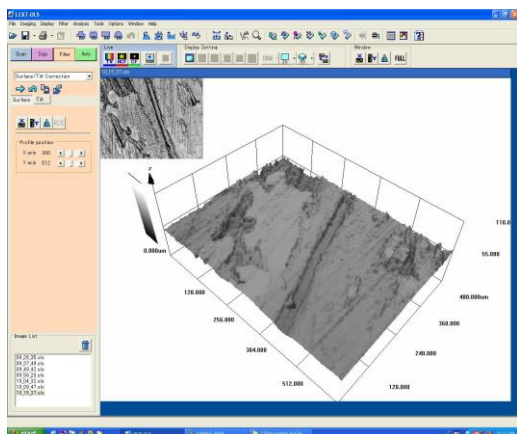


Obrázek 8-10-a) Oblast více narušená obráběná nástrojem b) Oblast více narušená obráběná nástrojem R



Obrázek 8-11- Vyhodnocení celého povrchu vzorku

### 8.4.6 Nástroj „O“

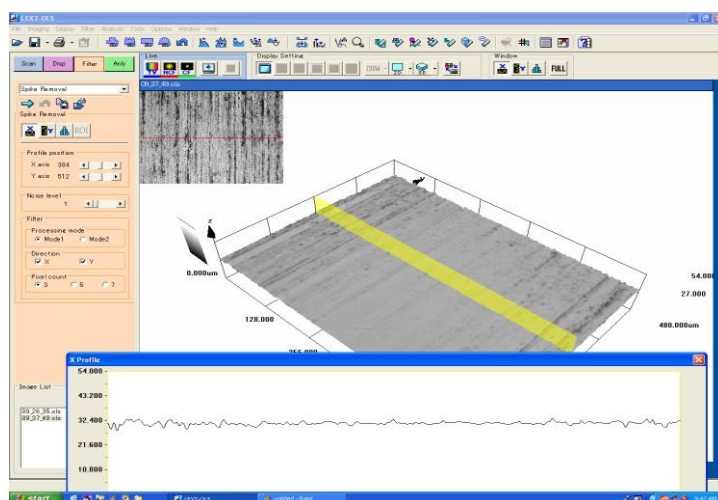


Obrázek 8-12- Povrch vrtaný nástrojem O



Obrázek 8-13- Vyhodnocení celého povrchu vzorku

### 6.1.3 Nástroj „Hoffmeister“



Obrázek 8-14 - Povrch vrtaný nástrojem „Hoffmeister“



Obrázek 8-15 - Vyhodnocení celého povrchu vzorku

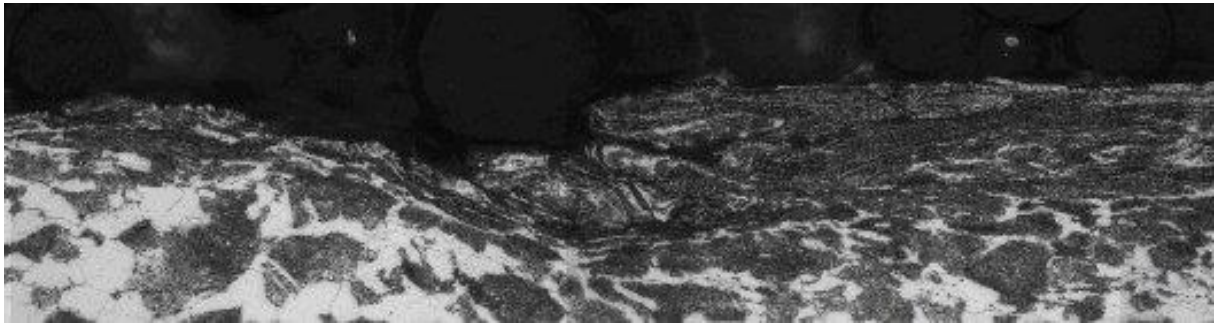
### 8.4.7 Vyhodnocení měření morfologie povrchu

Přestože se jednalo o nástroje velmi podobné koncepce a podmínky obrábění byly obdobné, mezi jednotlivými vzorky se projevily značně velké rozdíly. Z předchozího vyhodnocení vyplynulo, že nejmělkčí rýhy do vytvořeného povrchu byly vytvořeny nástrojem Hofmeister 8  $\mu\text{m}$ . Při použití nástrojů značek O a R viz obrázek 8-10 - Obrázek 8-13 byly povrchové vrstvy značně potrhány. V případě nástroje O činila hloubka vytvořených rýh až 11  $\mu\text{m}$ , u nástroje R až 15  $\mu\text{m}$ . V případě vrtání nástrojem Hoffmeister viz obrázek 8-14 a obrázek 8-15 se projevily v odlišném úhlu na směr řezné rychlosti nepravidelné rýhy, jejichž původ se doposud nepodařilo jednoznačně prokázat. Autor práce i jeho školitel se domnívají, že se jedná o stopy vytvořené hranou nástroje při výjezdu vrtáku z otvoru.

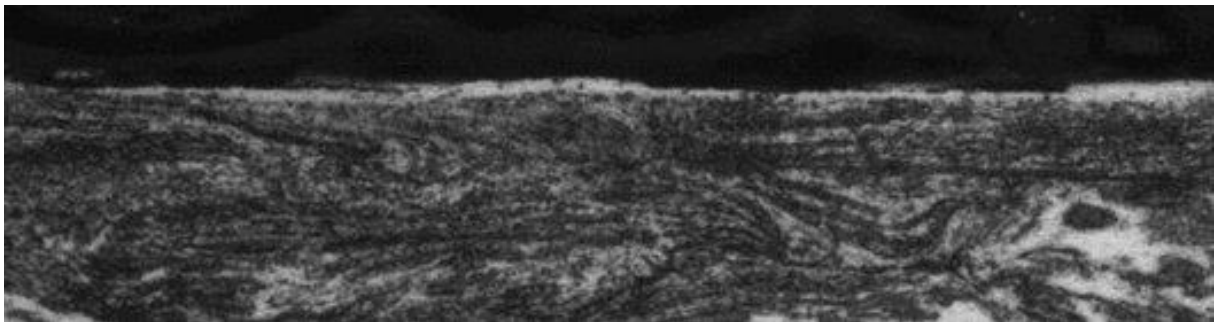
### 8.5 Vyhodnocení metalografické mikrostruktury v podpovrchových vrstvách

V případě materiálu C45 se jedná o strukturu perliticko-feritickou, kde je v případě podpovrchového protváření je značně patrná deformovaná mikrostruktura, která má za následek lokální zpevnění a nehomogenity ve struktuře, které mohou v závislosti na směru vytvořených zbytkových napětí pozitivně nebo naopak negativně ovlivnit integritu povrchu. V tomto případě byly sledovány příčné výbrusy rozříznutých vzorků, na nichž budou patrné kromě protváření též tvary povrchových morfologií a nehomogenit vzniklých při obrábění. Z jejich tvaru lze vyhodnotit zejména stabilitu řezných podmínek.

### 8.5.1 Nástroj R

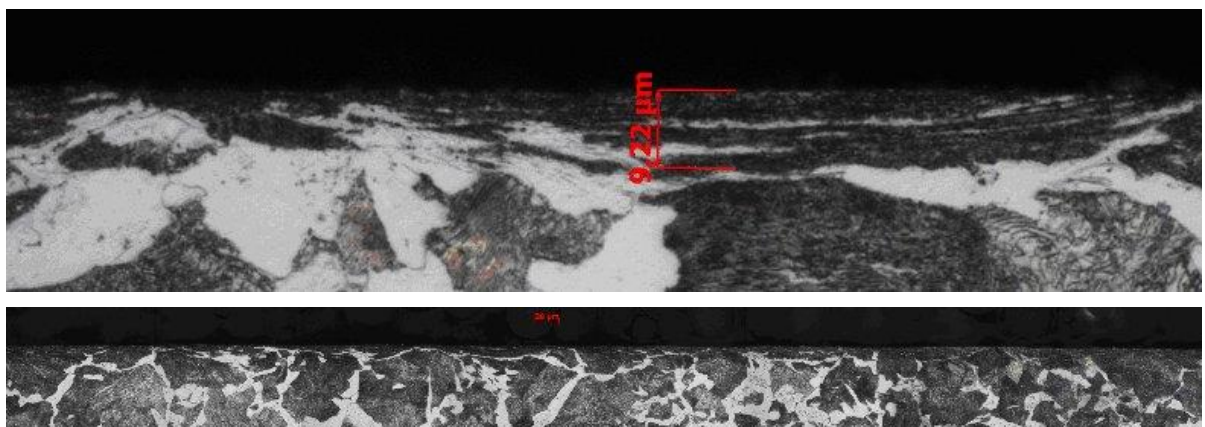


Obrázek 8-16 -Vyhodnocení mikrostruktury podpovrchových vrstev



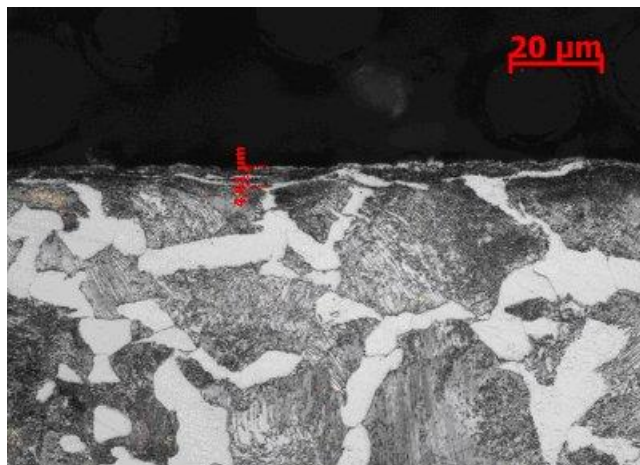
Obrázek 8-17 -Vyhodnocení mikrostruktury podpovrchových vrstev

### 8.5.2 Nástroj O



Obrázek 8-18 - a) Vyhodnocení mikrostruktury podpovrchových vrstev b) Vyhodnocení mikrostruktury podpovrchových vrstev

### 8.5.3 Nástroj Hoffmeister



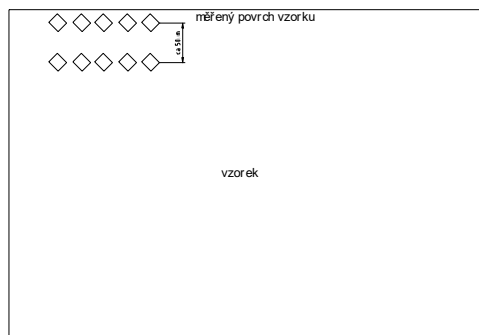
Obrázek 8-19-Vyhodnocení mikrostruktury podpovrchových vrstev

### 8.5.4 Vyhodnocení testu

V případě zkoumání mikrostruktury byly mezi jednotlivými vzorky pozorovány některé rozdíly. K největší tvorbě zpevněné vrstvičky docházelo zejména u vzorku O, viz obrázek 8-18, (cca 10  $\mu\text{m}$ ). V případě kontroly vzorku obráběného nástrojem R viz obrázek 8-16 a obrázek 8-17 bylo zjištěno potrhání vrchních vrstev, překládání odtržených vrstev a třísek přes vznikající povrch. U nástroje Hoffmeister byla vrstvička zpevněného materiálu tenčí, než v případě ostatních nástrojů.

### 8.6 Měření mikrotvrdosti podpovrchových vrstev

Jak bylo již v předchozích kapitolách uvedeno, dochází při obrábění ke značnému vývinu tepla. V bezprostřední oblasti vzniklého povrchu může dojít k tvorbě nerovnovážných struktur, jako je martenzit, popuštěný martenzit, sorbit a jejich kombinace. Toto nehomogenní pole lze charakterizovat měřením mikrotvrdosti. V oblasti povrchu materiálu je sice přesnost měření snížena, ale jedná se o jednu z mála veličin, které lze číselně kvantifikovat. Pro měření byl použit digitální mikrotvrdoměr. Zátěžná síla byla 0,15 N (15 g). Na každém vzorku probíhalo měření ve dvou oblastech a to ve zpevněné vrstvě a v neovlivněném materiálu v bezprostřední blízkosti (cca 50  $\mu\text{m}$ ). Uspořádání zobrazuje obrázek 8-20.



Obrázek 8-20- Schéma měření mikrotvrdosti

V následujícím kroku byly získané údaje zprůměrovány a byla vypočtena směrodatná odchylka. Měření mikrotvrdosti v otvoru vytvořeném nástrojem R, O a Hoffmeister.

Tabulka 8-7- Získané údaje z měření mikrotvrdosti vzorků vrtaných nástrojem R HV0,05

Ocel CSN 41 2050	Průměr vrtaný povrch	Směrodatná odchylka	Průměr jádro	Směrodatná odchylka	Rozdíl
R první váleček	357.8	85.4	267.8	43	90
R poslední váleček	596	176.4	287.6	31	308

Tabulka 8-8- Získané údaje z měření mikrotvrdosti vzorků vrtaných nástrojem O HV0,05

Ocel CSN 41 2050	Průměr povrch	Směrodatná odchylka	Průměr jádro	Směrodatná odchylka	Rozdíl
O	333.2	36.3	255.2	45.4	78
O	329.8	37	269.8	25.8	60

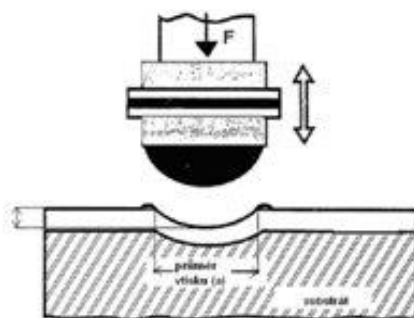
Tabulka 8-9- Získané údaje z měření mikrotvrdosti vzorků vrtaných nástrojem H HV0,05

Ocel CSN 41 2050	Průměr povrch	odchylka	Průměr jádro	odchylka	rozdíl
Hoffmeister první	301,2	29,44	268	18	33,2
Hoffmeister poslední	256,6	20,08	249,8	17,36	6,8

Naměřené hodnoty mikrotvrdosti viz tabulka 8-7 - tabulka 8-9 na jednotlivých vzorcích byly značně rozdílné mezi prvním a dalšími vzorky i přesto, že se jednalo o obrábění totožného materiálu. Nejvyrovnanější výsledky po prvním a tisícím vrtání vykázal nástroj značky O. Největší zpevnění vykazoval nástroj R, což koresponduje s předchozími výsledky vyhodnocení mikrostruktury. Tyto výsledky trpěly značnou odchylkou jednotlivých hodnot-zejména u konce vrtání lze předpovědět zhoršení parametrů vytvořených otvorů. Nejméně ovlivňoval zpevnění podpovrchových vrstev nástroj Hoffmeister. Vzorky byly posléze podrobeny syntetickým analytickým testům, které simulují určitým způsobem provozní zatížení a další degradační jevy.

## 8.7 Impact test

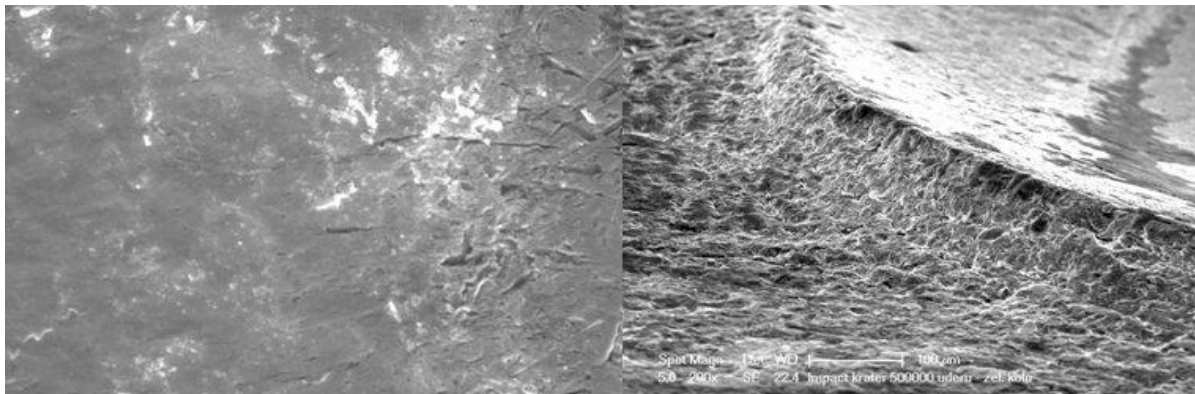
Pro testování vzorků C45 byl použit přístroj na testování impact testem, na jehož konstrukci se autor podílel a na který byl získán chráněný vzor. Jedná se o metodu testování materiálů zejména k náchylnosti na povrchovou únavu. Prvně byl tento test použit na Univerzitě v Hull ve Velké Británii. Tento test zatím není příliš rozšířen, přístrojů je prozatím v provozu velmi málo. Je založena na opakovaném cyklickém zatížení povrchů definovanou silou do jednoho místa. Umožňuje poměrně přesně simulovat reálná provozní zatížení, jako např: nástroje, nebo tvorbu pittingů na ložiskách apod. Jako indentor je použita kulička ze slinutých karbidů.



Obrázek 8-21– Impact test uspořádání [45]



Vzorek materiálu je pevně upevněn na stůl. Materiál je od začátku testu postupně tvářen a v zóně pod kráterem je postupně tvořen impaktový kráter, který je předmětem zkoumání. Při vytváření dojde nejdříve k plastické deformaci materiálu, jelikož síla úderu lokálně přesahuje mez kluzu materiálu, dochází k tvorbě impaktového kráteru, viz obrázek 8-22. Další rozšiřování se vždy na určitý počet cyklů zastaví jelikož dojde k rozložení energie rázu na větší plochu. Postupně dojde k vyčerpání plastických vlastností materiálu a k uvolnění energie např: prostřednictvím trhlin, nebo jak bude ukázáno dále na konkrétním materiálu tvorbou a oddělováním plen materiálu. Poté dojde k eliminaci zpevněné vrstvy a kráter může nadále růst. Vyhodnocení spočívá v měření průměru vzniklých impact kráterů a zjištění jaké degradační jevy se v kráteru projeví. Bližší informace o této metodě lze nalézt v odkazu [45].



Obrázek 8-22-a) Trhlina na okraji impact kráteru b) Zvedlý okraj impact kráteru

Zkoušené vzorky byly odebrány u vyvrtaných válečků tak, aby nedošlo k jejich ovlivnění následkem odběru. Pro účel tohoto testu byly odebrány segmenty o velikosti cca 1/8 výseče. Všechny elementy byly podrobeny impactovému testování - 5 000 úderů. Zvolena byla nejnižší energie, aby byla získána odezva pouze povrchových vrstev materiálu, u kterých je předpoklad, že při různém způsobu přetváření následkem obrábění popř. i vnesené plastické deformace budou rozdílné odolnosti proti rázovému zatížení. Na výsledky testu má rozhodující vliv také stav povrchu, který se liší na začátku, ve středu i u konce otvoru. Proto byly v testu odzkoušeny všechny 3 uvedené oblasti. Pro základní vyhodnocení byly provedeny v každé oblasti 2 krátery a jejich velikost byla zprůměrnována. Základním rozměrem je v tomto případě pouze podélný rozměr kráteru z důvodu geometrie styku indentoru se vzorkem. Jedná se o kontakt kulového indentoru s válcovou plochou vzorku. Vytvořený kráter je tedy elipsovitého tvaru. Příčný rozměr kráteru je v tomto případě pouze pro kontrolu elipsovitosti kráteru. Hloubka kráteru v tomto případě nebyla měřena, jelikož z důvodu geometrie styku indentoru s plochou nelze vždy zaručit plnou relevantnost výsledku.

### 8.7.1 Použité vzorky

Jak již bylo uvedeno, vzorky byly ve formě výřezů z dutého válce, jejichž vnitřní strana je zkoumanou plochou. Z důvodu složitého tvaru vzorku by bylo velmi obtížné upevnění do kleštin-bylo nutné zbrousit spodní část vzorku aby mohl být vzorek na stolek přilepen. Získané krátery byly proměřeny pomocí konfokálního mikroskopu. Výsledky byly zpracovány do následujících tabulek. Uvedené rozměry kráterů jsou v mikrometrech. Hodnota excentricity je bezrozměrná, slouží pouze pro kontrolu, zda nedošlo k nepřijatelnému vyosení indentoru od středu vzorku.

Tabulka 8-10- Získané údaje z měření impact testem u vzorku vrtaných nástrojem R při prvním najetí do řezu

R První najetí									
	začátek			střed			konec		
	I. rozměr	II. rozměr	excentricita	I. rozměr	II. rozměr	excentricita	I. rozměr	II. rozměr	excentricita
1. kráter	462	660	1,43	544	758	1,39	486	695	1,43
2. kráter	467	694	1,49	513	740	1,44	505	730	1,45
průměr	464,5			528,5			495,5		

Tabulka 8-11- Získané údaje z měření impact testem u vzorku vrtaných nástrojem R při konci řezu

R Poslední najetí									
	začátek			střed			konec		
	I. rozměr	II. rozměr	excentricita	I. rozměr	II. rozměr	excentricita	I. rozměr	II. rozměr	excentricita
1. kráter	465	593	1,28	478	708	1,48	465	656	1,41
2. kráter	507	632	1,25	483	722	1,49	459	651	1,42
průměr	486			480,5			462		

Tabulka 8-12- Získané údaje z měření impact testem u vzorku vrtaných nástrojem O při prvním najetí do řezu

O První najetí									
	začátek			střed			konec		
	I. rozměr	II. rozměr	excentricita	I. rozměr	II. rozměr	excentricita	I. rozměr	II. rozměr	excentricita
1. kráter	500	685	1,37	493	680	1,38	462	682	1,48
2. kráter	468	662	1,41	495	704	1,42	455	658	1,45
průměr	484			494			458,5		

Tabulka 8-13- Získané údaje z měření impact testem u vzorku vrtaných nástrojem O při konci řezu

O Poslední najetí									
	začátek			střed			konec		
	I. rozměr	II. rozměr	excentricita	I. rozměr	II. rozměr	excentricita	I. rozměr	II. rozměr	excentricita
1. kráter	525	732	1,39	510	660	1,29	498	698	1,4
2. kráter	491	718	1,46	521	667	1,28	473	687	1,45
průměr	508			515,5			485,5		

Tabulka 8-14- Získané údaje z měření impact testem u vzorku vrtaných nástrojem H při najetí do řezu

Hofmeister První najetí									
	začátek			střed			konec		
	I. rozměr	II. rozměr	excentricita	I. rozměr	II. rozměr	excentricita	I. rozměr	II. rozměr	excentricita
1. kráter	552	670	1,21	453	633	1,4	527	704	1,34
2. kráter	550	693	1,26	460	655	1,42	545	754	1,38
průměr	551			456,5			536		

Tabulka 8-15- Získané údaje z měření impact testem u vzorku vrtaných nástrojem H při konci řezu

Hofmeister Poslední najetí									
	začátek			střed			konec		
	I. rozměr	II. rozměr	excentricita	I. rozměr	II. rozměr	excentricita	I. rozměr	II. rozměr	excentricita
1. kráter	547	717	1,31	545	757	1,39	486	680	1,4
2. kráter	538	729	1,36	522	750	1,44	458	670	1,46
průměr	542,5			533,5			472		

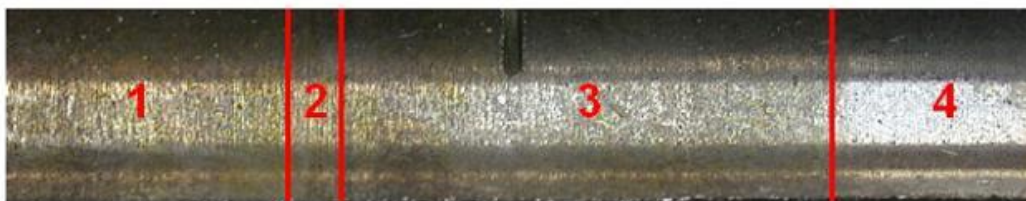
### 8.7.2 Interpretace výsledků Impact testu

U všech vzorků se hodnota excentricity držela v přijatelných mezích. Jak již bylo uvedeno, tato hodnota slouží pouze pro kontrolu, zda v při upevnění vzorku a nastavení indentoru nedošlo k nepřipustně velkému příčnému posunutí. Tyto hodnoty jsou porovnávány vzájemně mezi sebou v každé sérii a jednotlivé hodnoty by se od sebe neměly příliš lišit. Nejvíce se lišila hodnota u segmentu „najeť“ - nástroj Hofmeister 2. Avšak tato hodnota nepřesáhla 6,3 %, což je stále vyhovující. Z hlediska odolnosti proti rázovému zatížení je důležitá hodnota „1. rozměr“ kráteru, tedy podél směru vrtání. Menší hodnota je lepší, neboť menší kráter při stejném počtu úderů znamená vyšší odolnost proti průniku indentoru do povrchu. Z důvodu eliminace chyb byly v daném prostoru vytvořeny vždy 2 krátery a jejich rozměry byly zprůměrovány. Mezi jednotlivými vzorky byly zjištěny poměrně malé rozdíly. Z naměřených hodnot vyplývá, že nejlépe v tomto experimentu dopadl vzorek vrtaný nástrojem R při posledním vrtání. Dalšími elementy, které dobře dopadly, byly ty odebrané ze vzorků vrtaných nástrojem Hofmeister 2 při prvním najeť a O rovněž při prvním najeť. Rozhodující bylo, že nikde nevznikaly nežádoucí trhliny v blízkosti impact kráteru. Jejich přítomnost by prokazovala, že vrtáním iniciované procesy vedly ke snížení lomové houževnatosti na povrchu materiálu. V této části experimentu byla vyhodnocena odolnost proti rázovému zatížení povrchů. V tomto experimentu se prokázalo, že mezi jednotlivými vzorky je rozdíl v rázové odolnosti, která má zřejmě původ v rozdílném protváření podpovrchových vrstev. Žádný vzorek nevykazoval nadprůměrné hodnoty, viz tabulka 8-10 - tabulka 8-15 ani směrem nahoru či dolů, z čehož lze usoudit, že tyto nástroje jsou srovnatelné.

### 8.8 Další parametry

Vytvořené otvory se samozřejmě mění s průběhem jejich vzniku, což jasně vyazuje obrázek 8-23, zejména jelikož v průběhu vrtání nedojde ke kalibraci a protváření celého průřezu otvoru, zejména je rozdíl v protváření.

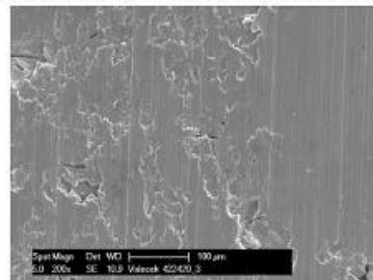
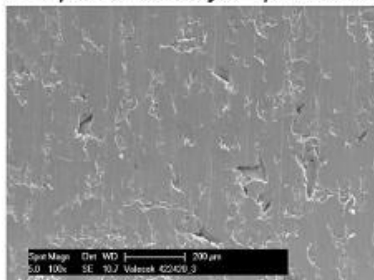
Oblast 1 – špička nástroje – pouze vrtáno; oblast 2 – přechodová oblast do tvářeného povrchu; oblast 3 tvářený povrch; 4 – zahlazený povrch.



Oblasti vzorku (oblast 4 – bez koroze)

1 - Špička nástroje – pouze vrtáno

2 - Přechod mezi oblastí vrtanou a hlazenou



Obrázek 8-23– Přechod mezi protvářenou a neprotvářenou oblastí na vyvrtaném otvoru na materiálu C45 (ČSN 412050)

## 8.9 Diskuse výsledků posuzovaných otvorů u materiálu ČSN 412050

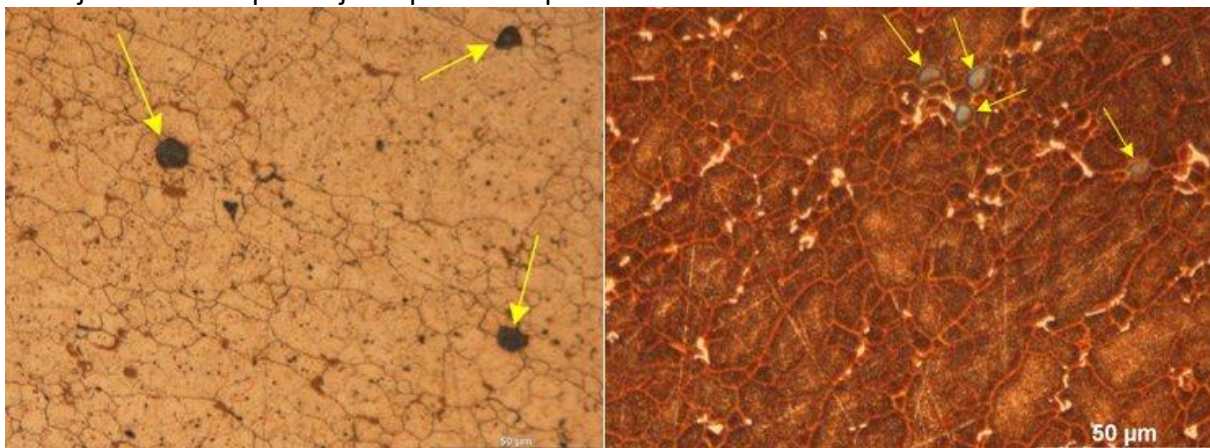
Celkové výsledky naznačují, že nejlépe v souboru testů obstál nástroj O, druhým nejlepším byl nástroj Hofmeister a třetím nástroj s pracovním označením R. Ve většině provedených testů byl zjištěn mezi jednotlivými nástroji pouze velmi malý rozdíl. Tento test tedy rozhodně nenaznačuje, že by byl produkt označený jako třetí v pořadí významně horší, ale ukázal, že pomocí testů integrity povrchu lze nalézt i drobné rozdíly, které při správné interpretaci dovolí vyhodnotit nejen stav povrchu, ale i zvolenou technologii a stav řezného nástroje.

## 8.10 Al slitina AW 8062 T6

Vlastnosti hliníkových slitin jsou ovlivňovány tepelným zpracováním, v případě požadavků na vytváření přesných děr se jedná o nezbytnost, jinak by docházelo k mazání materiálu a nebylo by možno provést vyvrtání přesného otvoru. Nejčastějším tepelným zpracováním hliníkové slitiny AA6082 je proces označovaný jako T6 – rozpouštěcí žíhání a umělé stárnutí, kterým se dosahuje precipitačního vytvrzení slitiny. Z tohoto důvodu byl v experimentální části tento druh tepelného zpracování použit. Nejdříve probíhalo rozpouštěcí žíhání při teplotě 530°C po dobu 1 hodiny, následovalo ochlazení ve vodě posléze následovalo umělé stárnutí při teplotě 180 °C po dobu 7 hodin s ochlazením na vzduchu.

### 8.10.1 Mechanické zkoušky

Jako první byla měřena tvrdost. Změřené hodnoty tvrdosti jsou uvedeny v tab.33. Hodnoty tvrdosti slitiny byla měřena pomocí Vickersova tvrdoměru při zatížení 30kg. Obě zjištěné hodnoty tvrdosti slitiny ve stavu T0 ( $103 \pm 5$ ) a T6 ( $92 \pm 1$ ) odpovídají hodnotám precipitačně vytvrzené hliníkové slitině, neboť se udává, že slitina AA6082 ve stavu T0, ve kterém měla být dodána vykazuje hodnotu tvrdosti okolo HV = 35. Z tohoto zjištění je patrné, že sledovaná slitina AA6082 ve stavu T0 neodpovídá tepelně nezpracované slitině, ale jedná se zřejmě o stav odpovídající tepelnému zpracování T6.



Obrázek 8-24– a) struktura dodaného vzorku AA6082 ve stavu T0 šipkou označeny oxidické vměstky; na hranicích zrn jsou vyloučeny intermetalické fáze typu  $\alpha\text{-Al}_{12}(\text{FeMn})_3\text{Si}$  a částice  $\beta\text{-Mg}_2\text{Si}$ . Barevně leptáno. b) Struktura hliníkové slitiny AA6082 T6; šipkami jsou označeny oxidické vměstky vyloučené na hranicích zrn; bílé částice jsou intermetalické fáze typu  $\alpha\text{-Al}_{12}(\text{FeMn})_3\text{Si}$ . Barevně leptáno

Metalografický rozbor hliníkové slitiny AA6082 byl proveden ve stavu dodaném a též po tepelném zpracování (rozpouštěcí žíhání + umělé stárnutí). Pro barevné leptání byl použit roztok  $\text{KMnO}_4 + \text{NaOH}$ . Pro vyhodnocení struktury zrna je nutno použít barevné leptání (20-35

s), zatímco pro zkoumání strukturních součástí je nejvýhodnější leptat vzorek leptadlem 0,5% HF v 50ml H<sub>2</sub>O po dobu 20s. Vzorek tepelně zpracovaný byl nejvíce vnímavý vůči barevnému leptání, naproti tomu struktura slitiny v dodaném stavu byla leptadlem jen obtížně zviditelňována. Nevýhodou barevného leptání pomocí výše zmíněného typu leptadla je skutečnost, že proces leptání nelze u tohoto typu hliníkové slitiny zastavit ani důkladným omytím. Je tedy nezbytné pro každé metalografické zkoumání vyhotovit nový metalografický výbrus. Bylo zjištěno, že struktura je v obou případech složena eutektikem tvořeného tuhým roztokem  $\alpha$  a fází  $\beta$ -Mg<sub>2</sub>Si ve tvaru destiček (obrázek 8-24). Největší podíl částic fáze  $\beta$ -Mg<sub>2</sub>Si byl zjištěn u vzorku v dodaném stavu. To je způsobeno rozpouštěním částic fáze  $\beta$ -Mg<sub>2</sub>Si během rozpouštěcího žíhání u vzorku ve stavu T6, u kterého byl proveden proces tepelného zpracování. Snižování obsahu nerozpuštěných částic fáze  $\beta$ -Mg<sub>2</sub>Si by mělo vést k maximálnímu efektu vytvrzení, což se však měřením tvrdosti ani provedenými mechanickými testy nepotvrdilo, neboť vlivem provedeného tepelného zpracování došlo ke snížení hodnot E, R<sub>p0,2</sub>, R<sub>m</sub> a A10. Struktura slitiny v dodaném stavu je poměrně hrubozrnná, přičemž velikost zrn je značně rozdílná. Po provedeném tepelném zpracování došlo k výraznému zjemnění struktury a ke zmenšení velikosti zrna (obrázek 8-24). U všech vzorků byl na hranicích zrn zjištěn výskyt oxidických vměstků na bázi Mg, Al, Si. Oxidické vměstky představují pro nástroj velké nebezpečí, neboť se budou značně podílet na utopování břitu nástroje a dále také budou negativně působit svými abrazivními účinky na povrch kalibračního členu nástroje. Množství oxidických vměstků bude hlavním limitujícím faktorem životnosti nástroje při vytváření děr do obrobku ze slitiny AA6082.

Dále byla provedena tahová zkouška Pro realizaci tahových zkoušek byly zhotoveny zkušební tyčky, jejichž tvar a rozměry byly zvoleny v souladu s normou ČSN EN 10002-1. Byla zvolena počáteční délka zkušebních tyček  $l_0 = 170$  mm a počáteční průměr tyče  $d_0 = 10$  mm. Upínání zkušebních tyček bylo řešeno pomocí závitové hlavy se závitěm M16. Všechny tepelně zpracované vzorky vykazují menší pevnostní hodnoty oproti vzorkům v dodaném stavu, které jak již bylo zmíněno, byly s největší pravděpodobností také podrobeny precipitačnímu vytvrzení. Všechny veličiny získané z tahové zkoušky byly oproti hodnotám uváděnými jinými zdroji vyšší. Největší rozdíl byl zaznamenán u hodnoty R<sub>p0,2</sub>, kde jsou námi zjištěné hodnoty vyšší o 19% u vzorku ve stavu T6 a o 33% u vzorku ve stavu T0.

Bylo zjištěno, viz Tabulka 8-16, že u všech zkoumaných vzorků ve stavu T0 i T6 je hodnota meze pevnosti jen nepatrně vyšší než hodnota meze kluzu. V důsledku toho bude materiál při obrábění snadno tvořit třísky. Nízká pevnost hliníkové slitiny je dalším příznivým aspektem z hlediska obrábění, neboť k vytvoření třísky bude oproti jiným materiálům potřeba menších řezných sil. Z charakteru křivky nad mezí kluzu je patrné, že u materiálů nedochází se zvyšujícím se zatížením k jeho výraznému zpevnění, což se potvrdilo i z výsledků získaných z tlakové zkoušky. Tzn. že u hliníkové slitiny AA6082 bude jen velmi obtížně deformačně zpevněvat. Jedním z možných důsledků je skutečnost, že vrtací částí nástroje bude nutné vytvořit otvor, jehož průměr se bude co nejvíce blížit hodnotě požadovaného průměru. Dalším deformačním členem již bude pravděpodobně jen velmi obtížné docílit požadovaného rozměru otvoru, neboť průřez otvoru nebude podél celého průřezu rozměrově stabilní. Jelikož nebude možné vytvořit deformačně zpevněnou vrstvu, bude se na přesnost otvoru v jeho celé délce velkou měrou podílet přítomná podpovrchová napětí a jejich rozložení v okolí zóny deformace. V lomových plochách nebyla zjištěna přítomnost oxidických vměstků, což naznačuje, že koheze mezi oxidickými vměstkami a maticí je v důsledku tahových pnutí narušena.

Tabulka 8-16– Výsledky tahové zkoušky

	E [MPa]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A10 [%]
AA6082 T0 vz.č.1	69 176	346	367	9,5
AA6082 T0 vz.č.2	69 997	339	362	8,8
AA6082 T0 vz.č.3	70 654	338	362	7,7
Průměr	69 942	341	363	8,6
AA6082 T6 vz.č.1	68 802	307	335	8
AA6082 T6 vz.č.2	71 134	298	327	9,6
AA6082 T6 vz.č.3	69 444	306	333	7,2
Průměr	69 793	303	331	8,3

Tlaková zkouška byla provedena u vzorků v dodaném stavu i u vzorků tepelně zpracovaných. Jelikož u slitiny AA6082 je vzhledem k její značné plasticitě nemožné docílit meze pevnosti v tlaku, bylo testování ukončeno při dosažení tlakové síly 200 kN, resp. 250 kN u vzorku č.3 ve stavu T0.

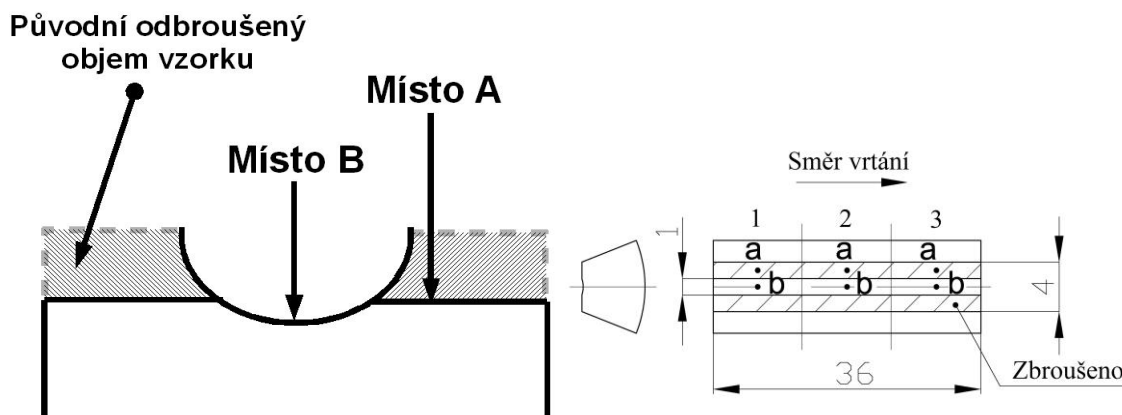
#### 8.10.2 Otvory vytvořené vrtákem R

Vybrané vzorky byly po provedených zkouškách a tepelném zpracování předány na pracoviště KTO k vyvrtání. Posléze bylo provedeno vyhodnocení s následujícími výsledky. Z metalografického pozorování příčného výbrusu povrchové a podpovrchové oblasti byl zjištěn výskyt nerekrystalizované struktury v tvářeném stavu. Charakter deformační textury nebylo možné s ohledem na její odolnost vůči leptání zjistit. Jelikož nedošlo k rekrystalizaci, lze se domnívat, že při vrtání díry nedošlo k tvorbě nadměrného tepla nutného k nastartování rekrystalizačních pochodů. Tuto skutečnost navíc potvrzuje to, že nebyly zjištěny žádné další metalografické projevy dokazující uvolňování zvýšeného tepla – tj. nedošlo k rozpouštění částic  $\beta$ -Mg<sub>2</sub>Si, k natavování intermetalických fází apod.

Vrták fy. R vykazoval nízký efekt zpevnění podpovrchové oblasti díry z hlediska hloubky zpevněné vrstvy (definováno pomocí podpovrchové mikrotvrdosti, která byla nejnižší z testovaných vrtáků). Zpevnění vyjádřené mikrotvrdostí je rovno u obou vzorků (vzorek č.70 a 34) hodnotě HV<sub>0,015</sub>=111, což je nepatrně více než je mikrotvrdost neovlivněného materiálu, která je HV<sub>30</sub>= 97. O tom, že tento typ vrtáku má jen nepatrný hloubkový zpevňující efekt dokládá dále skutečnost, že mezi mikrotvrdostí těsně pod povrchem a mikrotvrdostí ve větší vzdálenosti od povrchu je minimální rozdíl (cca o HV<sub>0,015</sub>= 6).

Dále byla u zkoumaného vzorku provedena ve dvou místech měření povrchové nanotvrdosti. Místa, ve kterých byla měřena nanotvrdost uvádí obrázek 8-25. Na konci díry (oblast 3) byla při tomto měření zjištěna nižší povrchová nanotvrdost v oblasti díry (místo měření b) oproti povrchové nanotvrdosti podpovrchové oblasti (místo měření a), což je

určitým důkazem o heterogenitě deformačně zpevněné vrstvy. Ostatní hodnoty nanotvrdosti korespondují s hodnotami mikrotvrdosti v příčném řezu.



Obrázek 8-25- Místa měření povrchové nanotvrdosti.

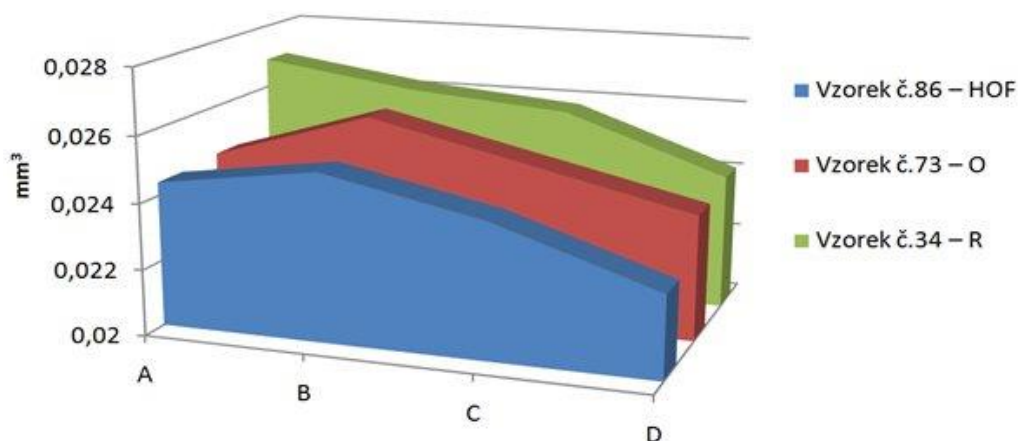
Dalším experimentem, který byl na povrchu díry proveden byl tzv. Scratch test, jehož úkolem bylo zjistit kohezivně-adhezivní vlastnosti vzniklého povrchu díry, tj. zjistit užité vlastnosti deformačně zpevněného povrchu. Pro účely tohoto experimentu byly válečky rozřezány na jednotlivé segmenty. Na každém segmentu byly provedeny dva vrypy o délce 18 mm konstantním zatížením 30N. V tab. 8-18 jsou uvedeny objemy materiálu odebraného v důsledku tvorby vrypu v jednotlivých segmentech. Systém popisu jednotlivých segmentů zobrazuje obrázek 8-25. Měření objemu bylo provedeno pomocí konfokálního laserového mikroskopu Olympus Lext 3100 při zvětšení 200x. Výsledky z měření jsou plně v souladu s výsledky měření mikrotvrdosti. Z naměřených hodnot objemu stopy vrypu vyplývá, že vrták fy. R nevyvolal významné zpevnění materiálu, neboť u tohoto vzorku byl zjištěn nejvyšší úběr materiálu. Je však nutné zdůraznit, že naměřené hodnoty jsou ovlivněné tím, že na mnoha místech díry je povrchová zpevněná vrstva vytržena z povrchu a proto vryp nezasahuje přímo do obrobeného povrchu, ale do podpovrchové vrstvy, která již zpevněná není. U otvoru vyrobeného sdrúženým vrtacím nástrojem fy.R byla zjištěna zvýšená náchylnost na vytrhávání (delaminaci) zpevněné povrchové vrstvy (viz obrázek 8-28). Delaminace je zvýšená především u posledního vzorku a to v oblastech díry A,B,C (ve smyslu značení viz obrázek 8-25). Delaminace se jen v malé míře vyskytuje u válečku prvního najetí a dále v oblasti díry D. Z měření povrchové nanotvrdosti je patrné, že úseky A,B,C, tedy úseky kde se delaminace vyskytuje, vykazují vyšší hodnoty podílu elastické práce indentoru oproti místu D, kde je podíl elastické práce ( $a$  nanotvrdost HIT) významně nižší než v oblasti podpovrchové. Je možné, že tato skutečnost působí příznivě proti delaminaci zpevněné vrstvy. Pokud vykazuje podpovrchová vrstva vyšší elastické deformační chování než svrchní zpevněná vrstva, je možné, že podpovrchová vrstva může příznivě kompenzovat veškeré deformační pnutí působící na svrchní vrstvu a tím zamezit její delaminaci. Tímto mechanismem by bylo možné vysvětlit nízké hodnoty nanotvrdosti HIT naměřené v oblasti D díry, neboť indentor působí na tento systém podobnými účinky jako vrták. Pro povrch děr vytvořených sdrúženým vrtacím nástrojem je dále charakteristický mírně zvýšený výskyt „nalepených“ úlomků třísek (viz obrázek 8-29 b). Výška takto vzniklých výstupků je okolo  $30\mu\text{m}$ , což koresponduje s tloušťkou třísky.

Tabulka 8-17- Naměřené hodnoty objemu materiálu ve stopách vytvořených scratch testem.

	A	B	C	D	Aritmetický průměr
Vzorek č.86 – H [mm <sup>3</sup> ]	0,0244	0,0251	0,0241	0,0225	0,02403± 0,00055
Vzorek č.73 – O [mm <sup>3</sup> ]	0,0245	0,0260	0,0249	0,0238	0,02480± 0,00046
Vzorek č.34 – R [mm <sup>3</sup> ]	0,0269	0,0262	0,0258	0,0241	0,02575± 0,00060

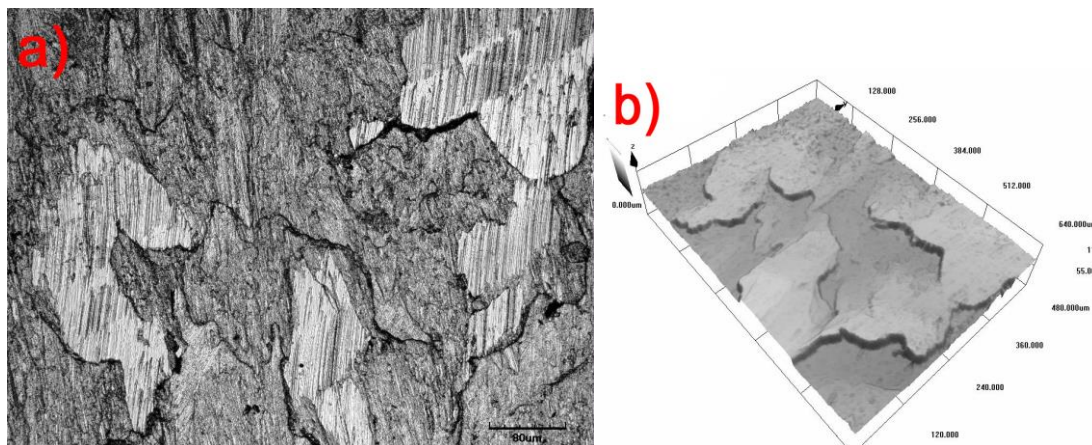


Obrázek 8-26- Značení a rozdělení jednotlivých segmentů.

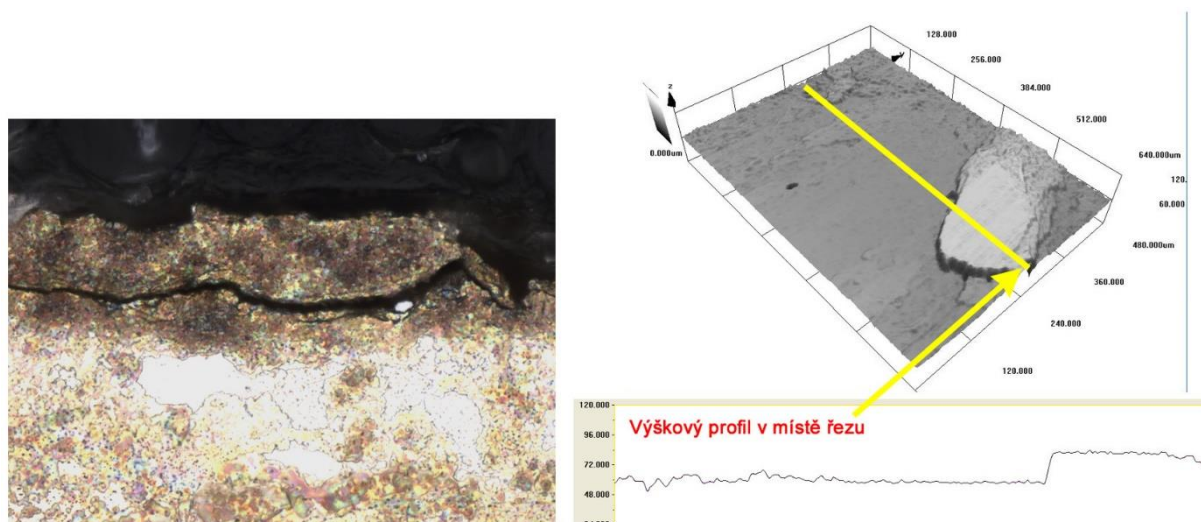


Obrázek 8-27 - Objem vrypu v oblastech vzorku A, B, C, D.





Obrázek 8-28 - Povrch díry vytvořené sdruženým vrtacím nástrojem fy. R (váleček č.70) a) Morfologie povrchu s vytrhanými částmi povrchové vrstvy, b) 3D rekonstrukce povrchu oblasti z a).

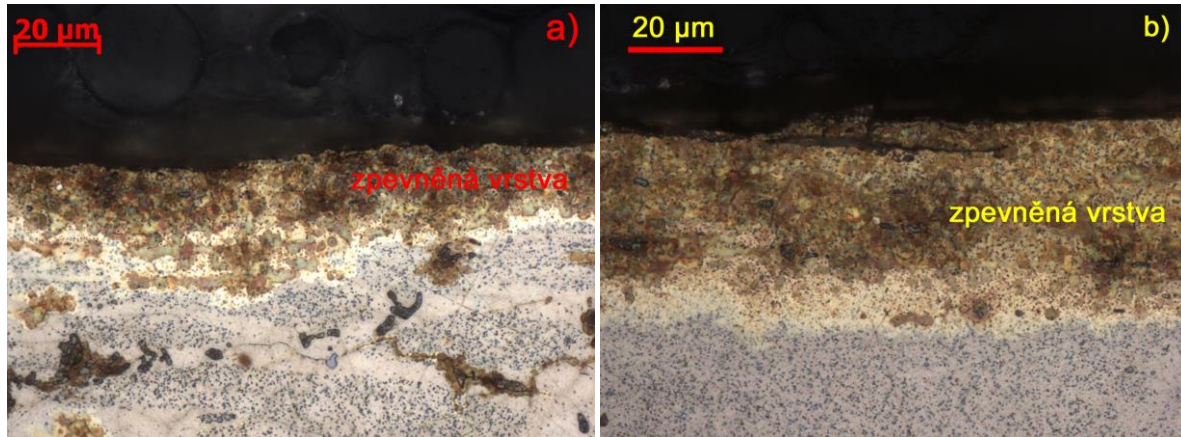


Obrázek 8-29-a) Delaminace podpovrchové zpevněné vrstvy u díry vytvořené vrtákem fy.R (vzorek č.34) v příčném řezu. b) Výškový profil „nalepené“ třísky v díře vytvořené sdruženým vrtacím nástrojem fy.R.

### 8.10.3 Otvory vytvořené nástrojem O

Tento typ vrtáku vykazoval značný deformačně zpevňující účinek – tuto skutečnost potvrzují mj. metalografická pozorování. Je patrná zóna zpevnění materiálu zasahující do hloubky cca 20–40  $\mu\text{m}$  pod povrch díry (viz. obrázek 8-30). Zóna zpevnění materiálu je na tomto obrázku patrná jako oblast s jinou schopností leptání. Nebyly zjištěny žádné projevy nadměrného vývinu tepla, z čehož vyplývá, že řezivost vrtáku byla optimální po celou dobu jeho použití. Jak vyplývá z měření nanotvrdosti a mikrotvrdosti, má vrták fy. O na povrch díry výrazný zpevňující efekt. Také hloubka zpevnění je oproti ostatním nástrojům nejvyšší. Vysoké zpevnění povrchu díry dokládá i vysoký podíl elastické práce indentoru u vzorku č.73. Z této vysoké hodnoty vyplývá, že zpevněná vrstva by mohla být náchylná na křehké porušení, což se však ze scratch testu a ani z pozorování povrchové morfologie díry nepotvrdilo (tj. nebylo detekováno žádné křehké poškození povrchu zpevněné vrstvy). U vzorků byl zjištěn značný gradient tvrdosti v závislosti na hloubce pod povrchem. Nebylo zjištěno, že by tento vysoký gradient měl na případnou náchylnost zpevněné vrstvy k delaminaci jakýkoliv vliv. Odolnost povrchu vůči opotřebení měřené pomocí scratch testu nepotvrdilo výrazné zvýšení odolnosti zpevněné povrchové vrstvy, které by bylo možné očekávat v důsledku její vysoké povrchové

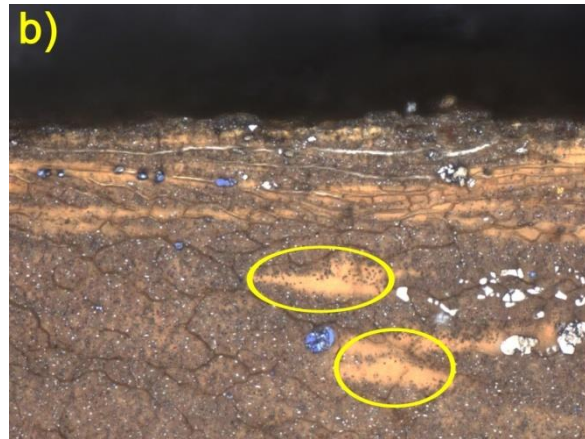
tvrdosti. Jak již bylo popsáno v předchozí kapitole, je použitý způsob posuzování odolnosti povrchové vrstvy pomocí scratch testu, s ohledem na charakter morfologie povrchu a malé tloušťky zpevněné vrstvy, značně nepřesný.



Obrázek 8-30 - Metalografie příčného řezu podpovrchové oblasti otvoru vytvořeného vrtákem O dokládající přítomnost zpevněné vrstvy: a) váleček č.73, b) váleček č.72.

#### 8.10.4 Otvory vytvořené sdruženým vrtacím nástrojem Hoffmeister

Tento sdružený vrtací nástroj měl průměrnou schopnost vytvořit zpevněný povrch díry, avšak povrchová nanotvrdost této díry byla mírně nižší než u vrtáku R. Značným negativním důsledkem vrtáním tímto typem nástroje je to, že v určité hloubce pod povrchem díry dochází k odpeňování materiálu. Odpeňování materiálu je zapříčiněno tím, že při vrtání tímto nástrojem dochází ke značné tvorbě tepla, které má za následek teplotní degradaci hliníkové slitiny. Metalografické aspekty dokládající intenzivní teplotní účinek vrtání na vnitřní strukturu materiálu jsou uvedeny na Obrázek 8-31. Snížení tvrdosti je způsobeno především natahováním zpevňujících intermetalických fází  $\alpha_c\text{-Al}_{12}(\text{FeMn})_3\text{Si}$  po hranicích zrn a dále rozpouštěním částic  $\beta\text{-Mg}_2\text{Si}$  do tuhého roztoku. Pozitivním dopadem nadměrného teplotního působení na slitinu je to, že došlo k rekryalizačním procesům, které zrovnoměnilly elasticko-plastické vlastnosti zpevněné vrstvy. Tuto skutečnost potvrzují téměř konstantní (vyrovnané) a nízké hodnoty povrchové nanotvrdosti HIT a elastické práce indentoru v rámci celé délky díry. Rekryalizační procesy měly dále pozitivní vliv na zamezení delaminace zpevněného povrchu – u děr vytvořených sdruženými nástroji fy. HOFMEISTER s.r.o. se delaminace nevyskytuje (patrné z obr.III). I přes nízkou povrchovou a podpovrchovou degradaci materiálu vykazoval povrch díry vysokou odolnost vůči opotřebení při scratch testu.



Obrázek 8-31- Metalografická struktura příčného řezu povrchové a podpovrchové díry (váleček č.86) vytvořené vrtákem fy.Hofmeister: a) šipkami označené zhrublé natavené intermetalické fáze  $\alpha_c\text{-Al}_{12}(\text{FeMn})_3\text{Si}$  po hranicích zrn vzniklé účinkem teplotního působení, b) deformovaná podpovrchová oblast dokládající výrazné deformační podpovrchové zpevnění materiálu; zakroužkované oblasti ve kterých došlo k rozpuštění částic  $\beta\text{-Mg}_2\text{Si}$  a intermetalických fází  $\alpha_c\text{-Al}_{12}(\text{FeMn})_3\text{Si}$ .

#### 8.10.5 Závěr ze zkoumání otvorů vytvořených v materiálu AW 2032 T6

Tabulka 8-18 zobrazuje kvantitativní vyhodnocení jednotlivých nástrojů. Z tohoto hodnocení je patrné, že nejvíce pozitivní vliv na užité vlastnosti povrchu děr vytvořených v hliníkové slitině AW 6082 T6 vykazuje vrták fy. O. Nejvyšší úroveň zpevnění byla u díry vytvořené tímto vrtákem zaznamenána v koncové oblasti díry, tzn. že je možné se domnívat, že na zpevnění se nejvíce podílí řezná geometrie (část) vrtáku. Nástrojem fy R bylo sice možné vytvořit deformačně zpevněnou vrstvu, ale hloubkový efekt této vrstvy je nejnižší z měřených vrtáků. Dalším nedostatkem této vrstvy je její četná delaminace a dále to, že povrchová nanotvrdost zpevněné vrstvy klesá s délkou vytvořené díry. Nevýhodou sdruženého nástroje fy. Hofmeister je značné teplotní ovlivnění obráběného materiálu, které má za následek jednak rekrytalizaci podpovrchové oblasti materiálu, ale také jeho teplotní degradaci. Teplotní degradace se projevuje především snížením tvrdosti v oblasti pod povrchem díry. V případě zatížení povrchu díry by mohlo vlivem malé nosnosti podpovrchové oblasti dojít k její deformaci a tím i ke změně její geometrie (tvaru, rozměrů). Pozitivním důsledkem rekrytalizace je zrovnoměnění deformačních účinků vrtáku podél celé délky vytvořeného otvoru. Na konci tabulky 8-18 jsou zobrazeny praktické závěry ze zkoumání

Tabulka 8-18- Sledované parametry děr zhotovených různými nástroji; 5 – nejlepší, 1 – nejhorší ve sledovaném parametru.

	R	O	H
1. Množství „nalepených“ třísek	3	4	4
2. Stejnóměrnost povrchu (dle obrazové analýzy)	2	3	4
3. Tloušťka efektivního zpevnění	5	5	1
4. Procentuální pokrytí povrchu zpevněnou vrstvou	4	5	2
5. Teplotní ovlivnění během obrábění na povrchu obrobku	4	5	2
6. Změny během vrtání jedné díry (z hlediska rovnoměrnosti povrchu)	3	4	3
7. Změny mezi první a poslední dírou (z hlediska rovnoměrnosti povrchu)	4	4	4
8. Kvalita zpevněné vrstvy (odolnost vůči delaminaci vrstvy)	2	4	5
9. Hloubkový účinek zpevnění	2	5	1
10. Odolnost vůči opotřebení scratch testem	3	4	4
11. Zpevňující efekt vrtáku (sdruženého nástroje)	2	5	4
12. Povrchová nanotvrdost povrchu díry	3	5	2
13. Změny povrchové nanotvrdosti v rámci jedné díry	3	2	5
14. Změny podpovrchové mikrotvrdosti mezi první a poslední dírou	5	2	3
15. Změny elastické práce nanoindentoru v rámci jedné díry	4	4	5
$\Sigma$	49	61	49

Pořadí

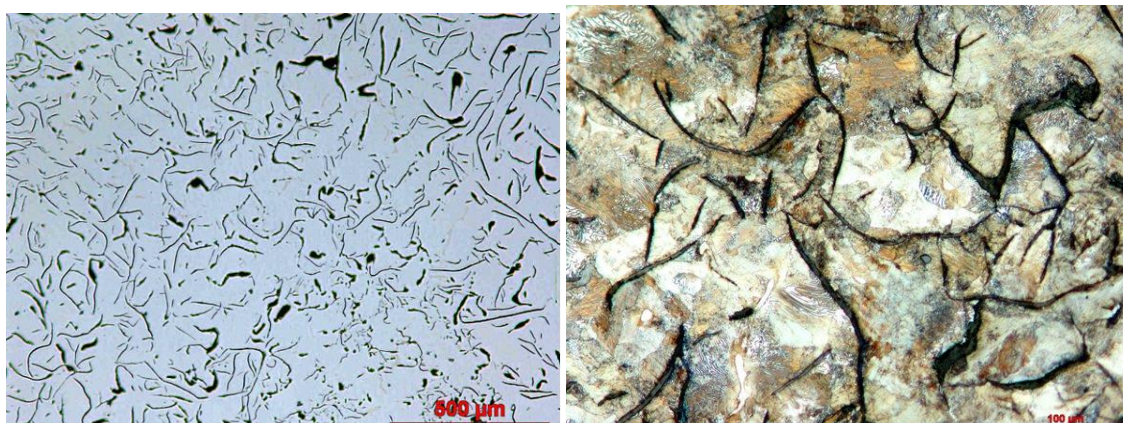
2.-3.

1.

2.-3.

## 8.11 Šedá litina GG 20 (ČSN 422420)

Vzorky pro tento experiment byly získány ze slévárny v Hořovicích. Materiál byl dodán v tyčích o průměru 30 mm. Jelikož se jedná o materiál, jehož vlastnosti se mohou významně lišit dodavatel od dodavatele. I dodávka od dodávky bylo nejdříve nutné provést důkladnou kontrolu vlastností. Nejdříve byla provedena metalografická analýza vzorků.



Obrázek 8-32– Mikrostruktura dodaných vzorků šedé litiny GG20 a) Neleptaná 50x zvětšení b)Leptána Nitalem 4% 200x zvětšení

Struktura vzorku (viz Obrázek 8-32) odpovídá šedé litině s perlitickou matricí s lupínkovým grafitem. Rozložení grafitu odpovídá rovnoměrnému rozložení dle ČSN 42 0461. Dále byla provedena chemická analýza, zkouška tvrdosti Brinell, kulička 5 mm, 750 kg, 15 sec, dále provedena zkouška tahem. Získané hodnoty zobrazuje tabulka 8-19. Z ní vyplývá, že dodané vzorky odpovídají nárokům na materiál, s výhradou že z tvaru vyloučeného grafitu je zřejmé že nebylo provedeno očkování, které by mohlo vlastnosti ještě vylepšit.

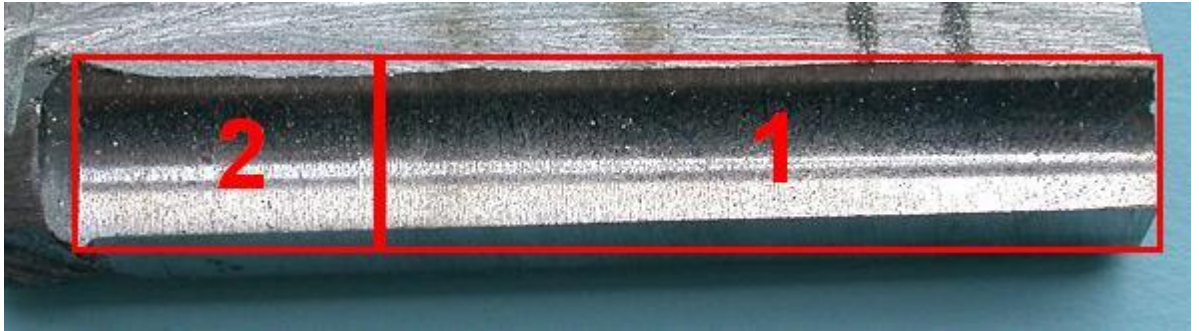
Tabulka 8-19– Získané hodnoty chem. složení a mechanických zkoušek vzorků litin

Vzorek č.	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Uhlíkový ekvivalent CE [%]	Tvrdost HB	Průměr vzorku [mm]	Pevnost v tahu Rm [MPa]
17	3,5	1,68	0,6	0,1	0,1	0,1	3,941	220	20	262,9
23	3,4	1,87	0,6	0,1	0,1	0,1	3,943	220	20	273,7
39	3,5	1,61	0,6	0,1	0,1	0,1	3,95	224	20	267,4
55	3,5	1,62	0,6	0,1	0,1	0,1	3,966	217	20	251,5

Předmětem tohoto zkoumání je povrch vzorku 422420/3 (materiál ČSN 422420), který byl zhotoven vrtacím prototypem D12 firmy HOFFMEISTER s.r.o. Povrch byl zkoumán konfokálním mikroskopem Olympus se softwarem Lext. Z vyvrtaného válečku byl odebrán segment, jehož velikost umožnila snadný přístup všech potřebných objektivů.

## 8.12 Makroskopické pozorování

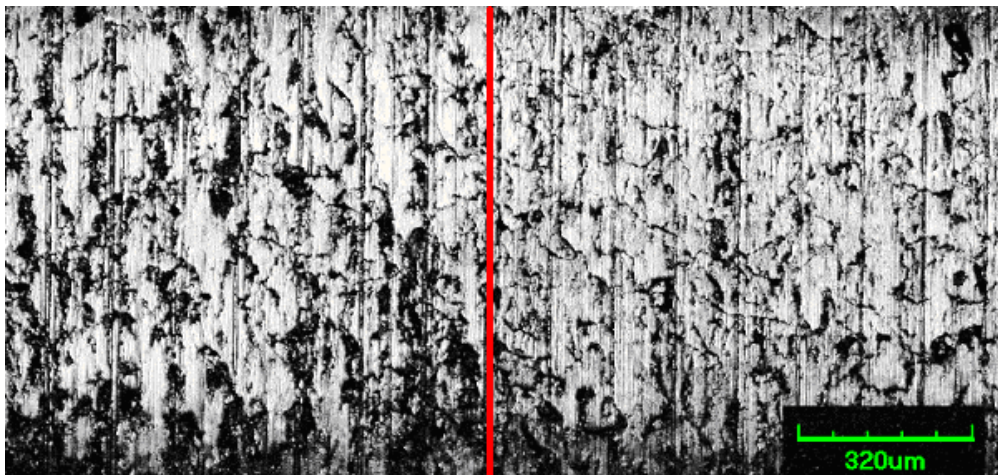
Při makroskopickém pozorování vzorku jsou na povrchu patrné dvě oblasti (Obrázek 8-33). V oblasti 1 byl povrch tvářen, zatímco v oblasti 2 byl povrch pouze vrtán. Tento fakt vyplývá jak z geometrie vrtáku a rozměrů díry, tak z pozdějšího mikroskopického zkoumání.



Obrázek 8-33- Tvářená (1) a vrtaná oblast (2)

## 8.13 Mikroskopické pozorování

Mikroskopickým pozorováním byly v tvářené části vzorku zjištěny další dvě oblasti – oblast s vytrhaným grafitem a zahmlená oblast. Přejechod mezi těmito oblastmi dokumentuje obrázek 8-34.



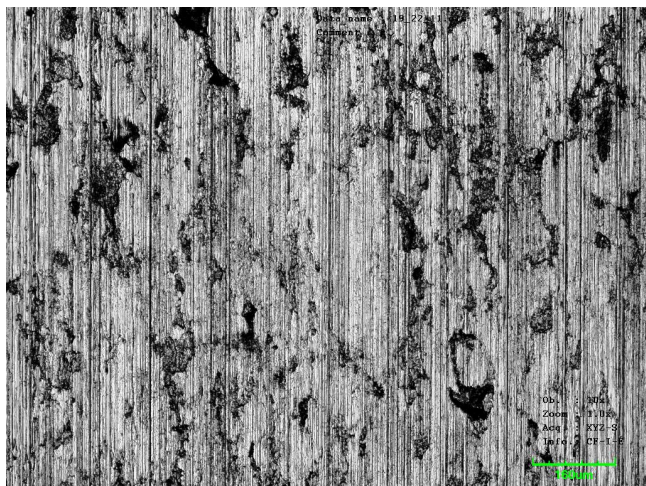
Obrázek 8-34- Přejechod mezi zahmlenou částí (vpravo) a částí s vytrhaným grafitem (vlevo)

Celkem lze tedy na vzorku pozorovat 4 oblasti (povrchy):

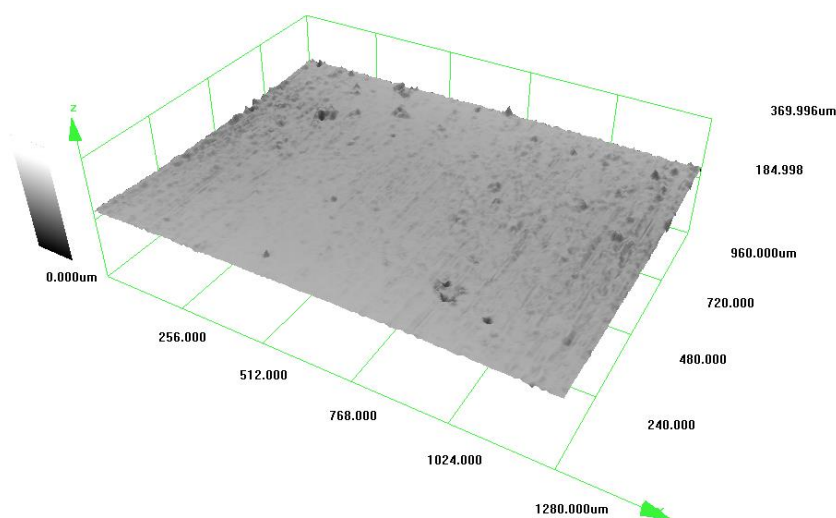
- Povrch vrtaný
- Přejechod mezi vrtaným a tvářeným povrchem
- Tvářený povrch s vytrhaným grafitem
- Tvářený povrch zahmlený

### 8.13.1 Povrch vrtaný

Ve vrtané oblasti je možné pozorovat vytrhaný grafit (Obrázek 8-35), ale ne v takové míře jako v oblasti tvářené. Hloubka v místech, kde byl grafit vytržen, se pohybovala v rozmezí 1–2  $\mu\text{m}$ . Ve velmi malé míře byly na povrchu pozorovatelné defekty s hloubkou  $\sim 5 \mu\text{m}$  (Obrázek 8-36).



Obrázek 8-35- Povrch vzorku ve vrtané oblasti



Obrázek 8-36 - Povrch vzorku ve vrtané oblasti

### 8.13.2 Měření drsnosti

Měření drsnosti probíhalo při 100 x zvětšení stejně jako ve všech ostatních oblastech vzorku. Drsnost  $R_a$  se pohybovala v rozmezí 1,9 – 2,2. Jen v místech s větší hloubkou vytrhaného grafitu dosahovala hodnot 2,7 -2,9.

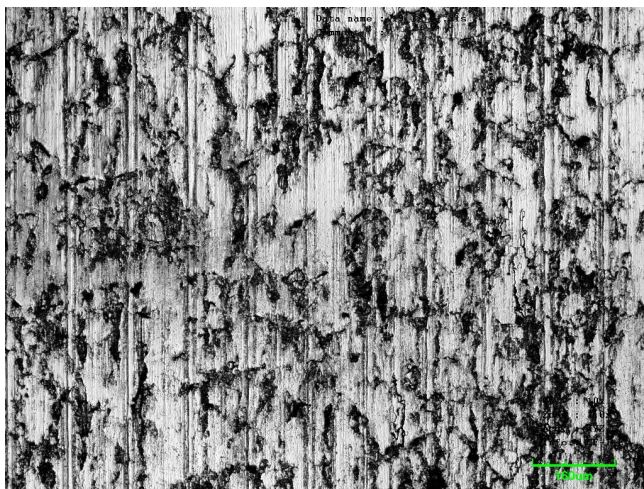
### 8.13.3 Přejechod mezi vrtaným a tvářeným povrchem

Oblast přechodu mezi tvářeným a vrtaným povrchem se nacházela cca 10,8 mm od konce díry, což odpovídá vzdálenosti tvářecí fazety od břitu nástroje. Měřením bylo zjištěno, že vrtaný povrch má o 40  $\mu\text{m}$  menší průměr než povrch tvářený, z čehož vyplývá, že po

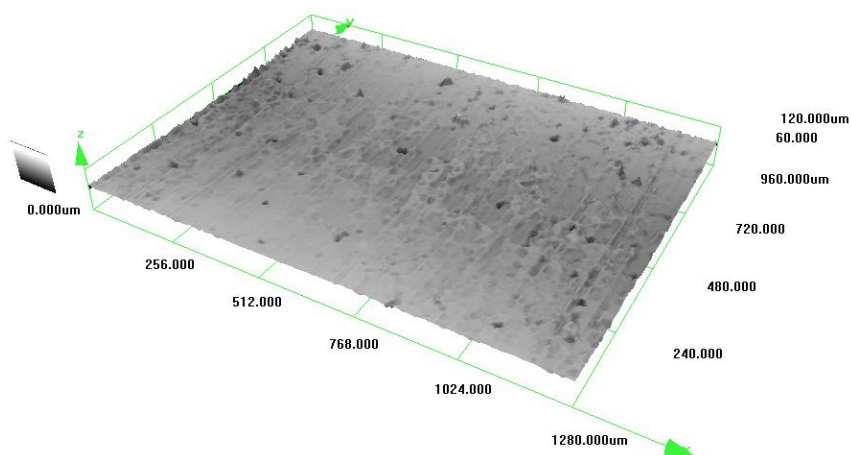
průchodu tvářecí části nástroje dojde k plastické deformaci vrstvy materiálu o tloušťce 20  $\mu\text{m}$  (obr 146).

#### 8.13.4 Tvářený povrch s vytrhaným grafitem

Tento povrch vytvořený po průchodu tvářecí části nástroje, vykazuje oproti vrtanému povrchu velmi zhoršenou jakost (obrázek 8-37 - obrázek 8-38). Prakticky ve všech místech této oblasti se vyskytuje vytrhaný grafit o hloubce 1 – 5  $\mu\text{m}$ .



Obrázek 8-37- Protvářený povrch s vytrhaným grafitem



Obrázek 8-38- Tvářený povrch s vytrhaným grafitem

#### 8.13.5 Měření drsnosti

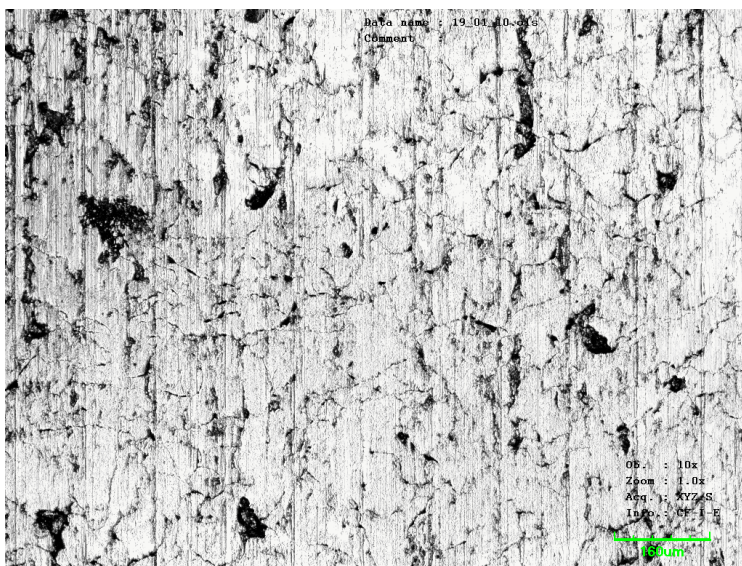
Drsnost  $R_a$  dosahovala v této oblasti velmi rozdílných hodnot. V místech s minimem grafitu se pohybovala v rozmezí 1,5 – 1,9, což by odpovídalo povrchu tvářenému, kdy se drsnost  $R_a$  zmenšila o 0,3 – 0,4 oproti povrchu vrtanému. V oblastech s vytrhaným grafitem se hodnoty  $R_a$  pohybovaly v rozmezí 2,3 – 3,7 v závislosti na hloubce a množství vytrhaného



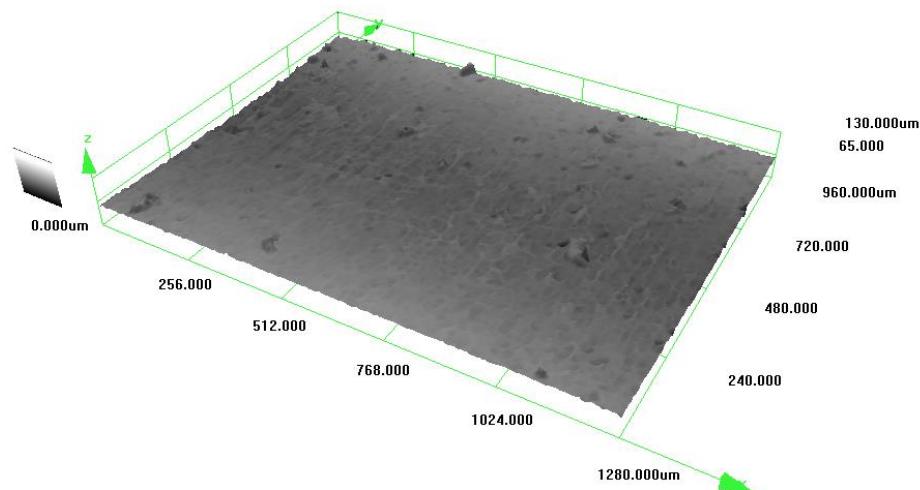
grafitu. Tyto hodnoty svědčí o výrazném zhoršení kvality povrchu tvářené části oproti části, která byla jen vrtána.

### 8.13.6 Tvářený povrch zahlazený

Ze všech zkoumaných oblastí vzorku, měl tento povrch nejvyšší jakost. Vytrhaný grafit je zde zahlazený a povrch je téměř bez defektů (viz obrázek 8-39 a obrázek 8-40). Z měření KTO vyplývá, že při výjezdu vrtáku z otvoru došlo ve vzdálenosti ..... od počátku díry k nárůstu krouticího momentu nástroje. To lze vysvětlit opětovnou plastickou deformací povrchu vzorku, která by mohla mít za následek zvýšení jakosti v této oblasti. Otázkou zůstává, proč zde došlo k opětovné plastické deformaci při výjezdu nástroje. Jednou z možností je například zapěchování třísek do povrchu, případně mohlo vlivem chlazení dojít ke smrštění otvoru v horní části, která tak opět mohla být deformována tvářecí fazetou.



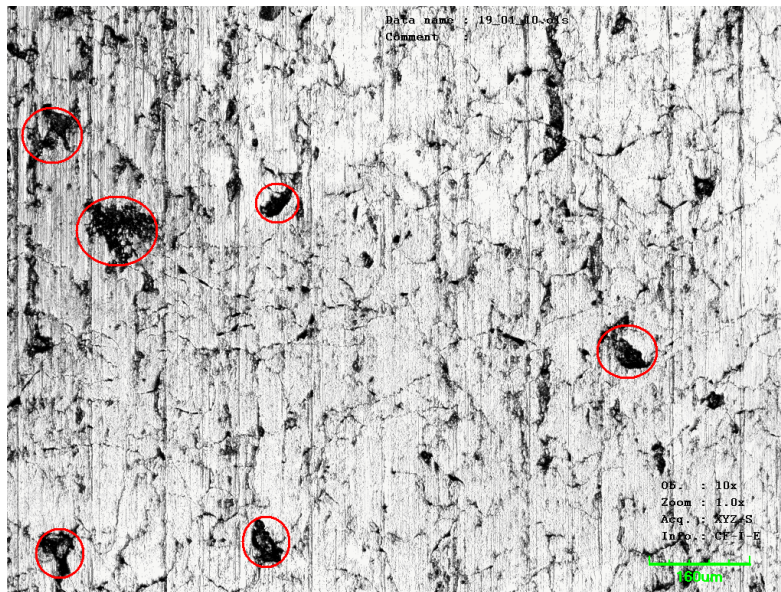
Obrázek 8-39- Tvářený povrch zahlazený



Obrázek 8-40- Tvářený povrch zahlazený

### 8.13.7 Měření drsnosti

V této oblasti se pohybovala drsnost Ra v rozmezí 1,3 – 1,6 $\mu$ m. Pouze v několika místech s povrchovými defekty (viz obrázek 8-41) se hodnoty Ra pohybovaly okolo 2,1 $\mu$ m.



Obrázek 8-41- Defekty zhoršující drsnost povrchu

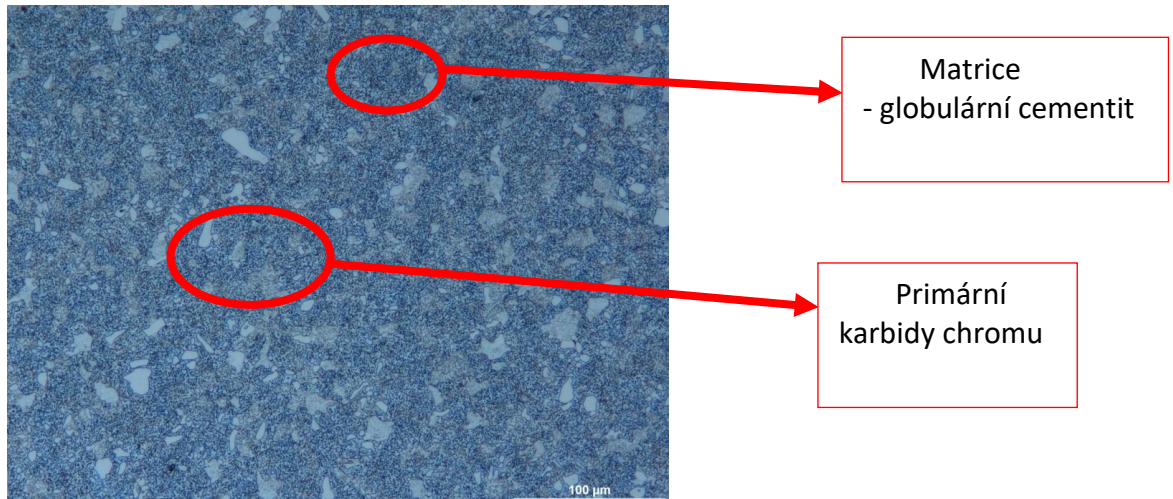
### 8.13.8 Závěr zkoumání otvorů vytvořených v litině GG20

Ze snímků a z naměřených hodnot vyplývá, že cílům projektu se nejvíce přibližuje povrch v oblasti 4.4 – Tvářený povrch zahluzený, kde došlo k opětovné plastické deformaci. Získané výsledky by měly být zřejmě prověřeny dlouhodobým provozem v reálných podmínkách. Povrch vytvořený pouze jedním průchodem tvářecího elementu (4.3), se ukázal jako nevyhovující a paradoxně se jeho jakost výrazně zhoršila oproti části vrtané (4.1). Po vyhodnocení potřebných analýz je třeba se zamyslet nad úpravou řezných podmínek, tak aby bylo kvalitního povrchu dosaženo po celé délce otvoru.

## 8.14 Materiál D3 (ČSN 419436)

Materiál je často využíván pro výrobu forem a dalších nástrojů pracujících zastudena popřípadě ve specifických případech i některých strojních součástích, tam, kde jsou využity jeho specifické přednosti: Vysoká tvrdost, otěruvzdornost a ještě přijatelná houževnatost za přijatelnou cenu. Dosažení optimálních vlastností u tohoto materiálu je velmi závislé zejména na dodržení kvalitního tepelného zpracování, již z předepsaného chemického složení je patrné, že tento materiál poskytuje. Z hlediska technologických vlastností je to kombinace vysoké kalitelnosti a prokalitelnosti. Pro výrobu forem je vyžadována dobrá obrobitelnost, jelikož je třeba odebrat často velké množství materiálu. Pořizovací cena materiálu tvoří většinou zanedbatelnou část ceny celého nástroje oproti ostatním operacím, ale jeho kvalita je klíčový faktor z hlediska životnosti nástroje. Díky značnému rozmezí předepsaného složení je nutno této skutečnosti věnovat značnou pozornost. Rozmezí ocel s 1,8 % C a 10 % Cr bude mít jistě poněkud odlišné vlastnosti od oceli s 2,2 % C a 12 % Cr. Jeho konstrukce, obrábění, tepelné zpracování atd. jej mohou již pouze nepatrně ovlivnit. Základem každého nástroje je správně dodaný polotovár a to nejen s ohledem na směrné chemické složení. Z tohoto důvodu je ve zprávě věnována také pozornost kvalitě dodaného materiálu. Při kontrole byla kontrolována

tvrdost, metalografie, a zkouška tahem a tlakem. Materiál byl dodán ve formě žíhané na měkko. Nejdříve byl zkontrolován stupeň sferoidizace (podíl lamelárního a globulárního perlitu),



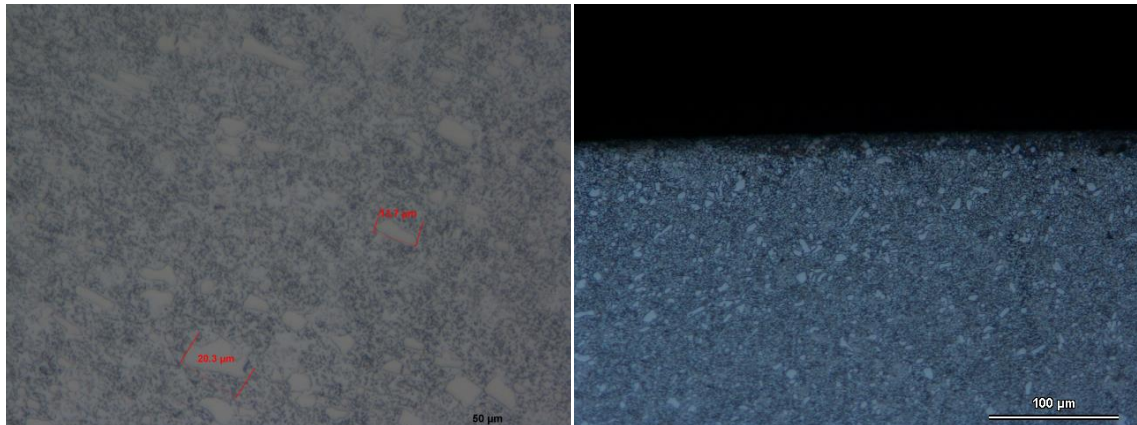
Obrázek 8-42–Mikrostruktura dodané oceli D3(ČSN 419436) po žihání na měkko (příčný směr)

Ze snímku (Obrázek 8-42) je patrné, že došlo k úplné sferoidizaci perlitu. Dle normy je maximální tvrdost 250 HB. Naměřená hodnota činila  $HB\ 219\pm 2$ . Důležitá z hlediska rozmístění karbidů je kontrola v podélném směru. A zařazení stupně karbidické řádkovitosti. Dle etalonové stupnice SEP 1615/75 byla hodnocena karbidická řádkovitost stupněm 4B, 3A (Obrázek 8-43)



Obrázek 8-43- Mikrostruktura oceli 19436 po žihání na měkko (podélný směr)

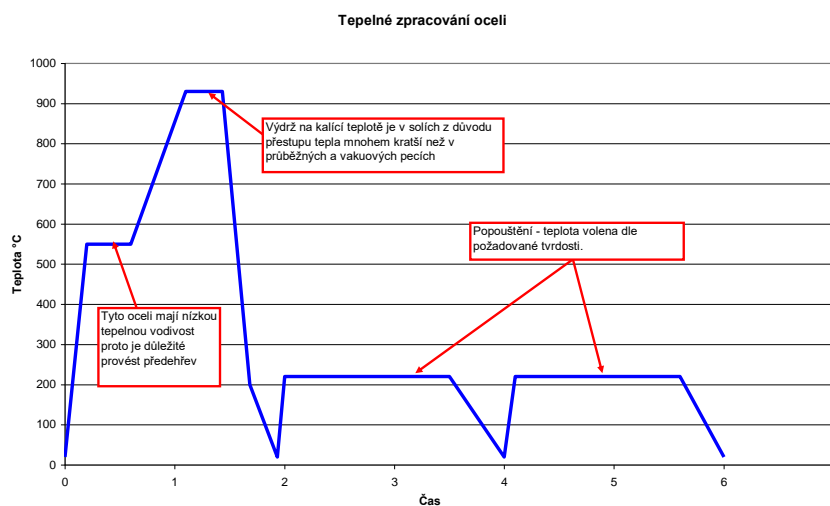
Dalším parametrem ovlivňujícím mechanické vlastnosti materiálu je velikost karbidů. Tento parametr není obecně normována. Vyhodnocení bylo prováděno při zvětšení 500x. Měřeny byly tři největší karbidy a uvedena jejich průměrná hodnota. Tato hodnota byla zařazena do intervalu od 20μm do 30μm. Karbidy nejsou ostrohranné (obr. Velmi častým případem je oduhličení povrchu do hloubky vyšší než bude materiál obroben. Obrázek 8-44 zobrazuje, že během technologického postupu tváření nedošlo k oduhličení povrchu.



Obrázek 8-44– a) velikost karbidů b) Okraj tvářeného vzorku – prakticky zanedbatelné oduhličení povrchu do 20μm

### 8.14.1 Tepelné zpracování

Po provedení analýzy vstupního materiálu bylo přikročeno k tepelnému zpracování, viz obrázek 8-45. Režim se skládal ze zakalení a 2x popouštění. Kalicí teplota byla zvolena 930°C, popuštěno na 220°C. Požadavky na tvrdost po zušlechtní 58HRC. Tepelné zpracování provedeno v soli.



Obrázek 8-45- Režim provedeného tepelného zpracování

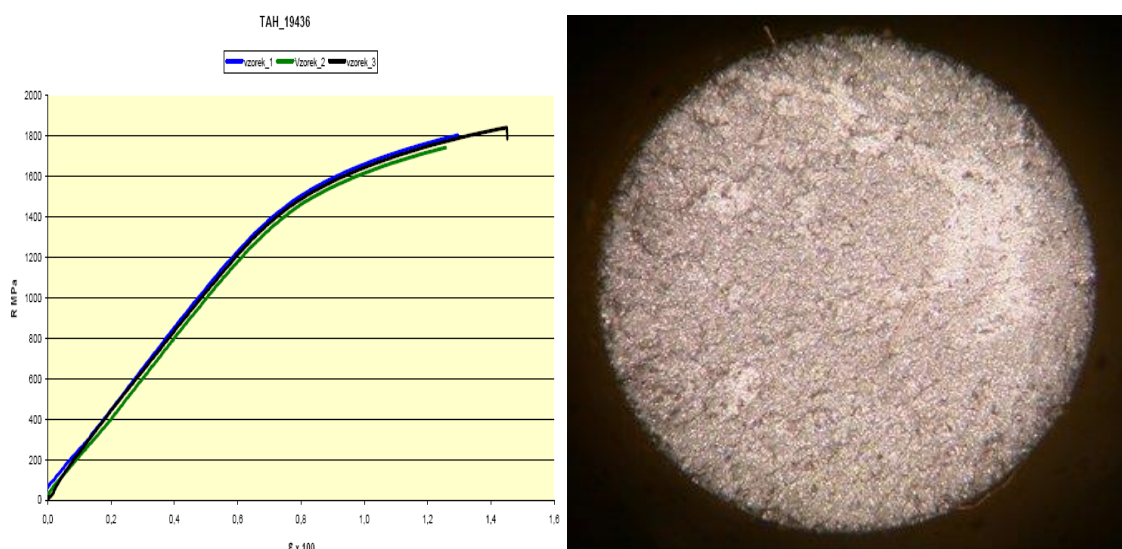


Obrázek 8-46– Mikrostruktura po TZ

Po tomto režimu tepelného zpracování bylo provedeno metalografické vyhodnocení a pro kontrolu měřena tvrdost HRC. Naměřená hodnota  $58 \pm 2 \text{HRC}$  z metalografického rozboru je vidět že nedošlo k rozpadu všech karbidů chromu. Matrice je tvořena popuštěným martenzitem a sekundárními karbidy viz obrázek 8-46.

#### 8.14.2 Zkouška tahem

Zkouška tahem byla provedena dle normy EN 10002-1. Rozměry zkušebních vzorků byly zprvu  $D_0=10 \text{ mm}$ ,  $L_0=100 \text{ mm}$ . Upínání pomocí závitu M16. Při provádění této zkoušky došlo k znehodnocení zkušebních tyčí z důvodu prasknutí v místě závitu. Při opakování zkoušky tahem byly zvoleny zkušební tyče  $D_0=5 \text{ mm}$ ,  $L_0=50 \text{ mm}$ . Upínání bylo opět pomocí závitu M16. Zkouška byla opakována třikrát. Záznam zobrazuje Obrázek 8-47.

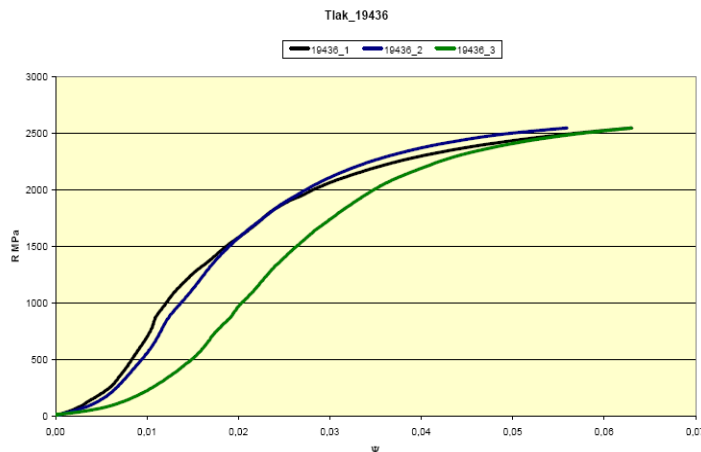


Obrázek 8-47– a) Diagram tahové zkoušky materiálu D3 b) Lomová plocha vzorku po zkoušce tahem

Mezi jednotlivými měřeními byly zaznamenány velmi malé rozdíly. Průměr naměřených hodnot byl ( $R_m=1800 \text{ MPa}$ ,  $R_e=1650 \text{ MPa}$ ), dále lze konstatovat značnou křehkost materiálu a náchylnost k vrubovému účinku. Lom je jemnozrný křehký nejeví stopy deformace. Povrch lomu byl jemně zrnitý a lesklý.

#### 8.14.3 Zkouška tlakem

Vyhodnocován je záznam zatěžující síly na deformaci – zkrácení vzorku. Zařízení dovoluje vyvodit max. sílu pouze  $250\,000 \text{ N}$ , což neumožňuje dosáhnout v tomto případě meze pevnosti. Nicméně z provedeného záznamu lze některá fakta odvodit. V případě oceli 19436 popuštěné na horní pevnost neodpovídá pevnost v tahu pevnosti v tlaku. Pevnost v tlaku je vyšší. Z čeho vyplývá, že materiál se chová jako křehký. Zkouška v tlaku ukázala malou plasticitu. Charakter lomu by pravděpodobně odpovídal materiálům málo plastickým (litina). Během zkoušky tlakem došlo k deformaci  $0,06 \text{ mm}$  při napětí  $500 \text{ MPa}$ . S velkou mírou zpevnění v tomto materiálu nelze podle předpokladů zřejmě kalkulovat viz obrázek 8-48.



Obrázek 8-48- Statická zkouška tlakem oceli D3 (ČSN 419436)

#### 8.14.4 Vyhodnocení dodaného stavu materiálu D3

Je patrné, že dodaná ocel je vyhovující. Je patrný samozřejmý trend dodávat zejména vysoce legované materiály s obsahy legujících prvků na spodní hranici normy, k čemuž samozřejmě jsou ekonomické důvody. V poslední době se projevuje trend dodávat oceli s nižším procentem uhlíku (v sledovaném případě byl naměřen obsah C nižší oproti normě o 0,2%). To se projevuje na zvýšení houževnatosti spojený se zanedbatelným poklesem tvrdosti.

Experiment sledoval mikrostrukturu v obrobeném materiálu do hloubky cca 100 $\mu$ m.

Vyhodnocována byla:

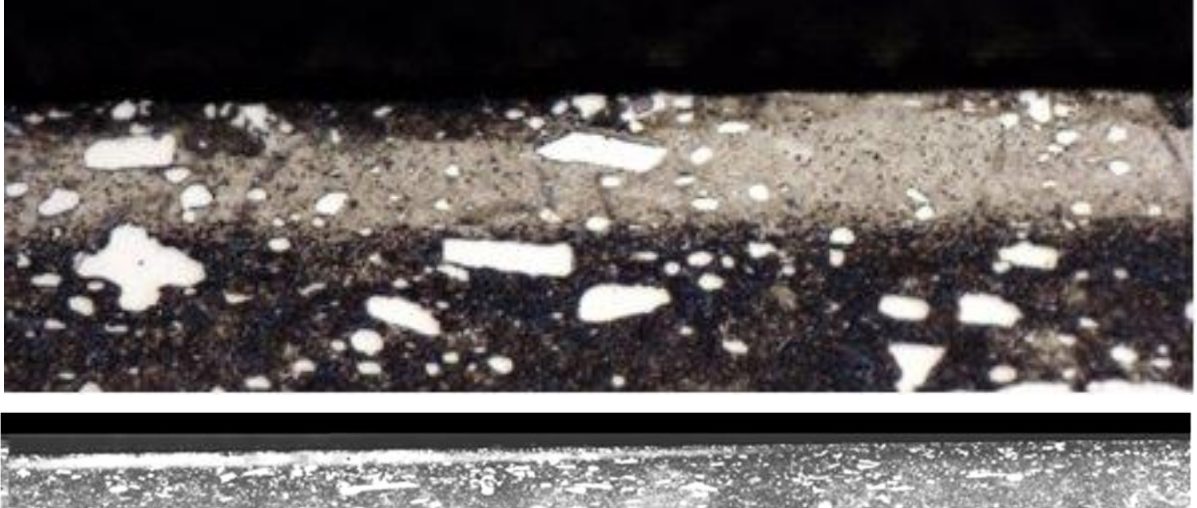
- 1) Tloušťka tzv. ovlivněné vrstvy (vyvolaná tepelným + tlakovým působením nástroje).
- 2) Tvrdost této ovlivněné vrstvy (pokud to umožňuje dostatečná tloušťka).
- 3) Kompaktnost ovlivněné vrstvy.
- 4) Povrchový reliéf
- 5) Přínos ovlivněné vrstvy
- 6) Ostatní metalografické jevy.

K měření a metalografickému pozorování bylo k dispozici 3 typy vrtacích nástrojů. S těmito nástroji bylo k dispozici celkem 6 ploch otvorů sdruženým nástrojem od firmy Hoffmeister, a konkurenční nástroje, které budou pojmenovány jako O a R. Na výsledcích měření se projevil předpoklad, že tato ocel má velmi malou plastickou deformaci a jsou zde problematické karbidy.

#### 8.14.5 Sdružený nástroj – „Hoffmeister“ – vzorek č. 10 (posuv 0,08 mm/ot)

Z mikrostruktury je patrné, při vrtání k velkým změnám nedošlo. Na některých místech se objevila přikalená povrchová vrstva (mikrotvrdost je vyšší o cca 50 %, než okolní materiál) obsahuje vysoceuhlíkový martenzit a velké množství zbytkového austenitu. Z tohoto důvodu

se jeví jako méně naleptaná. Tloušťka této vrstvy je cca 15 až 20 $\mu\text{m}$ . Naměřené hodnoty tvrdosti dosahovaly přes 900 HV 0,05 v závislosti na rozložení vtisku vůči okolním karbidům. Přechod mezi popuštěnou strukturou (jádro vzorku) a zakalenou vrstvičkou je pozvolný (obrázek 8-49). Tato vrstva se však neobjevuje zcela pravidelně.

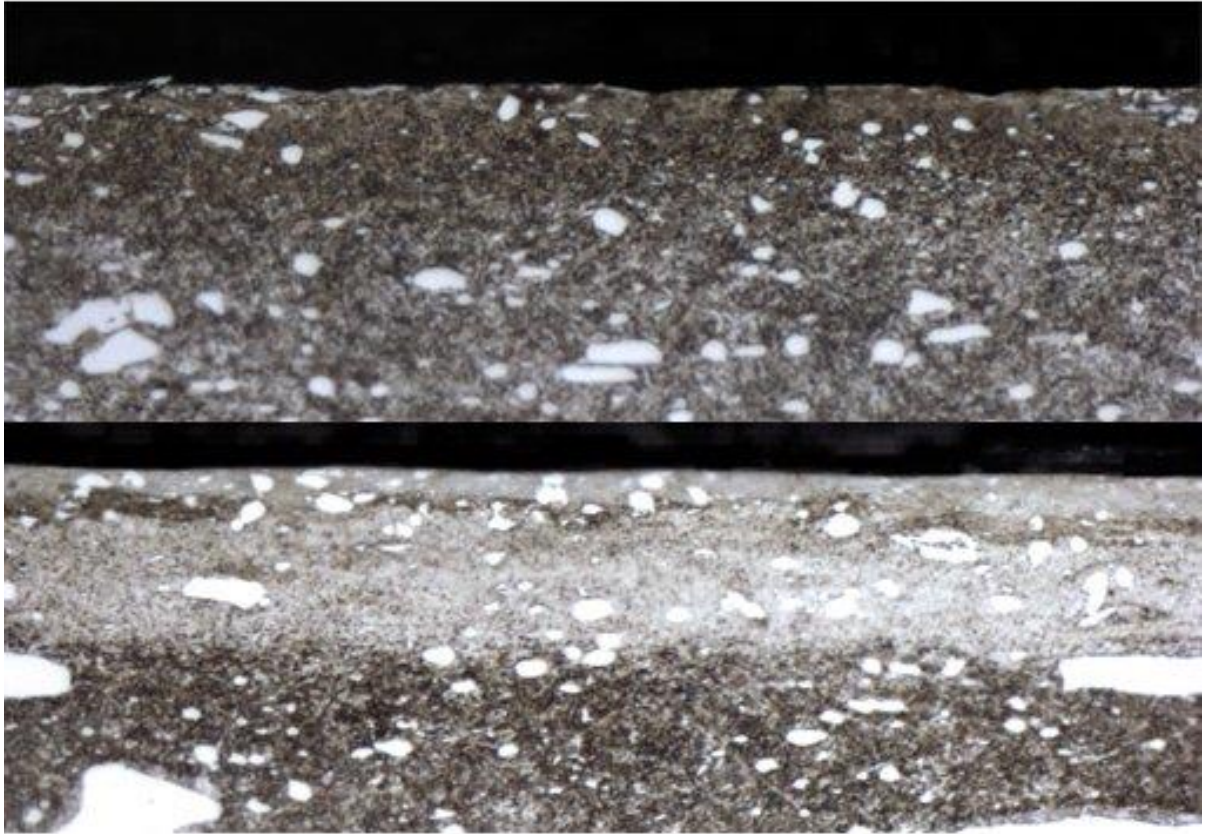


Obrázek 8-49 - a) Zakalená oblast vrtaného otvoru (světlá část) zvětšeno 500x b) Zakalená oblast vrtaného otvoru (světlá část). Délka snímku 1,2mm zvětšeno 500x

Tato zakalená vrstvička je vytvořena pravděpodobně díky vysokým teplotám vneseným do povrchu obráběného materiálu. Tomu odpovídají rovněž hodnoty hloubky řezu, která byla v tomto případě nejvyšší.

#### 8.14.6 Nástroj – „Hoffmeister“ – vzorek 7 (posuv 0,04)

Rovněž v tomto případě dochází k vytvoření odlišné povrchové vrstvy. Tato vrstva má odlišnou mikrostrukturu od jádra materiálu. Tato změna je vyvolána ohřevem na teplotu při které k těmto změnám může docházet. V případě že se jedná o vrstvičku „tmavší“ v porovnání s jádrem, pak struktura odpovídá popuštění na vyšší teploty a vytvoření sorbitické struktury. V případě že se jedná o vytvoření tzv. světlé vrstvičky, pak teplo vnesené do povrchu je ještě vyšší a dochází zřejmě k znovu zakalení povrchu. Tato vrstva bude zřejmě vykazovat vyšší tvrdost.

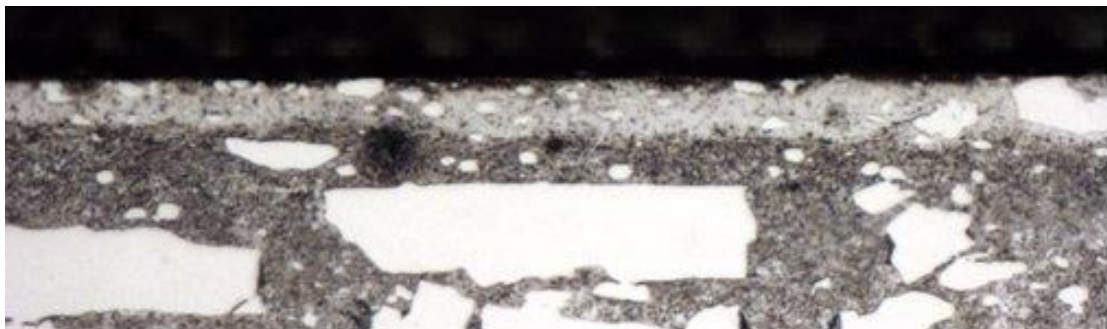


Obrázek 8-50 - a) ukázka vytvořené více popuštěné vrstvičky na povrchu (tmavší oblast). Zvětšeno 500x b) Ukázka vytvořené zakalené vrstvičky na povrchu (světlá oblast). Zvětšeno 500x

Tloušťka vytvořených vrstviček je obdobná jako v předchozím případě (15 až 20 $\mu$ m).

#### 8.14.7 Sdružený nástroj – „Hoffmeister“ – vzorek 9A (posuv 0,06) vzorek 9B (posuv 0,08) 9A

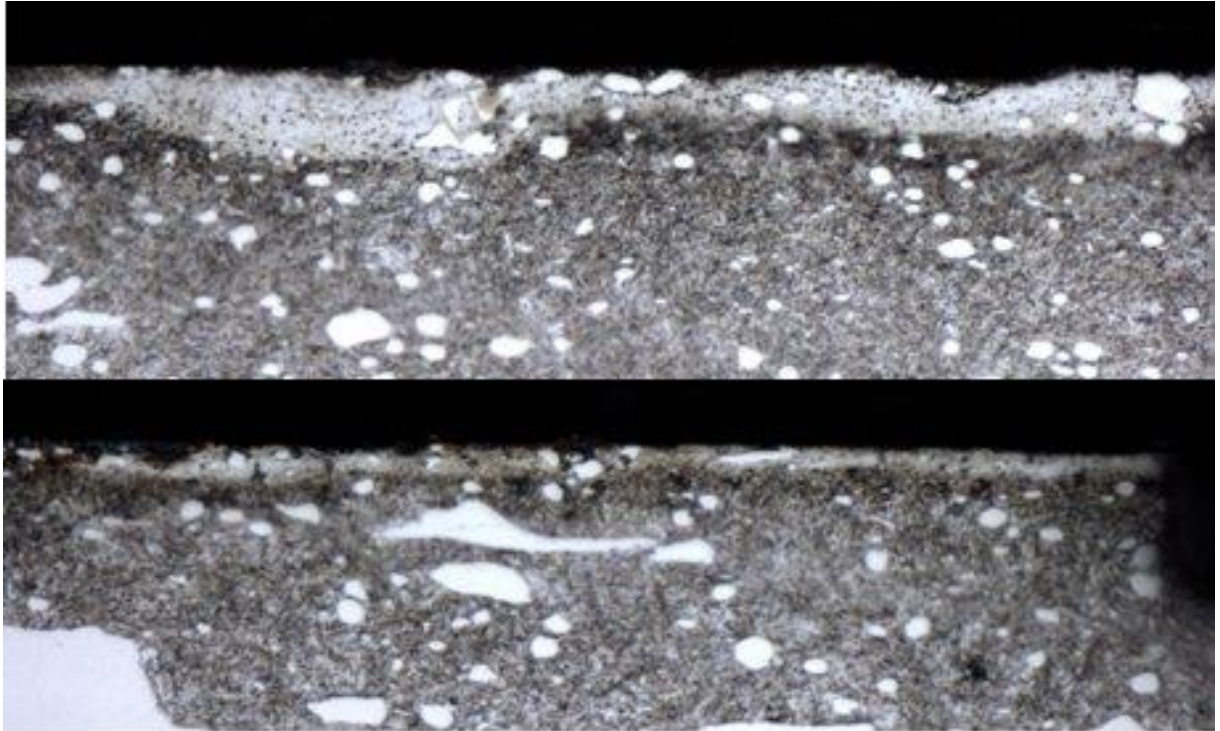
V případě vrtané díry 9A se vytváří zakalená vrstvička. Tato vrstva je výraznější až v poslední části vrtané díry (neprůchozí). V úvodní části je tloušťka této vrstvy cca 3 $\mu$ m.



Obrázek 8-51 - Ukázka vytvořené zakalené vrstvičky na povrchu (světlá oblast). Zvětšeno 500x



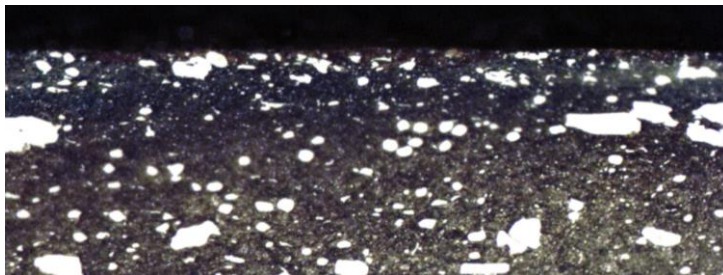
U vzorku 9B dochází ke stejnému jevu jako v případě 9A. Světlá zakalená vrstvička se vytváří až v poslední části vrtané díry (není průchozí). V úvodní fázi je množství tepla v materiálu o něco nižší, z toho vyplývá nižší tloušťka této vrstvy.



Obrázek 8-52 - a) Ukázka vytvořené zakalené vrstvičky na povrchu (světlá oblast). Nejhlubší část. Zvětšeno 500x b) Ukázka tenké vrstvičky v první části vrtané díry (světlá oblast). Zvětšeno 500x

#### 8.14.8 Sdružený nástroj – „Hoffmeister“ – vzorek 11 (posuv 0,08)

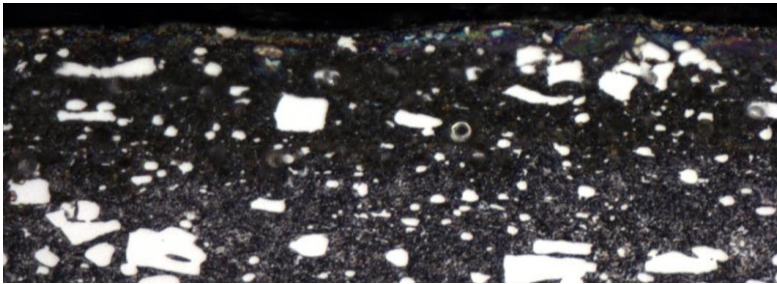
U této vrtané díry je nejprve vytvořena popuštěná vrstvička (mikrostruktura je sorbit). Ve vyšších hloubkách se vytváří zakalená vrstvička totožná jako v předchozích případech. Je tedy zřejmé, že dochází ke zvyšování teploty povrchu se zvyšující se hloubkou vrtaného otvoru.



Obrázek 8-53 - Ukázka popuštěné vrstvy v úvodní části díry (tmavší oblast). Zvětšeno 500x

#### 8.14.9 Nástroj – O – vzorek 12 (posuv 0,04)

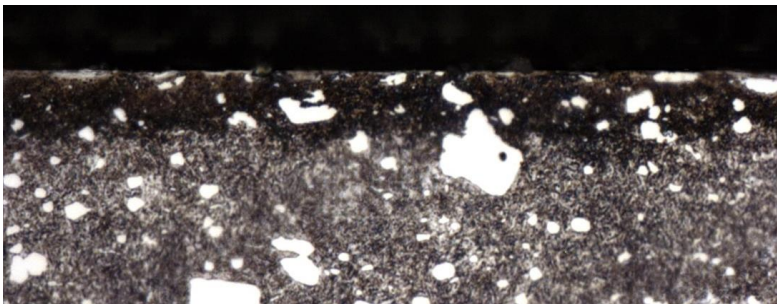
Z mikrostruktury je možné usuzovat, že množství tepla vneseného do obrobku není tak výrazné, jako v případě nástrojů Hoffmeister. Odlišnosti jsou především ve střední části díry. V tomto případě se vytvoří zakalená vrstvička jen v minimální délce. Ve většině oblastí vrtaného otvoru dosahované teploty povrchu odpovídají spíše horním popouštěcím teplotám. Z obrázku 8-54 je patrná popuštěná vrstva.



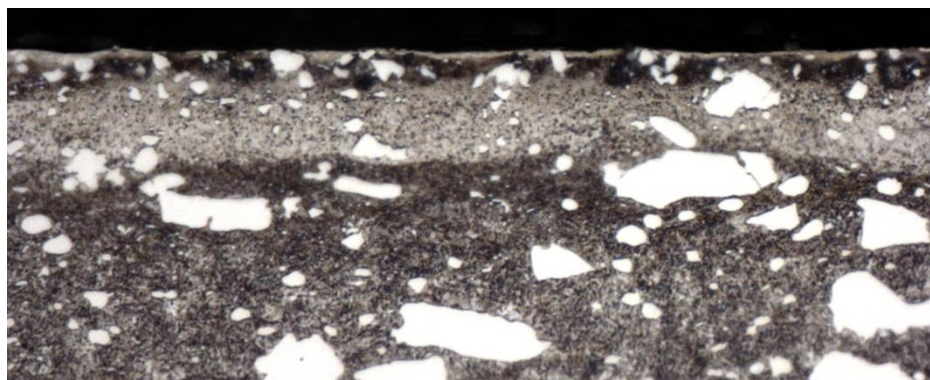
Obrázek 8-54- Ukázka popuštěné vrstvy ve střední oblasti hloubky díry (tmavší oblast). Zvětšeno 500x

#### 8.14.10 Sdružený nástroj – R – vzorek 13 (posuv 0,04)

Při sledování povrchu díry je patrné vytvoření popuštěné vrstvy v úvodu díry (obr. 8-55). Po určité době řezu se začne vytvářet díky zvyšující se teplotě zakalená vrstvička (obr. 8-56).



Obrázek 8-55 - Ukázka popuštěné vrstvy v úvodní části vrtané díry (tmavší oblast). Zvětšeno 500x



Obrázek 8-56 - Ukázka kalené vrstvy ve střední oblasti hloubky díry (světlejší oblast). Zvětšeno 500x

### 8.15 Diskuse výsledků integrity povrchu oceli D3

Z pozorování mikrostruktury jednoznačně vyplývá, že v místě řezu všech používaných nástrojů dochází ke zvýšení teploty až na horní popouštěcí teploty dané oceli (550 až 600°C). Tyto teploty ovlivní mikrostrukturu povrchu vrtaného otvoru. Vzniklá mikrostruktura je tvořena především sorbitem. Ocel 19436 má schopnost tzv. sekundární tvrdosti při popouštění. Dá se předpokládat, že v některých místech se vytvoří vrstvička mající sekundární tvrdost. Tato vrstvička bude mít optimální vlastnosti z hlediska kombinace dostatečnou houževnatosti při vysoké tvrdosti. Z hlediska mikrostruktury by mělo být cílem vytvořit tuto vrstvičku o konstantní tloušťce po celé délce. Těmto parametrům nejvíce odpovídá vrtací

nástroj OSG. Samozřejmě, toto platí pouze v případě, že obráběný materiál není v tomto mikrostrukturám stavu již před obráběním.

Druhou strukturální nehomogenitou je vytvořená kalená vrstvička. Tato vrstva odpovídá lokálnímu zvýšení teploty až k 1000°C. Struktura je pak tvořena vysoceuhlíkovým martenzitem s vysokým množstvím zbytkového austenitu. Tato vrstva nemusí mít vždy nejvyšší hodnoty tvrdosti. Zásadním problémem je nemožnost vytvoření určité tloušťky této vrstvy po celé délce řezu. Její tloušťka bude vždy proměnná v závislosti na odcházející tříse. Cílem obrábění by měla být minimalizace oblastí s touto vrstvou. U této oceli není možné vliv tvářecích elementů pomocí mikrostrukturálního pozorování zachytit. Teoreticky by mohlo být možné provést pomocí působení tlaku přeměnu zbytkového austenitu (u světlých kalených oblastí) na martenzit a tím zlepšit kvalitu povrchu.

- Nejvyšší kvalitu obráběného povrchu u materiálu D3 mají konkurenční nástroje O
- Během experimentů bylo pozorováno několik strukturálních změn na povrchu vrtaného otvoru
- Jako nejpříznivější se jeví vytvoření popuštěné vrstvičky na sekundární tvrdost
- Je problematické tuto vrstvičku měřit pomocí měření mikrotvrdosti
- Čím rozsáhlejší je oblast vytvářené kalené vrstvičky, tím vyšší je množství tepla vneseného do obrobku
- Odlišnosti mikrostruktury v závislosti na řezných podmínkách nebyly pozorovány.
- Velikost jednotlivých oblastí (zakalených, nebo popuštěných) bude závislý na odchodu třísky

## 8.16 Diskuse výsledků hlavního experimentu

Díličí výsledky jednotlivých experimentů byly vždy uvedeny pod každou kapitolou, která obsahovala jednotlivé díličí výsledky. Z výsledků vyplývá, že nástroje všech 3 dodavatelů obstály velmi dobře a všechny lze pro daný účel, tj. vyvrtávání vysoce přesných otvorů, s úspěchem použít. Mezi jednotlivými konkurenty byly zjištěny malé rozdíly, které neznamenaají sníženou funkčnost nástroje. Tato disertační práce se věnuje integritě povrchu a zde se již projeví výraznější rozdíly. To přesně vystihuje komplexnost integrity povrchu. Z hlediska trvanlivosti a přesnosti vyvrtaného otvoru nebyly zjištěny větší odlišnosti, avšak v komplexním hodnocení integrity povrchu byly tyto rozdíly výrazné. Zůstává otázkou, zda uživatel docení i změnu struktury a další změny, které mají dopad především do užitečných vlastností obrobku, jako je např. zvýšená mez únavy, vyšší odolnost proti korozi.

V případě nástroje určeného pro materiál C45 byly vyhodnoceny povrchové morfologie a mikrostruktura. Dále bylo vyhodnoceno kontaktní namáhání metodou Impact test.

Na katedře byl proveden experiment s RTG difrakcí v otvorech na materiálu C45. V tomto se prokázalo, že velikost zbytkových napětí se značně mění s azimutem měření a liší se v závislosti na poloze měření v otvoru. Zde bylo zjištěno, že zbytková napětí jsou vyšší na konci otvoru, než na začátku (viz tab. 3-2–3-4). Proto není snadno vyhodnotitelný vliv těchto

zbytkových napětí na výslednou integritu povrchu. Z měření se potvrdil velmi důležitý poznatek, že více než konkrétní hodnota zbytkového napětí je důležité, jak bylo této hodnoty v materiálu dosaženo, jaký proces vyvolal toto zbytkové napětí. Rovněž se prokázal vliv struktury. Právě u oceli C45 se projevil vliv heterogenní struktury perlit – ferit, přičemž každá struktura reaguje na obrábění zcela odlišně a proto jsou i odlišné hodnoty zbytkových napětí. U ostatních materiálů byla RTG difrakční měření zbytkových napětí provedena, avšak výsledky nebyly dostatečně přesvědčivé a to opět dosvědčuje skutečnost, že omezovat integritu povrchu pouze na číselné údaje zbytkových napětí je nedostatečné, avšak v praxi často prováděné.

Impact test u oceli C45 neprokázal příliš velké rozdíly. Z vyhodnocení komplexního testu C 45 vyplynulo, že nejlépe v ostatních testech obstál nástroj O. Zajímavý rozdíl se projevil při vyhodnocení morfologií, kde naopak nejlépe obstál nástroj Hoffmeister.

U vyhodnocení otvorů vytvořených v hliníkové slitině AW 6082 bylo překvapivé, že i v tomto materiálu vznikla dobře měřitelná protvářená vrstva, vzhledem k charakteru materiálu není však jasné, jak velký příspěvek k životnosti obrobku může představovat toto zpevnění. Jako nejlepší byl shledán nástroj O, který vykazoval nejlepší výsledky, co se týče zpevnění. Nejhůře dopadl nástroj R. V případě otvorů vrtaných nástrojem Hoffmeister se projevila značná tepelná degradace materiálu.

Vyhodnocení otvorů vytvořených v materiálu GG 20 vychází ze skutečnosti, že litina je heterogenní a zpevněná vrstva bude ovlivněna grafitovými lupínky. Prokázalo se, že integrita povrchu je lepší průchodem tvářecího elementu (součást řezného nástroje Hoffmeister) přes povrch, kdy dochází k zahlazování otvorů vzniklých po vytrhaném grafitu. Konstrukce nástrojů ani řešení řezných podmínek nebylo součástí této disertační práce, ale ukazuje se, že v případě obrábění šedé litiny má tvářecí účinek multifunkčního nástroje pozitivní vliv na výsledný obrobený povrch a tím pádem i na užité vlastnosti.

U vyhodnocení otvorů vytvořených v materiálu nástrojové oceli D3 bylo patrné, že při vrtání dochází ke značnému tepelnému ovlivnění mikrostruktury. Vyvrtáním speciálními nástroji tak lze docílit jak popuštění struktury, tak i její znovuzakalení. Toto zjištění plně odpovídá charakteru integrity povrchu, která hodnotí komplexní dopad povrchu na užité vlastnosti.

## Závěr

Integrita povrchu hraje velmi důležitou roli při posuzování kvality vyráběných strojních součástí. Zatím však není tomuto tématu v praxi věnována dostatečná pozornost. Výjimkou je pouze výroba vysoce namáhaných komponent leteckého průmyslu, kde je oproti běžným komponentům vyžadována maximální bezpečnost. Je to vyvoláno využíváním speciálních komplexně legovaných slitin typu Inconel, nebo Hastalloy. Tyto slitiny jsou velmi obtížně obrobitelné z důvodu velmi silného zpevňování povrchu a velmi nízké tepelné vodivosti. Při nevhodném způsobu obrábění se u těchto superslitin tvoří podpovrchová bílá vrstvička materiálu. Vyrobené díly, u kterých je tato závada zjištěna, nesmí být použity, neboť vzniklá povrchová struktura (i morfologie) snižuje spolehlivost a únavovou životnost. Při výrobě součástí letadel jsou klíčové komponenty z Al slitin, ze kterých je dosud vyráběna většina komponentů trupu a křídel. Již při výrobě je nutno velmi důsledně kontrolovat, zda se na povrchu nevyskytují nadměrná povrchová poškození, která by mohla představovat budoucí rizikové místo pro vznik únavové poškození a tím i možnost havárie. Je zde řešen i problém integrity povrchu šedých litin. Je nutno vzít v úvahu, že vlastnosti šedé litiny se značně mění v závislosti na chemickém složení, které je často velmi rozdílné v závislosti na slévárně. Parametry integrity povrchu lze ovlivnit zejména parametry obrábění. V disertační práci byla nastíněna možnost nekonvenčního ovlivnění integrity povrchu pomocí elektrochemického nanášení vrstvy Fe, což by mohlo nabídnout velmi snadnou nápravu potřhaného povrchu litiny v důsledku nevhodného obrábění. Pomocí této metody lze i přidat na obrobený povrch řízeně vrstvu v řádu mikrometrů materiálu, pokud jsou změřeny jako mimo přijatelný toleranční rozsah, což by mohla být přijatelná a levná alternativa mikronávarů, navíc by touto metodou bylo možno opravit i otvory malých průměrů, nebo hluboké otvory, které by ani opravit nebylo možné. Toto by mohlo být užitečné (nejen) v případě šedé litiny, kdy grafitické částice vystupují na povrch. Toto může být problém zejména v případě pokovení, kdy grafit brání vytvoření vrstvy a vznikají nepokovené oblasti.

Jak vyplývá z této práce, není, za již současného technického vybavení, problém získat data, která jsou vyžadována. Problém spočívá zejména v jejich vyhodnocení, tj. v přidělení významu jednotlivých parametrů a rozhodnutí, jak jednotlivě i ve vzájemné interakci přispívají k výsledným vlastnostem a jak se tyto projeví v aplikační sféře změnou užitečných vlastností. Problém integrity povrchu spočívá zejména v tom, že výsledky nejsou vždy jednoznačně interpretovatelné. Je předpoklad, že plné zavedení komplexního hodnocení povrchu bude trvat mnoho let, jedná se však zřejmě o proces nutný. Jistou výhodou lze spatřit v konkurenčním mezifiremním boji, neboť kvalitní povrch má vazbu na užitečné vlastnosti. Na druhou stranu 100% kontrola nebude zřejmě taktéž možná a je nutno vzít v úvahu, že toto znamená určitou časovou ztrátu a dodatečné náklady, které je posléze nutno promítnout do koncové ceny výrobku.

## 9 Citovaná literatura

- [1] Vnouček, M. Hodnocení tenkých vrstev - nitridická vrstva substrátových systémů. In Metal 2008. Ostrava: Tanger, 2008. s. 1-7. ISBN: 978-80-254-1987-8
- [2] KŘÍŽ, A. Komplexní vlastnosti řezných nástrojů s tenkými vrstvami nitridů kovů. Habilitační práce, ZČU Plzeň, 2004
- [3] Hammer, J. Únava materiálu, (Učební testy) VUT v Brně, dostupné online na: [http://www.ing-vladimir-hammer.cz/unava\\_materialu.html](http://www.ing-vladimir-hammer.cz/unava_materialu.html)
- [4] Klesnil, M., Lukáš, P., Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání, Academia, Praha 1975. 222 s.
- [5] Mojrová B., Měření vázaného náboje pomocí povrchového napětí, Závěrečná práce VUTBR 2011, dostupné online na: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=42260](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=42260)
- [6] DAVIM, J.Paulo. Surface integrity in machining. London : Springer, 2010. ISBN 978848828735, s 10-25
- [7] A. W. Batchelor, Loh Nee Lam, M. Chandrasekaran, Materials – Degradation and Control by surface engineering. Imperial College Press 2002, ISBN 1-86094-334-9
- [8] A. Warhadpande, F Sadegh, Effects of surface defects on rolling contact fatigue of heavily loaded lubricated contacts, School of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA, 04/2010
- [9] Stephenson D.J. Surface Integrity Control During The Precision Machining Of Brittle Materials, AZojomo (ISSN 1833-122X) Volume 2 March 2006 dostupné online na: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=3339>
- [10] Kang, Y. S., Sadeghi, F., and Hoeprich, M. R. A finite element model for spherical debris denting in heavily loaded contacts. J. Tribol., 2004, 126, 71–80.

- [11] Fiala, J., Kraus, V., Povrchy a rozhraní, NTC ZČU 01/2009, dostupné online na: <http://www.xray.cz/xray/csca/kol2009/abst/fiala.htm>
- [12] Kunz J, Aplikovaná lomová mechanika, FJFI ČVUT v Praze, 10/2005, ISBN: 80-01-03306-6
- [13] Neuber H. – Kerbspannunglehre. 1. Auflage Berlin-Heidelberg, Springer Verlag 1937. 2. Auflage. Berlin-Heidelberg, Springer-Verlag 1958, 3 völlig neubearbeitete zbe erweiterte Auflage. Berlin, Akademie-Verlag 191985. Anglický překlad: Theory of Notch Stresses, London, J.W.Edwards 1946. Ruský překlad: Koncentracija naprjaženij Moskva, Gostěchizdat 1947
- [14] Kolařík, K., Ganev, N., Barcal, J. Analýza zbytkové napjatosti vysokopevnostní slitiny Inconel 718 po elektroerozivním obrábění, FJFI ČVUT v Praze 1/2005, dostupné online na: [www.xray.cz/ms/bul2005-2/kolarik.pdf](http://www.xray.cz/ms/bul2005-2/kolarik.pdf)
- [15] Winter P., Ecoroll Válečkování povrchu, (firemní materiály fy. Escoroll) dostupné online na : [www.winter-servis.cz](http://www.winter-servis.cz)
- [16] Havelka T., Obrábění válečkováním, Kód článku: 040497 Vyšlo v MM : 2004 / 4, 14.04.2004 v rubrice Trendy / Obrábění, Strana 28, dostupné online na: <http://www.mmspektrum.com/clanek/obrabenivaleckovanim.html>
- [17] VAJSKEBR J. ŠPETA Z. Dokončování a zpevňování povrchu strojních součástí válečkováním. Praha: SNTL 1984.
- [18] Gao N, R. S. Dwyer-Joyce ,J. H. Beynon, Department of Mechanical Engineering University of Sheffield, Mappin Street, S1 3JD, UK, 1988
- [19] M. Kiyak, O. Cakir, Examination of machining parameters on surface roughness in EDM of tool steel, Journal of Materials Processing Technology 191 (2007) s. 141-144.
- [20] Neslušán M, Turek S., Brychta J., Čep. R, Tabaček M., Experimentálne metody v trieskovom obrábaní, EDIS Žilina, 2007. ISBN 978-80-8070-711-8 s.21 - 51
- [21] Rogl M., Měření zbytkových napětí, výzkumná zpráva, KMM, ZČU Plzeň, 2008
- [22] Rogl M., Kříž A: Stav povrchu válečkových vzorků – ocel 12050 Baublies Stav materiálu pro válečkové elementy a jejich povrc, 09/2008, výzkumná zpráva ZČU Plzeň

- [23] Ferreira J. C., A study of die helical thread cavity surface finish made by Cu-W electrodes with planetary EDM, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 30 (2006) 1-13.
- [24] Titanium: A Technical Guide (1988), ASM International, Materials Park, OH, 44073-0002, page 75-85
- [25] W. Grzesik a - J. Rech - T. Wanat, Surface integrity of hardened steel parts in hybrid machining operations, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Volume 18, Issue 1-2 09-10/2006 dostupné online na: [http://www.journalamme.org/papers\\_amme06/178.pdf](http://www.journalamme.org/papers_amme06/178.pdf)
- [26] F. Klocke, E. Brinksmeier, K. Weinert, Capability profile of hard cutting and grinding processes, *CIRP Annals* 54/2 (2005) 557-580.
- [27] W Grzesik, T. Wanat, Comparative assessment of surface roughness produced by hard machining with mixed ceramic tools including 2D and 3D analysis, *Journal of Materials Processing Technology* 169 (2005) 364-371.
- [28] P. N. Blake and R. O. Scattergood, "Ductile Regime Machining of Germanium and Silicon", *Journal Am. Ceram. Soc.*, 73 (1990) 949-957.
- [29] B. R. Lawn and D B Marshall. Hardness, "Toughness and Brittleness: An Indentation Analysis", *Journal Am. Ceram. Soc.*, 62 (1979) 347-349.
- [30] M. Boujelbene, E. Bayraktar, W. Tebni, S. Ben Salem, Influence of machining parameters on the surface integrity in electrical discharge machining, *Archives of Materials Science and Engineering* (06/2009) dostupné online na: [http://www.archivesmse.org/vol37\\_2/3726.pdf](http://www.archivesmse.org/vol37_2/3726.pdf)
- [31] Asit Kumar Khanra, L.C. Pathak, M.M. Godkhindi, Microanalysis of debris formed during electrical discharge machining (EDM), *Journal of Materials Science* 42 (2007) 872-877.
- [32] kolektiv odborníků firmy Makino, Technological Improvements Increase EDM Surface Integrity for Viable Aerospace Production, 2009, online dostupné na: <http://www.radical-departures.net/articles/advances-in-edm-for-aerospace/>



- [33] Štupl K, Košťál A. Technologie zpracování kovových materiálů, FS ČVUT v Praze, 1990, ISBN: 978-80-89244-38-6 s. 32-35
- [34] G. Gurinovich , From Grinding of Inconel Problems, St. Peterburg , 08/2011 (expertní forum) dostupné online na <http://www.finishing.com/199/19.shtml>
- [35] BUMBÁLEK, Bohumil. Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci. příspěvek na: Kvalita a Geometrické specifikace produktů. 2005.
- [36] norma ANSI B211.1 – 1986
- [37] Online materiály VŠCHT věnované měření povrchového napětí, dostupné na: [http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid\\_es-01/hesla/mereni\\_povrchoveho\\_a\\_mezifazoveho\\_napeti.html](http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-01/hesla/mereni_povrchoveho_a_mezifazoveho_napeti.html)
- [38] J. D. Berry, M. J. Neeson, R. R. Dagastine, D. Y.C. Chan, R. F. Tabor, Measurement of surface and interfacial tension using pendant drop tensiometry, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 454, 09/2015, s 226–237
- [39] Cleg C. Surface tensions, Overview of Methods, 05/2009, materiály dostupné online na: [http://www.ramehart.com/newsletters/2009-05\\_news.htm](http://www.ramehart.com/newsletters/2009-05_news.htm)
- [40] W. Patterson und F. Iske: Zusammenhang zwischen den mechanischen Eigenschaften im Gußstück und im getrennt gegossenen Probestab. Giesserei, techn.-wiss. Beih., Nr. 22, Sept. 1958, S. 1147–1169; vgl. Giesserei 45 (1958) Nr. 21, . 649; Nr. 22, S. 665; vgl. Giesserei-Kalender 1959, S. 118–121.
- [41] Cope M.: High Speed Machining: it's more than just a faster spindle, 31/1, 2013: Dostupné online na: <http://blog.hurco.com/blog/bid/214906/High-Speed-Machining-it-s-more-than-just-a-faster-spindle>
- [42] Vlasák Z. Materiály VŠCHT k elektrochemii. dostupné online na: [http://www.vscht.cz/ktt/studium/predmety/lae/elektro\\_metody.pdf](http://www.vscht.cz/ktt/studium/predmety/lae/elektro_metody.pdf)
- [43] Materiály VŠCHT k metodě elektrické Impedanční spektroskopii , dostupné online na: [www.vscht.cz/kat/download/lab\\_eis.doc](http://www.vscht.cz/kat/download/lab_eis.doc)

- [44] Novák Z., Výkonné řezné nástroje, MM Spectrum 120330 3/ 2012, s. 66  
dostupné online na: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vykonne-rezne-nastroje.html>
- [45] Šimeček J., Kříž. A, Chocholatý O, Kolařík K., Impact resistance of Ni-coatings. Článek na konferenci Metal 2015, Tanger Brno 05/2015, ISBN: 978-80-87294-62-8, s 68-70
- [46] Škeřík J., Technický receptář, FCC Public, 1999, ISBN 80-901985-6-2, s. 102
- [47] Chemické niklování. Materiály firmy Bomex. Online dostupné na:  
<http://www.bomex.cz/cz/3-technologie/7-chemicke-niklovani.html>
- [48] Obr L., Nové poznatky v technologii chemického niklování, Atotech CZ, a.s., dostupné online na: [http://www.atotech.com/data/cz/chemicky\\_nikl.pdf](http://www.atotech.com/data/cz/chemicky_nikl.pdf)
- [49] NiKlad Ice Ultra process, Mac Dermid New Hudson Technical Centre. November 2009
- [50] Taina F. Pasqualon M. Velay V. Delagnes D. Lours P., Effect of the lcf loading cycle characteristics on the fatigue life of inconel 718 at high temperature, in 7th International Symposium on Superalloy 718 and derivatives, 01/2010, DOI: 10.1002/9781118495223.ch68

