



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

HODNOCENÍ PRŮBĚHU SILOVÉHO ZATÍŽENÍ PŘI VYSTRUŽOVÁNÍ ZA POUŽITÍ MODERNÍCH VYSTRUŽOVACÍCH HLAVIC MT3 V ZÁVISLOSTI NA INTEGRITĚ POVRCHU

EVALUATION OF FORCE LOAD PROCEDURE WHILE REAMING WITH MODERN REAMING
HEADS MT3 IN DEPENDENCE ON SURFACE INTEGRITY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MARTIN CHLUP

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARTIN SLANÝ

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Martin Chlup

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

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

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

Hodnocení průběhu silového zatížení při vystružování za použití moderních vystružovacích hlavic MT3 v závislosti na integritě povrchu

v anglickém jazyce:

Evaluation of force load procedure while reaming with modern reaming heads MT3 in dependence on surface integrity

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zaměřuje na vystružovací operaci, za využití vysoce produktivních vystružovacích hlavic MT3 firmy HAM-FINAL. Na základě naměřených hodnot silového zatížení budou sledovány zvolené vlastnosti a parametry nově vzniklého povrchu.

Cíle diplomové práce:

Student by se měl seznámit s problematikou vysoce produktivního přesného vystružování za využití moderních vystružovacích MT3 hlavic fy HAM-FINAL a zhodnotit vliv silového zatížení povrchu při obrábění v závislosti na integritě povrchu. Výsledky pak zhodnotit v závěru práce.

Seznam odborné literatury:

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

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

SHAW, MILTON C. Metal Cutting Principles. New York, Oxord : OXFORD UNIVERSITY PRESS, 2005.

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

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

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

Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Slaný

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 25.11.2010

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Licenční smlouva

ABSTRAKT

Diplomová práce řeší problematiku hodnocení průběhu silového zatížení při použití vystružovací hlavice MT3 v závislosti na vybraných kritériích integrity obrobené plochy díry. Rozborem průběhu silového zatížení je možno eliminovat některé nechtěné jevy při vystružování. Tyto negativní jevy mají vliv jak na samotný nástroj např. jeho dřívější opotřebení, tak i na defekty nově vytvořené díry.

Klíčová slova

Vystružovací nástroje, nástrojové materiály, povlaky, integrita vystružené díry, posuvová síla, řezný moment.

ABSTRACT

The diploma work deals with the evaluation of force load procedure problems when using reaming head MT3 depending on selected criteria of surface integrity of machined hole. It is possible to eliminate some unwanted elements when reaming by force load procedure analysis. These negative elements can influence both the tool e.g. its previous wear and the defect of a newly made hole.

Key words

Reaming tools, tool materials, coatings, integrity reaming holes, feed force, cutting torque.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CHLUP, M. *Hodnocení průběhu silového zatížení při vystružování za použití moderních vystružovacích hlavic MT3 v závislosti na integritě povrchu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 59 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Slaný.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „**Hodnocení průběhu silového zatížení při vystružování za použití moderních vystružovacích hlavic MT3 v závislosti na integritě povrchu**“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

.....
Bc. Martin Chlup

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Martinu Slanému, firmě *HAM-FINAL*, firmě *HANAKOV*, Ing. Josefu Bednáři, Ph.D. za cenné připomínky, rady a ochotu pomoci při vypracování diplomové práce.

OBSAH

Abstrakt	4
Prohlášení	5
Poděkování	6
Obsah	7
Úvod	8
1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY VYSOKOPRODUKTIVNÍCH NÁSTROJŮ PRO VYSTRUŽOVÁNÍ	10
1.1 Srovnání konstrukčních řešení vybraných moderních vystružovacích nástrojů.....	10
1.2 Standardní nástrojové materiály využívané pro jednotlivé části vybraných výstružovacích nástrojů.....	13
1.2.1 Aplikace a charakteristika slinutých karbidů v oblasti vystružování.....	13
1.2.2 Aplikace a charakteristika cermetů v oblasti vystružování.....	14
1.3 PVD povlaky a jejich praktické zhodnocení dosažených parametrů při vystružování	15
1.3.1 Specifikace PVD povlaků na bázi <i>TiAlN</i>	15
1.3.1.1 Nanokompozitní povlaky <i>TiAlN</i> s firemním označením TINALOX SN ² , HSN ² , HYPERLOX	16
2 ANALÝZA INTEGRITY POVRCHU	17
2.1 Povrchové napětí.....	17
2.2 Textura povrchu.....	18
2.2.1 Hodnocení drsnosti povrchu dle normy DIN EN ISO 4287	18
2.2.1.1 Hloubka vlny profilu W_t	18
2.2.1.2 Střední hodnoty drsnosti R_a, R_q	19
2.2.1.3 Hloubka drsnosti R_z, R_{zi}, R_{max}	19
2.2.1.4 Sklon R_{sk} a strmost R_{ku} profilu	20
2.2.1.5 Materiálový podíl R_{mr}	20
2.2.1.6 Střední šířka rýh R_{sm} a střední stoupání profilu $R_{\Delta q}$	21
2.2.2 Geometrické vyjádření drsnosti povrchu z tvaru břitu vyvrtávací tyče, jakožto operace předcházející vystružování.....	21
2.2.3 Geometrické vyjádření povrchu po vystružení.....	24
2.3 Změny strukturního stavu povrchu po obrobení	25
2.4 Hodnocení mikrotvrdosti.....	26
2.4.1 Mikrotvrdost dle Vickerse	26
2.4.2 Mikrotvrdost dle Knoopu	27
2.5 Deformační zpevnění povrchu	27
2.6 Defekty povrchové vrstvy	28
2.7 Geometrické tolerance obrobené díry	29

3 ROZBOR A PŮSOBNÍ SIL PŘI OBRÁBĚNÍ	29
3.1 Silové zatížení při ortogonálním řezání	30
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST-HODNOCENÍ ŘEZNÝCH SIL V ZÁVISLOSTI NA INTEGRITĚ POVRCHU	32
4.1 Analýza silového účinku vystružovací hlavice MT3	32
4.1.1 Popis experimentu	33
4.1.2 Vzorek pro testování.....	34
4.1.3 Přípravek pro upínání vzorků.....	34
4.1.4 Stroj pro provedení experimentu	35
4.1.5 Nástroje pro provedení experimentu	36
4.1.6 Hodnocení průběhu posuvové síly a řezného momentu z naměřených dat.....	36
4.1.7 Srovnání silového, momentového zatížení u nového a pak následně opotřebeného nástroje MT3 v plném vytížení.....	39
4.2 Analýza vybraných parametrů integrity povrchu u vzorků vyrobených novým a pak následně opotřebeného nástroje MT3.....	46
4.2.1 Dosažená kruhovitosť a válcovitosť vzorků	46
4.2.2 Dosažená textura vzorků	49
4.2.3 Mikrostruktura povrchu vzorků.....	52
Závěr	53
Seznam použitých zdrojů	54
Seznam použitých zkratk a symbolů	57
Seznam příloh	59

ÚVOD

Stejně jako i v jiných oblastech, strojírenství od svého počátku prodělalo značné pokroky. Jak v oblastech materiálů, konstrukce strojů a nástrojů či zapojením výpočetních technologií do procesu.

V oblasti strojírenské výroby je neustále kladen důraz na zkracování výrobních časů, snižování nákladů na výrobu a stejně tak i zvyšování jakosti vyrobených součástí. Všechny tyto aspekty nutí oblast strojírenské technologie neustále vyvíjet nové řezné materiály, konstrukci nástrojů, druhy povlaků a jejich technologii nanášení jak dané procesy optimalizovat.

Vystružování patří mezi dokončovací operaci, která je nedílnou součástí mnoha vyrobených součástí, vyžadující vysokou přesnost. Na trhu je značné množství různých typů moderních vysokoproduktivních nástrojů, kde každý výrobce se snaží zhotovit nástroj s nejlepšími výsledky při obrábění za nejkratší možný čas.

Firma *HAM-FINAL*, s.r.o. začala v roce 2006 vyvíjet první prototyp vystružovací hlavice MT3. Práce prováděné na nástroji by se daly rozčlenit do čtyř etap. První fáze projektu se týkala designu prototypu, druhá výroba prototypu, třetí zahrnovala testování prototypu a poslední jeho vyhodnocení. Při řešení projektu byly vytyčeny hlavní cíle práce, které se týkaly funkční konstrukce a geometrie nástroje v návaznosti na parametrech obrobené díry.

V roce 2007 byl společností vyroben druhý prototyp se stejným sledem etap vývoje jako v roce 2006. Tentokrát byl ovšem vývoj zaměřen na zvýšení životnosti nástroje, který se rozdělil do dvou sektorů. První sektor se zabýval aplikací nových povlaků, druhý úpravou geometrie. Blíže o této problematice bude pojednáno v následujících kapitolách.

Zpracování TPV dokumentace, zavedení do sériové výroby, vypracování technicko-ekonomické dokumentace, uvedení na trh, oponentura a následné ukončení projektu. Všechny tyto kritéria byly naplní roku 2008, kde ještě pokračovaly testy, ale zaměřené již na konkrétní požadavky zákazníka. Firma *HAM-FINAL* je vlastníkem patentu vystružovací hlavice MT3.¹

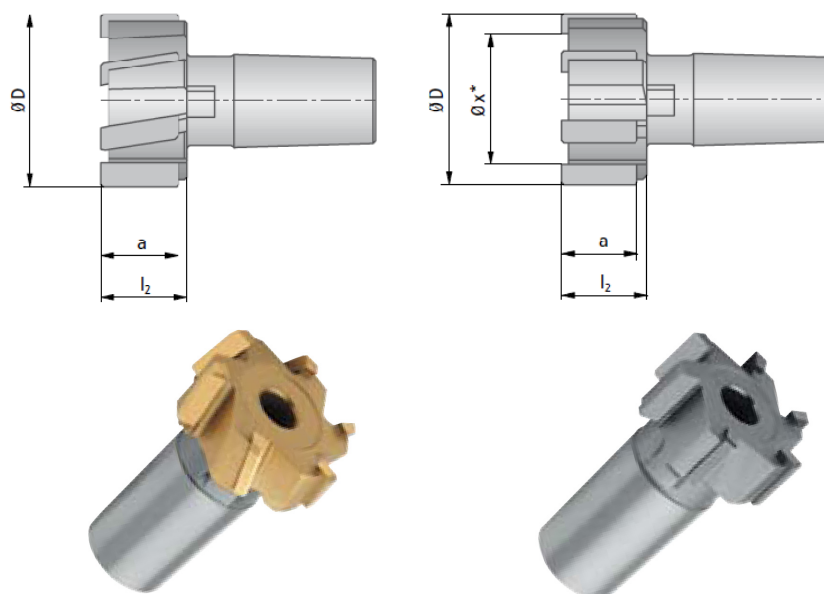
1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY VYSOKOPRODUKTIVNÍCH NÁSTROJŮ PRO VYSTRUŽOVÁNÍ

V současnosti je na trhu značné množství vystružovacích nástrojů. Mohou se rozdělit např. dle tvaru plochy řezné části, způsobu upnutí, konstrukce nástroje, použití, aplikací řezných materiálů atd. Kapitola 1.1 pojednává o typově příbuzných nástrojích pro operaci vysokoproduktivního vystružování.

1.1 Srovnání konstrukčních řešení vybraných moderních vystružovacích nástrojů

Někteří výrobci řezných nástrojů přišli na trh s konstrukčním řešením výstružníků, které využívá kombinaci zubů s břity a vodítek. Každý výrobce využívá rozdílnou konstrukci nástrojů, počet zubů a vodítek. Následující rozdělení představuje výstružníky typově podobných jako vystružovací hlavice MT3 u vybraných výrobců.

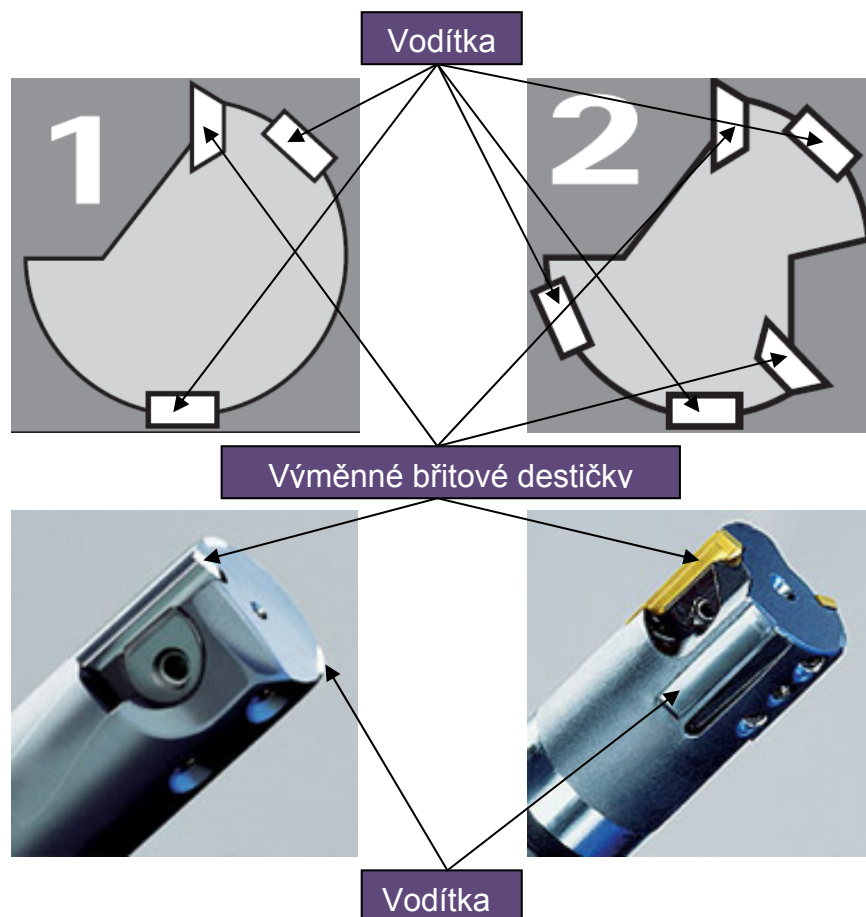
- Firma *DIHART* vyrábí kromě jiného také výstružník s výměnnou vystružovací hlavicí a pájenými břitovými destičkami. Uvádí se ve dvou provedení – s přímými nebo šikmými zuby (viz. obr. 1.1). Obě varianty obsahují šest zubů. Jako výhody se uvádí jednoduchá manipulace a krátký čas výměny nástroje, možnost aplikace všech držáků řezných hlav a možnost nového osazení do držáku nástroje. Nevýhoda spočívá z konstrukčního hlediska v použití sudého počtu břitů, kdy při výrobě může dojít k nesymetrickému nabroušení párů břitů proti sobě vůči ideální opsané kružnici.



Obr. 1.1 Výměnná řezná hlava s přímými a šikmými zuby firmy²

Nástrojové materiály používané pro tyto vystružovací nástroje jsou běžně na bázi CERMETU nebo slinutých karbidů se složením $WC + Co + TaC.NbC$. Uváděná přesnost je v rozmezí od IT5 až IT6. Na řezné části jsou aplikované povlaky na bázi TiN , $TiAlN$, popřípadě speciální kombinací CERMETU a vrstvou povlaku označenou obchodním názvem DBG.²

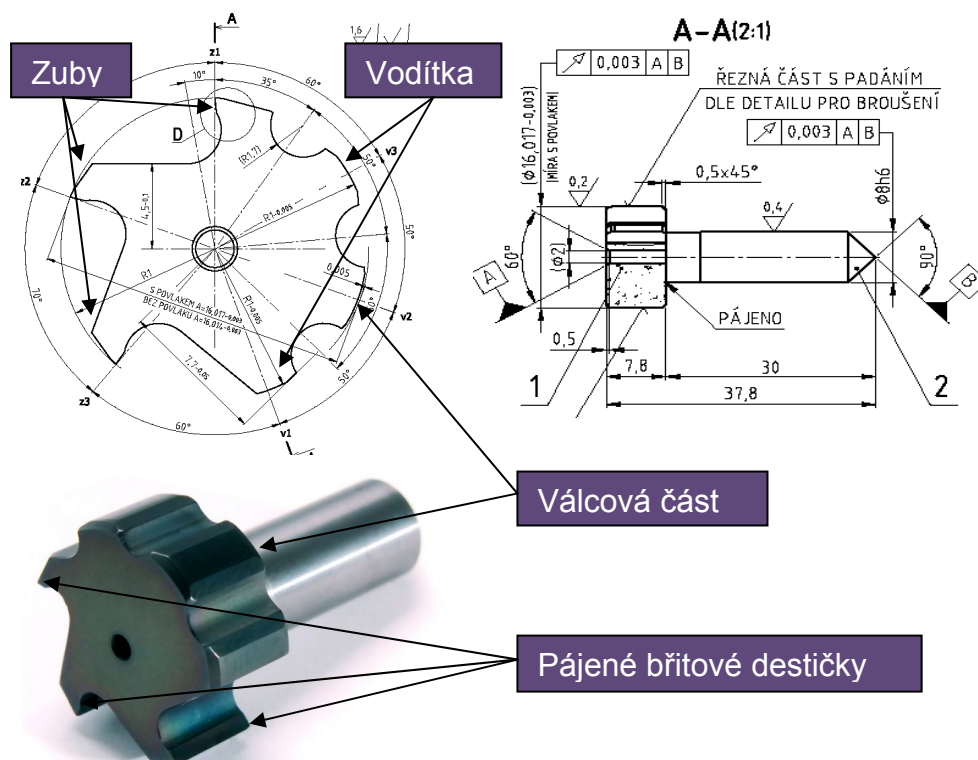
- Atypickou konstrukci výstružníků zvolila firma MAPAL, která nabízí výstružníky v kombinaci jednoho břitu, dvou vodítek nebo dvou břitů a tří vodítek (viz. obr. 1.2). Oba typy nástrojů využívají vyměnitelné břitové destičky s označením tvaru *L* a *H*. Mezi nevýhody patří např. nutnost seřizovat vyměnitelné břitové destičky. Naopak mezi výhody patří možnost snadného nahrazení vyměnitelných břitových destiček a vodítek nástroje. Další kladná vlastnost spočívá v lichém počtu třecích a řezných elementů, které zajišťují jednoznačné vedení nástroje při řezném procesu. Nejvyšší přesnost až IT5-IT6 dosahuje jednobřitý nástroj, jelikož toleranční pole jednoho břitu není ovlivněno ostatními odchylkami břitů dalších.



Obr. 1.2 Konstrukce nástrojů MAPAL³

Chlazení je realizováno vnitřkem nástroje k jednotlivým zubům a vodítkům nebo vyústuje na čele nástroje. Jako standardní řezné materiály jsou používány povlakové slinuté karbidy nebo cermety.³

- Vysokoproduktivní vystružovací nástroj s označením MT3 vyvinula firma *HAM-FINAL*. Jedná se o výměnnou vystružovací hlavici obsahující tři zuby a dvě vodítka (viz. obr. 1.3). Vodítka zmírňují vibrace nástroje při řezném procesu a podporují zuby v řezu. Hlavici není nutno seřizovat, jelikož je tepelně upnutá v tělese nástroje. Užitím technologie tepelného upnutí je dosaženo snadnosti a rychlejší výměny řezné části nástroje se stejnými parametry dosahovaných při použití vyměnitelných břitových destiček. Mezi vodítky je válcová plocha zajišťující kontrolu vystružené díry, která má současně funkci technologické základny. Výstružník je schopen pracovat s přesností IT5-IT6 s hodnotou drsnosti od $R_a = 0,2 \mu\text{m}$. Chladicí kapalina je stejně jako v předchozím případě přiváděna vnitřkem držáku vyměnitelné řezné hlavice, dále se rozšiřuje k jednotlivým zubům a vodítkům po obvodě. Hlavice je konstruována s pájenými břitovými destičkami nebo jako monolit (bude využit v experimentální části) s využitím slinutých karbidů a CERMETU. Na řezné materiály jsou nanášeny povlaky typu $AlTiSiN$, $TiAlN$ a jiné. U novějších typů jsou využity supertvrdé řezné materiály jako je KNB (kubický nitrid boru) a PKD (polykrystalický diamant).⁴

Obr. 1.3 Vystružovací hlavice MT3 pro $\phi 16,017^1$

Tabulky řezných podmínek výše zmíněných výstružníků *DIHART* a *MAPAL* jsou uvedeny v přílohách diplomové práce. Firma *HAM-FINAL* řezné podmínky pro vystružovací hlavici MT3 volně v katalogu neuvádí, jelikož firma řeší technologii přímo s odběratelem nástroje.

1.2 Standardní nástrojové materiály využívané pro jednotlivé části vybraných vystružovacích nástrojů

Na vysokoproduktivní vystružovací nástroje jsou kladeny vysoké nároky a to především na rozměrové, geometrické, mechanické parametry a chemicko-fyzikální vlastnosti. Při konstrukci nástroje se vychází jak z hlediska technologického tak i ekonomického, v jaké části nástroje materiál využít.

1.2.1 Aplikace a charakteristika slinutých karbidů v oblasti vystružování

Karbidy jsou binárními sloučeninami uhlíku s kovy. Připravují se reakcí uhlíku s kovy nebo jejich oxidy (2000 °C), interakcí zahřátého kovu s uhlovodíky nebo reakcí alkalických kovů s acetylenem v kapalném amoniaku. Karbidy mají rozlišnou strukturu, tudíž se rozdělují do čtyř skupin.

Slinuté karbidy pro řeznou část se dělí do šesti skupin – *P* (modrá), *M* (žlutá), *K* (červená), *N* (zelená), *S* (hnědá) a *H* (tmavošedá). Vzhledem ke svému složení jsou nepovlakované slinuté karbidy někdy též označovány jako jednodobidové (*K*), dvojkarbidové (*P*) a vícekarbidové (*M*). Jednotlivé vlastnosti, složení, označení a použití znázorňuje tabulka 1.1.⁵

Tab. 1.1 Charakteristika slinutých karbidů⁵

Skupina	Složení a typ obráběného materiálu	Barva pro označení
K	$WC (87\div 92) \% + Co^* (4\div 12) \% + (TaC.NbC)$ Pro materiály s krátkou drobnou třískou (zejména pro šedé litiny, neželezné slitiny a nekovové materiály).	červená
M	$WC (79\div 84) \% + TiC (5\div 10) \% + TaC.NbC (4\div 7) \% + Co (6\div 15) \%$ Univerzální použití pro materiály s dlouhou a střední třískou (lité oceli, austenitické korozivzdorné oceli a tvárné litiny).	žlutá
P	$WC (30\div 82) \% + TiC (8\div 64) \% + Co^* (5\div 17) \% + (TaC.NbC)$ Pro materiály s dlouhou třískou (uhlíkové oceli, slitinové oceli a feritické korozivzdorné oceli).	modrá
N	Pro obrábění neželezných slitin na bázi hliníku, hořčíku nebo mědi, obrábění plastů, kompozitů a dřeva	zelená
S	Pro obrábění slitin titanu a žárovevých slitin na bázi niklu, kobaltu nebo železa	hnědá
H	Pro obrábění zušlechťených a kalených ocelí a obrábění tvrzených litin	tmavošedá

Pozn.: *Co a Ni – je využito jako pojivo pro jednotlivé karbidy⁷

Slinuté karbidy na bázi WC+Co jsou také aplikovány pro vystružovací hlavici MT3, kde obrobek – polotovar obsahuje 75 % WC a 25 % Co.⁶ Při obsahu 25 % Co není vhodné, je využívat materiál pro řeznou část, ale pouze pro výměnou hlavici, do které budou zasazeny pájené řezné destičky, např. z cermetů s vyššími mechanickými parametry. Vliv poměru WC a Co má vliv na mechanické vlastnosti materiálu. Tabulka 1.2 ukazuje, že při vyšším podílu pojiva Co klesá tvrdost, modul pružnosti v tahu, měrná hmotnost a pevnost v tlaku. Ovšem narůstá pevnost v ohybu.⁸

Tab. 1.2 Složení a vlastnosti slinutých karbidů WC-Co⁸

Složení [hm. %]		Měrná hmotnost [g·cm ⁻³]	Tvrdost		Pevnost v ohybu [MPa]	Pevnost v tlaku [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]
WC	Co		[HRA]	[HV]			
97	3	15,1÷15,2	90÷93	1600÷1700	1000÷1200	5900	670
94÷94,5 ¹⁾	5,5÷6	14,8÷15,0	90÷91	1500÷1600	1600÷1800	5000	620
91	9	14,5÷14,7	89÷91	1400÷1500	1500÷1900	4800	590
89	11	14,0÷14,3	88÷90	1300÷1400	1600÷2000	4600	580
85	15	13,8÷14,0	86÷88	1150÷1250	1800÷2200	3900	540
75	25	12,8÷13,0	82÷84	900÷1000	2000÷2800 ²⁾	3200	440

Pozn.: 1) hrubozrnná fáze WC, 2÷4 μm; 2) výrazně závisí na velikosti zrna a změnách v obsahu uhlíku

1.2.2 Aplikace a charakteristika cermetů v oblasti vystružování

Zkratka cermet je složena z dvou anglických slov, ceramic (keramika) a metal (kov), což jsou dvě základní složky tohoto řezného materiálu. Keramická složka je tvořena karbidy, nitridy a karbonitridy *Ti*, *Mo*, *W*, *Ta*, *Nb*, *V*, *Al* a jejich tuhé roztoky s *TiN* jako hlavní složkou. Kovovou matici tvoří nikl legovaný kobaltem nebo molybdenem a složky keramické fáze.²⁵

Odolnost proti opotřebení a korozi, zaručené karbidickými a nitridickými fázemi, jsou kombinovány s vyšší houževnatostí kovové složky.²⁵ Hlavní výhoda cermetů, kromě vysoké odolnosti proti opotřebení a nízké hodnoty drsnosti, je několikanásobně vyšší řezná rychlost oproti slinutým karbidům, jak znázorňuje tabulka 1.3.²⁶

Tab. 1.3 Srovnání řezných rychlostí výstružníku VRV firmy HAM-FINAL s využitím cermetu nebo slinutých karbidů²⁶

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

1.3 PVD povlaky a jejich praktické zhodnocení dosažených parametrů při vystružování

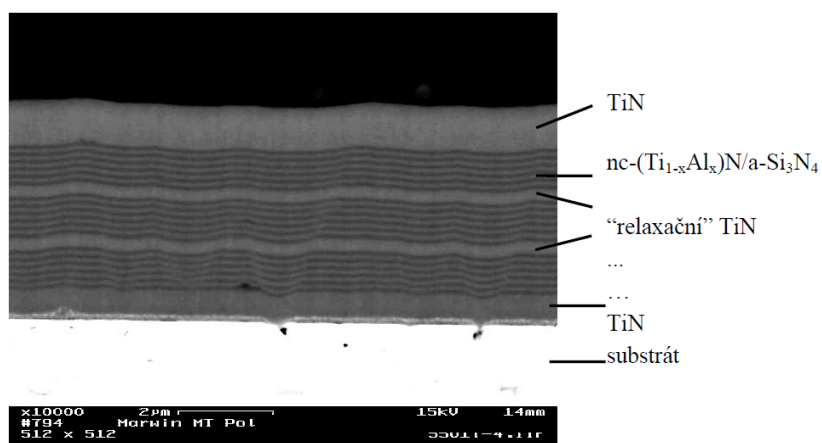
Trh nabízí širokou škálu druhů povlaků, vytvořených *PVD* či *CVD* metodami. Z hlediska efektivity využití povlaků je důležitá správná kombinace druhu povlaku, složení jednotlivých vrstev, tloušťka povlaku, metoda povlakování, substrát atd.⁵ Jelikož je problematika povlaků velice obsáhlá, kapitola 1.3.1 se pouze zaměřuje na povlaky typu *TiAlN*, které prošly testy na výměnných vystružovacích hlavicích MT3, jakožto nástrojem využitým v experimentální části.¹

1.3.1 Specifikace PVD povlaků na bázi *TiAlN*

Při sledování německého trhu v oblasti povlakování vyplývalo, že povlaky se složením *TiN* a *TiCN* jdou do ústraní před vrstvami na bázi *TiAlN*. Povlaky *TiN* s tvrdostí HV do 23 GPa a s maximální pracovní teplotou 600°C nedostačovaly požadavkům vysoké odolnosti proti abrazivnímu opotřebení. Dalším výzkumem a vývojem byl vyroben povlak s velmi tvrdými vrstvami *TiCN* dosahující tvrdosti HV až 35 GPa, ale s nízkou pracovní teplotou do 450°C. Až povlak se složením *TiAlN* snoubil vysokou hodnotu tvrdosti HV až 33 GPa s pracovní teplotou v některých případech přesahující 800°C. Nyní byl vytvořen povlak, který splňoval jak kritérium chemické stability při vysokých teplotách, tak i schopnost vysoké abrazivní odolnosti. Pro zvýšení užitečných vlastností vrstev je někdy do povlaku *TiAlN* přidáváno malé množství prvků jako je např. *Cr*, *Hf*, *Y*.

Pro další vylepšení fyzikálně-chemických vlastností vrstvy *TiAlN*, ale i jiných, byly zavedeny strukturované modifikace povlaků. Rozdělují se na multivrstvy, gradientní vrstvy a nanostrukturované vrstvy, kde se řadí i zvláštní skupina nanokompozitních vrstev.⁹

- **Multivrstvy** - jsou v mnoha případech složené z více než deseti vrstev a mezivrstev.^{5,9} Výhody spočívají např. v možnosti nanášení vrstvy ve větších tloušťkách než v případě monovrstev, vyšší odolnosti vůči šíření trhlin a v neposlední řadě celkové zvýšení tvrdosti.⁹
- **Gradientní vrstvy, resp. nanogradientní vrstvy** - jedná se o postupnou změnu složení vrstvy od substrátu k povrchu povlaku.⁵ Složení vrstvy *TiAlN* se průběžně mění a to tak, že obsah *Al* se zvyšuje při postupném přibližování k povrchu. *Al* zabezpečí dostatečnou oxidační odolnost s ohledem na zachování tvrdosti vrstvy.⁹
- **Nanovrstvy** - systém několika vrstviček s tloušťkou menší jak 10 nm, mluví se tedy o multivrstvách.⁹
 - **Nanokompozitní vrstvy** - složeny s dvou a více složek, které jsou vzájemně nerozpustné, přitom alespoň jedna složka musí být krystalická.⁵ Vyznačují se velmi vysokou tvrdostí, tepelnou stabilitou a odolností vůči oxidaci. Typickým představitelem jsou vrstvy $nc-(Ti_{1-x}Al_x)N/a-Si_3N_4$, kde *TiAlN* je krystalická složka a *Si₃N₄* amorfni (viz obr. 1.4).⁹

Obr. 1.4 Příklad nanokompozitního složení s multivrstvami firmy MARWIN¹⁰

1.3.1.1 Nanokompozitní povlaky TiAlN s firemním označením TINALOX SN², HSN², HYPERLOX

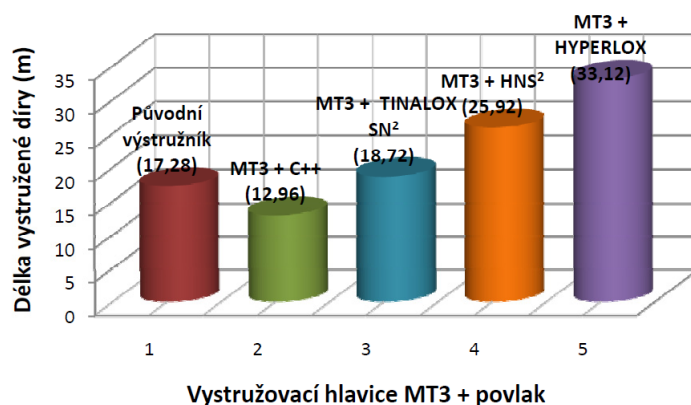
Jak již bylo zmíněno v úvodu diplomové práce, firma HAM-FINAL provedla v roce 2008 testování nanokompozitních povlaků nanosených na vystružovací hlavici MT3.¹ Jednalo se o povlaky s firemním názvem TINALOX SN², HSN², a HYPERLOX založené na materiálu TiAlN firmy CEMECON.¹¹ Jednotlivé mechanické vlastnosti povlaků jsou uvedeny v tabulce 1.4.

Tab. 1.4 PVD povlaky německé firmy Cemecon¹¹

Povlak	Materiál	Struktura	Tvrdoost [HV _{0,05}]	Max. prac. Teplota [°C]	Tloušťka [µm]		Koefficient tření [-]
					1)	2)	
ALOX SN ²	TiAlN	Nano-kompozit	3500	1000	6 ± 2	4 ± 1,3	0,3
TINALOX SN ²					3 ± 1	3 ± 1 ⁴⁾	
HNS ²			3800		4 ± 1,3		
HYPERLOX			3700	1100	3 ± 1	3 ± 1 ^{2,4)} / 4,5 ± 1,5 ³⁾	

2) stopkové nástroje, 3) odvalovací frézy, 4) standardní tloušťka, jiné hodnoty na požádání

Z obr. 6 je patrné, že při vystružování děr v tělese hydromotoru z materiálu 42CrMo4 dosáhl nejlepších výsledků povlak HYPERLOX.¹

Obr. 1.5 Výsledky testů povlaků firmy Cemecon¹

2 ANALÝZA INTEGRITY POVRCHU

Důležitým aspektem z hlediska výroby je znalost mechanismu vytvoření nového povrchu součásti, jelikož umožňuje pochopit vlastnosti a povahu takto vytvořeného povrchu.

Povrchové změny vrstvy součásti, lze komplexně hodnotit jako změny jakosti. Tyto změny se potom mohou dávat do vztahu s budoucí funkcí dokončené plochy a využívají se pro hodnocení její integrity.

Integritu povrchu lze definovat dle literatury¹². Integrita povrchu je odrazem podmínek, za kterých funkční plocha vzniká, bere v úvahu důsledky působení technologických metod na jakost obrobené plochy a dává je do vztahu k funkčním požadavkům na celý výrobek.¹²

Literatura¹³ dělí Integritu povrchu na :

Vnitřní vlivy:

- mechanické (provozní napětí),
- chemické (koroze),
- fyzikální (záření, bludné proudy apod.),
- kombinace více vlivů (koroze pod napětím, elektrochemická koroze, ale také technologické procesy např. obrábění, tepelné zpracování, tváření).

Vnější vlivy:

- zbytková napětí,
- morfologie povrchu (drsnost),
- materiálové a mechanické vlastnosti povrchu (tvrdost, zpevnění, strukturní stav, povrchová úprava, např. vrstvy, povlaky),
- přítomnost povrchových a podpovrchových vad a heterogenní struktura (uhlík v litině, vměstky, řediny),¹³
- geometrické parametry.

Z pohledu diplomové práce jsou stěžejními činiteli na hodnocení integrity vystružené díry pouze vnější vlivy, které budou podrobně rozepsány v následujících podkapitolách.

2.1 Povrchové napětí

Jeden z důležitých faktorů při hodnocení integrity povrchu jsou zbytková napětí, jejímž působením může dojít ke vzniku mikrotrhlin, případně, jestli je úroveň zbytkového napětí srovnatelná s mezí pevnosti a k porušení celého výrobku.¹⁴

Mezi hlavní příčiny pro vznik zbytkových napětí se řadí:

- nerovnoměrně rozložená plastická deformace v obrobeném povrchu,
- lokální ochlazení a ohřev materiálu,
- lokální změny struktury, vyvolané působením tepla a mechanických sil

- chemické procesy, spojené s reakcí částic pronikajících do povrchové vrstvy.

Významný vliv na zbytkové napětí má doba působení vlivů podmínek řezání a rychlost změn probíhajících stavů.¹²

Tahové či tlakové napětí nabývá různého rozsahu svého působení v materiálu, kde dosahuje rovnováhy. Tato objemová vlastnost rozděluje zbytkové napětí do tří druhů dle literatury.¹³

- **I druh zbytkového napětí** - týká se celé součásti nebo její převážné části, a to znamená, že mají makroskopický charakter. Porušením kompaktnosti součásti (např. jejím rozdělením) dojde ke změně její makrogeometrie.
- **II druh zbytkového napětí** - zasahují objem několika krystalových zrn. Tato napětí jsou podmíněna anizotropií zrna a v polykrystalických kovech jsou homogenní v oblasti několika jednotlivých zrn. Porušením kompaktnosti součásti (např. jejím rozdělením) nemusí dojít ke změně její makrogeometrie.
- **III druh zbytkového napětí** - projevují se v objemu několika atomových vzdáleností a dosahují rovnováhy jen v dostatečně velké části zrna. Porušením kompaktnosti součásti (např. jejím rozdělením) nikdy nedojde ke změně její makrogeometrie.¹³

2.2 Textura povrchu

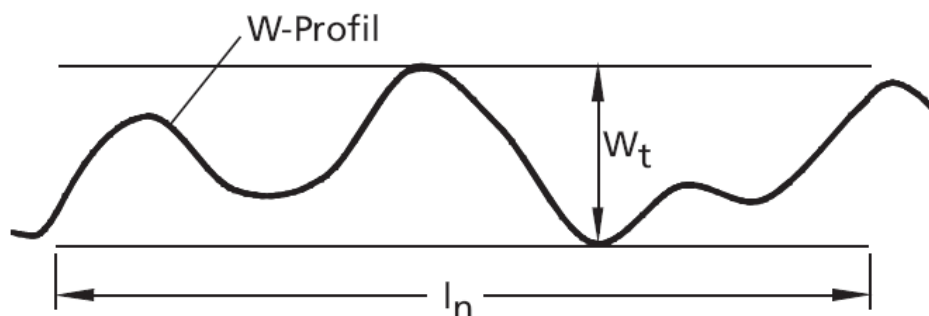
Drsnost povrchu je nejčastěji stanovována pomocí normalizovaných parametrů, při dvojrozměrném měření.

Neustále jsou ověřovány další způsoby pro získání komplexních informací povrchu, které by umožnily přiřazení jednotlivých měřených parametrů k vlastnostem povrchu a podmínkám jeho vzniku.¹⁵

2.2.1 Hodnocení drsnosti povrchu dle normy DIN EN ISO 428

2.2.1.1 Hloubka vlny profilu W_t

Hloubka vlny W_t (celková výška W profilu) - je vyjádřena jako součet nejvyšší a nejnižší výšky profilu uvnitř měřené délky l_n (viz. obr. 2.1)¹⁶



Obr. 2.1 W-Profil¹⁶

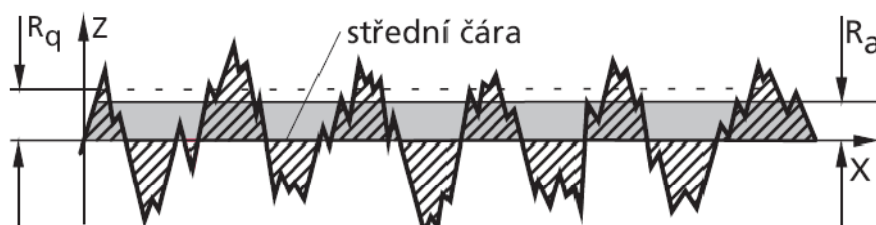
2.2.1.2 Střední hodnoty drsnosti R_a , R_q

Střední hodnota R_a je aritmetickou střední hodnotou všech částí hodnot profilu drsnosti (viz. obr. 2.2), vyjádřena dle vztahu:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^1 |Z(x)| dx \quad (2.1)$$

Dále je z pohledu normy vyjádřena **střední hodnota** R_q , která vyjadřuje střední kvadratickou hodnotou všech částí profilu (viz. obr. 2.2).¹⁶

$$R_q = \frac{1}{l} \int_0^1 |Z^2(x)| dx \quad (2.2)$$



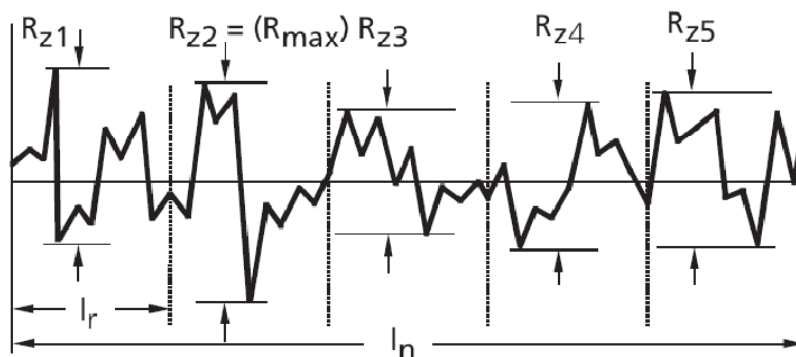
Obr. 2.2 Aritmetická a kvadratická střední hodnota¹⁶

2.2.1.3 Hloubka drsnosti R_z , R_{zi} , R_{max}

Hloubka jednotlivých drsností R_{zi} je součtem největší výšky a největší prohlubně části profilu na měřeném úseku (viz. obr. 2.3).

Hloubka drsnosti R_z je střední aritmetická hodnota jednotlivých hloubek drsností R_{zi} za sebou následujících jednotlivých měřících drah (viz. obr. 2.3).

Maximální hloubka drsnosti R_{max} vyjadřuje maximální hodnotu hloubky drsnosti uvnitř celkové měřené dráhy (viz. obr. 2.3).¹⁶



Obr. 2.3 Hodnoty R_z , R_{zi} , R_{max} ¹⁶

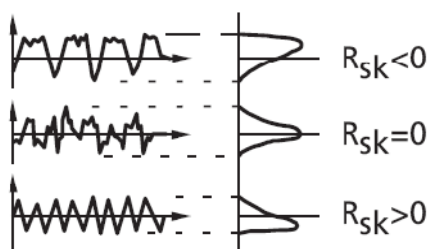
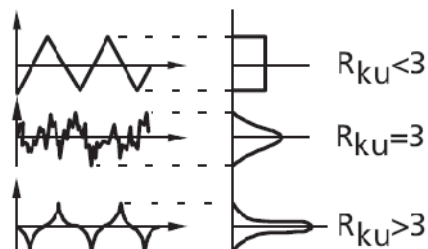
2.2.1.4 Sklon R_{sk} a strmost R_{ku} profilu

Sklon R_{sk} vyjadřuje hodnota asymetrie hustoty amplitudové křivky. Nejlepší nosnost profilu vykazuje negativní sklon dle obr. 2.4.

$$R_{sk} = \frac{1}{l} \frac{1}{R_q^3} \int_0^1 |Z^3(x)| dx \quad (2.3)$$

Kromě sklonu je hodnocen i parametr **strmosti** R_{ku} profilu (viz. obr. 2.5), který je hodnotou strmosti hustoty amplitudové křivky vyjádřené jako:¹⁶

$$R_{ku} = \frac{1}{l} \frac{1}{R_q^4} \int_0^1 |Z^4(x)| dx \quad (2.4)$$

Obr. 2.4 Sklon profilu¹⁶Obr. 2.5 Strmost profilu¹⁶

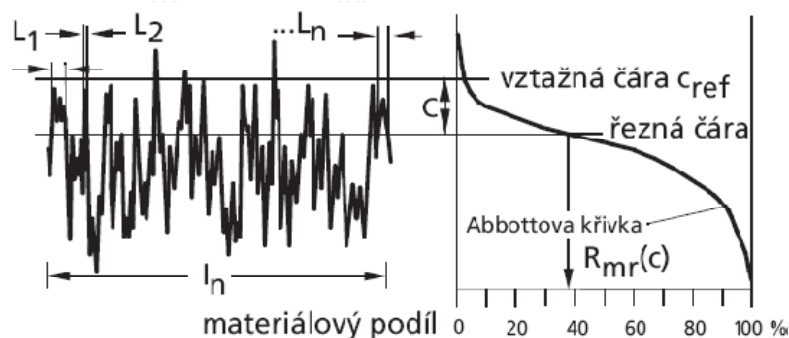
2.2.1.5 Materiálový podíl R_{mr}

Jedná se o jeden z nejdůležitějších parametrů při hodnocení struktury povrchu, který pojednává o procentu zaplnění materiálu, vztažené k celkové měřicí dráze l_n v hladině řezu c .

$$R_{mr} = (L_1 + L_2 + \dots + L_n) \cdot 100 \quad (2.5)$$

Hladina řezu c je vzdálenost od vyhodnocené čáry řezu po zvolenou vztahnou čáru c_{ref} (viz. obr. 2.6).

Abbotova křivka neboli podílová křivka materiálu udává podíl materiálu funkčně závislý na hladině řezu c .¹⁶

Obr. 2.6 Hodnocení materiálového podílu¹⁶

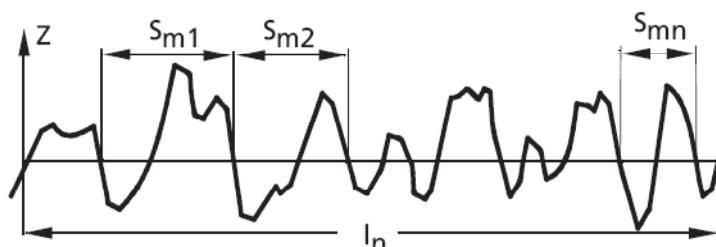
2.2.1.6 Střední šířka rýh R_{sm} a střední stoupání profilu $R_{\Delta q}$

Střední šířka rýh R_{sm} udává střední aritmetickou hodnotu jednotlivých šířek profilových elementů drsnosti (viz. obr. 2.7) dle vztahu:

$$R_{sm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{mi} \quad (2.6)$$

Střední stoupání profilu $R_{\Delta q}$ vyjadřuje střední kvadratickou hodnotu jednotlivých lokálních stoupání profilu drsnosti dle vztahu:¹⁶

$$R_{\Delta q} = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l \left(\frac{dz}{dx} \right)^2 dx} \quad (2.6)$$



Obr. 2.7 Jednotlivé šířky profilových elementů¹⁶

2.2.2 Geometrické vyjádření drsnosti povrchu z tvaru břítu vyvrtávací tyče, jakožto operace předcházející vystružování

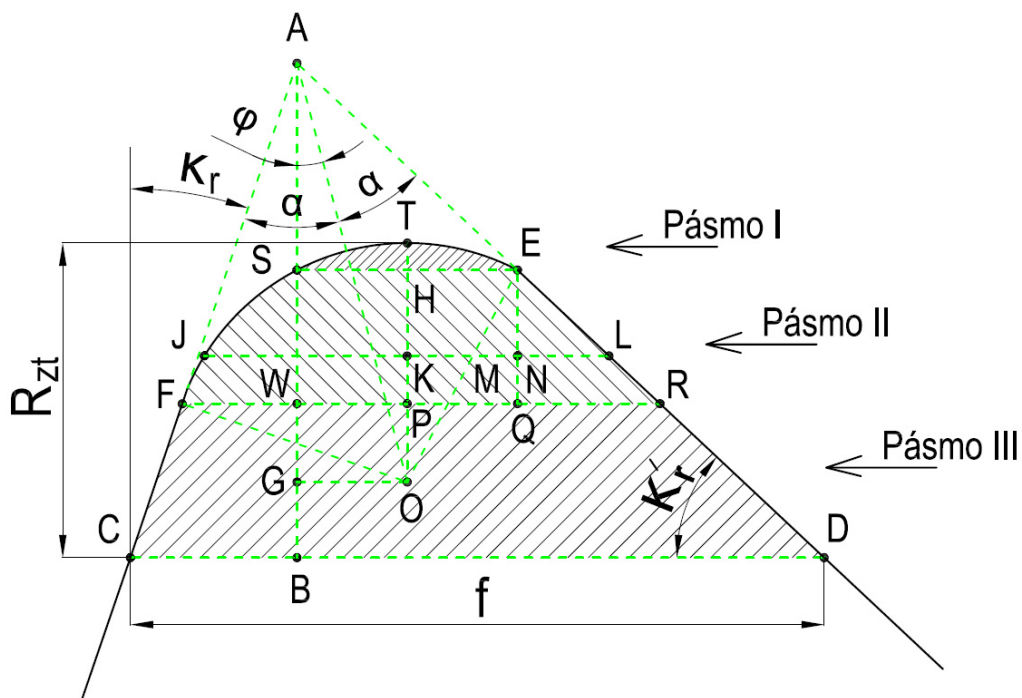
Výslednou přesnost vystružené díry ovlivňuje několik faktorů, které zahrnují - řezné podmínky procesu, nevhodně upnutý obrobek, geometrie břitů nástroje, použitý řezný materiál, řezná nebo chladicí kapalina a nevhodně předpracovaná díra před samotným vystružováním.

Kapitola 2.2.2 podrobně analyzuje vzniklý povrch po obrobení pomocí vyvrtávací tyče, která předchází před procesem vystružování. Jak již bylo zmíněno v prvním odstavci, jeden z důležitých aspektů dodržení přesnosti vystružené díry je správně předpřipravená díra. Z výsledků měření firmy *HAM-FINAL* vychází, že nejlepších parametrů u předpracované díry dosahují vyvrtávací tyče. Díra před vystružovacím procesem musí splňovat tyto požadavky:

- rovnoměrný a optimální přídavek materiálu pro následné vystružování,
- dostatečná kruhovitost a přímot předpracované díry,
- souosost a rovnoběžnost předpracované díry s osou vřetene stroje při vystružování.²⁴

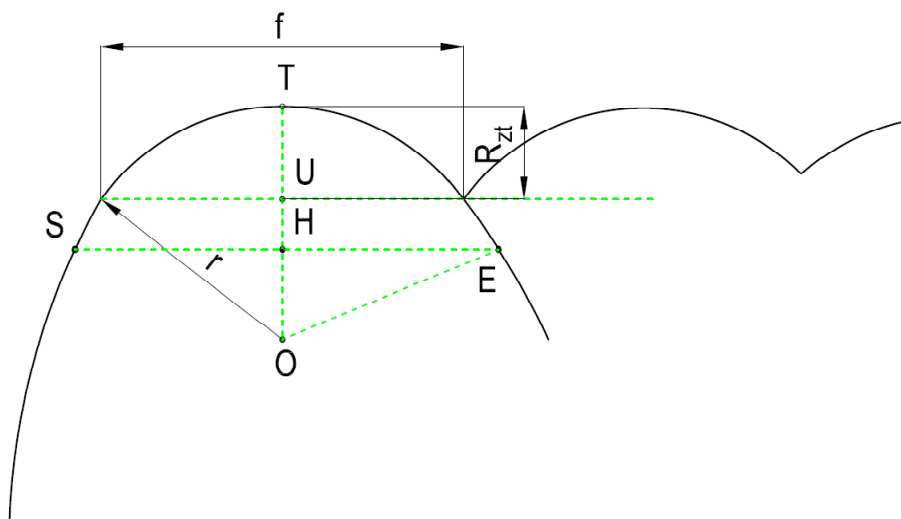
Drsnost povrchu je nejčastěji vyjadřována vzhledem k tvaru břitů nástroje a lze ji vyjádřit třemi způsoby. První vyjádření vychází ze špičky

nástroje, tudíž odpovídá vzdálenosti \overline{OT} , druhé zahrnuje vedlejší úhel nastavení κ'_r (úhel c_e) a poslední se týká hlavního úhlu nastavení κ_r (úhel c_s).



Obr. 2.8 Špička nástroje rozložená do tří pásem^{17, 18}

Pokud je poloměr špičky nástroje velký a posuv je velmi malý, vytvořená drsnost povrchu bude tvořena pouze vzdáleností \overline{OT} .



Obr. 2.9 Vyobrazení geometrie špičky nástroje^{17, 18}

$$R_{zt} = OT - OU = r_\epsilon - \left(r_\epsilon^2 - \frac{f^2}{4}\right)^{\frac{1}{2}} \cong \frac{f^2}{8r_\epsilon} \quad (2.7)$$

V bezrozměrném vyjádření

$$\frac{R_{zt}}{r_\varepsilon} = \frac{1}{8} \left(\frac{f}{r_\varepsilon} \right)^2 \quad (2.8)$$

Tento vztah platí, pokud $\frac{f}{2}$ je menší než vzdálenost \overline{EH} (viz. obr. 2.9).

$$0 < \frac{f}{r_\varepsilon} < 2 \sin \kappa'_r \quad (2.9)$$

Při vysokých hodnotách posuvu, kde při výpočtu R_{zt} , musí být brán ohled na hodnoty κ'_r a r_ε (pásmo II). Pokud hodnota posuvu f je rovna \overline{JL} (viz. obr. 2.8), jedná se o stav v pásmu II a hodnotu f lze vyjádřit dle vztahu:

$$\begin{aligned} f &= JK + HE + NL \\ &= [r_\varepsilon^2 - (r_\varepsilon - R_{zt})^2]^{\frac{1}{2}} + r_\varepsilon \sin \kappa'_r + r_\varepsilon \left(\frac{R_{zt}}{r_\varepsilon} - 1 + \cos \kappa'_r \right) \cot g \kappa'_r \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\frac{f}{r_\varepsilon} = \left[2 \frac{R_{zt}}{r_\varepsilon} - \left(\frac{R_{zt}}{r_\varepsilon} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \sin \kappa'_r + \left(\frac{R_{zt}}{r_\varepsilon} - 1 + \cos \kappa'_r \right) \cot g \kappa'_r \quad (2.11)$$

Jestliže hodnota posuvu f leží mezi délkou \overline{SE} ($2r_\varepsilon \sin \kappa'_r$) a délkou \overline{FR} pak:

$$FR = r_\varepsilon [\cos \kappa_r + \sin \kappa'_r + (\cos \kappa'_r + \sin \kappa_r) \cot g \kappa'_r] \quad (2.12)$$

Pro vysoké hodnoty f , κ_r jsou brány v potaz i hodnoty r_ε , κ'_r (pásmo III). Pokud hodnota f je rovna \overline{CD} , lze hodnotu R_{zt} vyjádřit jako:

$$R_{zt} = AB - AG + r_\varepsilon \quad (2.13)$$

$$= \frac{f}{\operatorname{tg} \kappa_r + \cot g \kappa'_r} - \frac{r_\varepsilon \left(45 - \frac{\kappa'_r}{2} - \frac{\kappa_r}{2} \right)}{\sin \left(45 - \frac{\kappa'_r}{2} + \frac{\kappa_r}{2} \right)} + r_\varepsilon \quad (2.14)$$

$$\frac{R_{zt}}{r_\varepsilon} = \frac{\frac{f}{r_\varepsilon}}{\operatorname{tg} \kappa_r + \cot g \kappa'_r} - \frac{\cos \left(45 - \frac{\kappa'_r}{2} - \frac{\kappa_r}{2} \right)}{\sin \left(45 - \frac{\kappa'_r}{2} + \frac{\kappa_r}{2} \right)} + 1 \quad (2.15)$$

Vztahy platí pokud:

$$\frac{f}{r_\varepsilon} > \cos \kappa_r + \sin \kappa'_r + (\cos \kappa'_r - \sin \kappa_r) \cot g \kappa'_r$$

Při malém poloměru špičky nástroje vůči posuvu jsou poslední dva členové rovnice $\frac{R_{zt}}{r_\varepsilon}$ zanedbány a vztah má tvar:

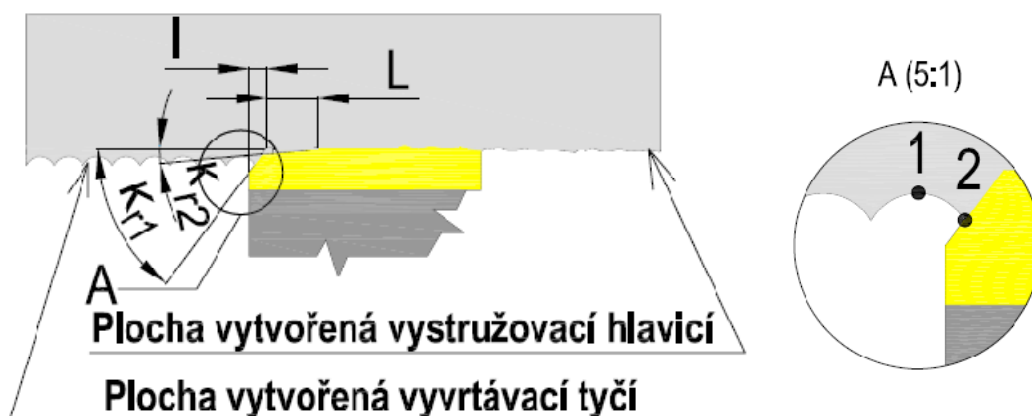
$$\frac{R_{zt}}{r_\varepsilon} = \frac{\frac{f}{r_\varepsilon}}{\operatorname{tg} \kappa_r + \cot g \kappa'_r} \quad (2.16)$$

Teoretická a naměřená drsnost je dána v poměrovém vztahu: ^{17, 18}

$$C = \frac{R_z}{R_{zt}} \quad (2.17)$$

2.2.3 Geometrické vyjádření drsnosti povrchu po vystružení

V kapitole 2.2.2 byl vyjádřen profil povrchu, který vznikne využitím vyvrtávací tyče. Při vystružování výměnnou hlavicí MT3 a jiných vystružovacích nástrojů, dochází k vyhlazení profilu povrchu, ovšem opět s určitou hodnotou drsnosti (viz. obr. 2.10).

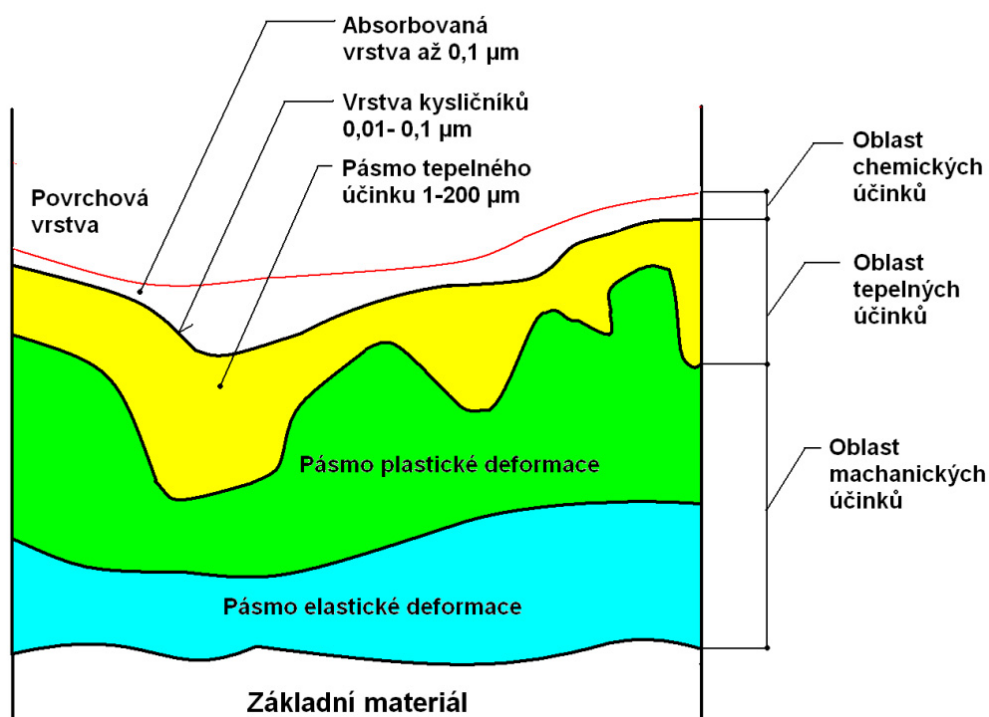


Obr. 2.10 Analýza ploch před a po vystružení

Detail A na obrázku 2.10 znázorňuje dva body na povrchu obrobené plochy vytvořené vyvrtávací tyčí. Při rotaci vystružovacího nástroje a posuvu zprava doleva dochází k nerovnoměrnému zatěžování břitu nástroje. V bodě 2 nástroj odebrává největší množství materiálu, čili hodnota řezných sil v bodě 2 bude vyšší než v bodě 1. Profil povrchu na obrázku 2.10 je v několikanásobném zvětšení, aby byl zřejmý rozdíl mezi povrchem vzniklým při využití vyvrtávací tyče a vystružovacího nástroje.

2.3 Změny strukturního stavu po obrobení

Obrobený povrch se při pouhém pohledu jeví jako dobrý, ovšem při podrobném mikroskopickém zkoumání je patrné, že v obrobeném povrchu dochází k tepelným, mechanickým a chemickým změnám. Tyto změny jsou v podobě jednotlivých pásem v povrchové vrstvě, znázorněny na obrázku 2.11.^{17, 20}



Obr. 2.11 Změny v povrchové vrstvě po obrobení podle literatury¹⁷

Je důležité, že ke změnám v povrchu bude docházet jak při samotné výrobě součásti, tak i v jejím provozu, což i ve své podstatě vyjadřuje pojem integrita povrchu.

V oblasti chemických účinků může dojít k mnoha procesům, jako je např. oxidace, nauhličení, či jakákoli reakce s okolními vlivů.²⁰

Další pásmo zahrnuje oblast tepelných účinků, kdy vlivem tepla vneseného do materiálu dochází ke strukturním změnám, např. struktura bainitická, martenzitická, austenitická, feritická a jiné. Změny v tepelné oblasti závisí na aplikované technologii. Při hodnocení vystružené díry vzhledem k malé šířce záběru ostří nebude mít tepelný účinek takový vliv jako např. u tvářecích procesů.

Oblast mechanických účinků je tvořena plastickým a elastickým pásmem, jenž je pod úrovní pásma chemického a tepelného. Plastická deformace je trvalá na rozdíl od deformace elastické. Při zatížení materiálu na jednoosý tlak či smyk předchází každé plastické deformaci, deformace elastická. Při dosažení kritické hodnoty normálového napětí φ či napětí smykového τ dochází k plastickému chování materiálu.^{7, 17}

2.4 Hodnocení mikrotvrdosti

Při stanovení mikrotvrdosti jednotlivých pásem povrchu je využito vlačování diamantového tělesa tvaru Vickersova nebo Knoopova do povrchu měřeného tělesa. Mikrotvrdost je měřena v rozsahu zatížení od 1 g (0,09807 N) do 1000 g (9,807 N) na rozdíl od (makro)tvrdosti Vickerse, kde je využito 10 N až 1200 N. Díky tomu je posuzovaná geometrie vtisku jehlanu menší než při měření (makro)tvrdosti a umožňuje měřit strukturní složky, fáze, difuzní pochody, oduhličující procesy, tenké součásti, svarové spoje atd.¹⁹

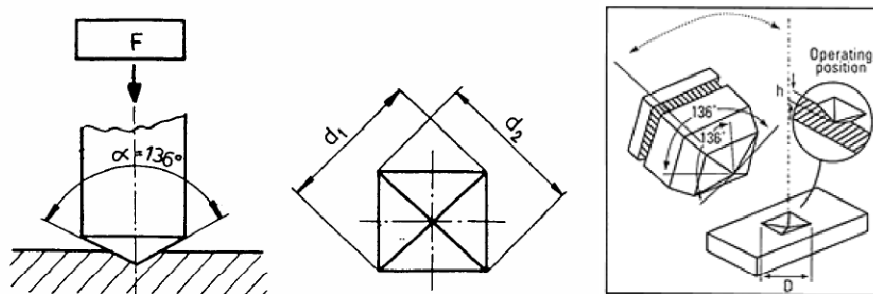
2.4.1 Mikrotvrdost dle Vickerse

Tvrdost podle Vickerse se rozděluje do tří oblastí, rozdělených dle zkušebního zatížení (viz. tab. 2.1).

Tab. 2.1 Rozdělení tvrdosti dle Vickerse¹⁹

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

Princip zkoušky spočívá ve vlačování diamantového tělesa ve tvaru čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem 136° mezi protilehlými stěnami do zkoušeného materiálu (viz. obr. 2.12).



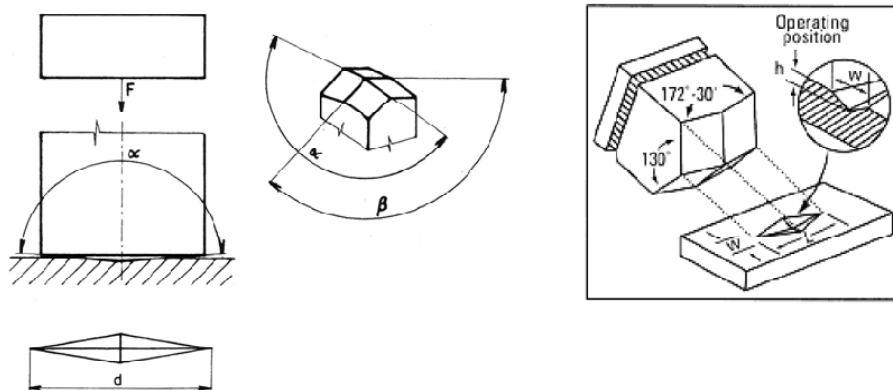
Obr. 2.12 Vyhodnocení zkoušky dle Vickerse¹⁹

Výpočet hodnoty Vickerse je vyjádřen jako poměr zkušebního zatížení k ploše vtisku.¹⁹

$$HV = 0,102 \frac{2F \sin \frac{136}{2}}{d^2} = 0,1891 \frac{F}{d^2} \quad (2.18)$$

2.4.2 Mikrotvrdost dle Knoop

Zkouška je založena na stejném principu jako v případě Vickerse jen s tím rozdílem, že místo tělesa s pravidelnou čtyřbokou základnou ve tvaru jehlanu vniká do materiálu těleso s kosočtvercovou základnou (viz. obr. 2.13).



Obr. 2.13 Vyhodnocení zkoušky dle Knoop¹⁹

Výpočet hodnoty dle Knoop je dán jako poměr zkušebního zatížení k ploše vtisku.

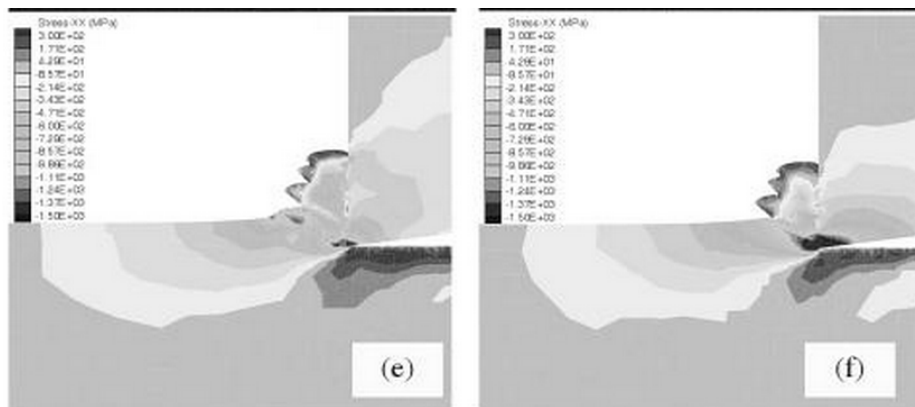
$$HK = 0,102 \frac{F}{d^2 c} = 0,102 \frac{F}{0,07028 d^2} = 1,451 \frac{F}{d^2} \quad (2.19)$$

Kde konstanta vnikajícího tělesa c je vyjádřeno jako:¹⁹

$$c = \frac{\tan \frac{\beta}{2}}{2 \tan \frac{\beta}{2}} = 0,07028 \quad (2.20)$$

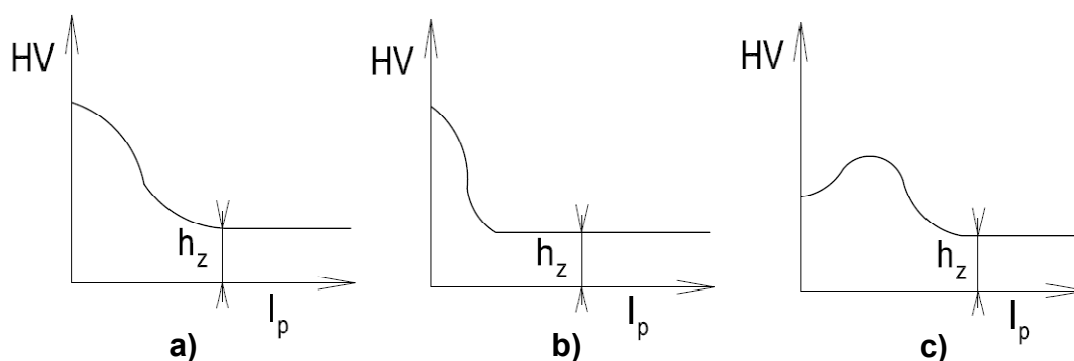
2.5 Deformační zpevnění povrchové vrstvy

K procesu dochází vlivem zaoblení řezné hrany nástroje, jelikož reálné ostří není nikdy tvořeno přímkou a tím, že oblast plastických deformací zasahuje pod úroveň budoucího povrchu (viz. obr. 2.14).²¹



Obr. 2.14 Oblasti deformačních účinků²⁹

Při interakci nástroje s povrchem obrobené plochy dochází v souvislosti se zpevněním povrchu kromě řezného procesu i k tvářecímu procesu, neboli jednotlivá zrna jsou deformována v určitém směru. Tuto skutečnost vyjadřuje plošná anizotropie, která charakterizuje rozdílné mechanické vlastnosti v různých směrech. Při analýze povrchu z pohledu zpevnění je nejčastěji měřena mikrotvrdość v závislosti na hloubce povrchového zpevnění plochy po obrobení.^{7, 21}

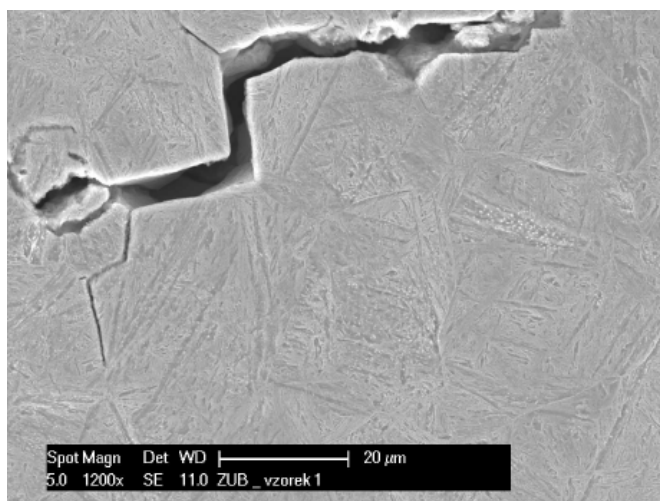


Obr. 2.15 Průběhy jednotlivých zpevnění²¹

Obrázek 2.15a znázorňuje výhodný průběh z hlediska funkčních vlastností povrchu, jelikož hodnota mikrotvrdość HV klesá pozvolna. Naproti tomu je zřejmé, že obrázek 2.15b vyobrazuje prudký pokles tvrdosti od povrchu součásti, což může mít za následek odlupování povrchové vrstvy. Průběh znázorňující graf na obrázku 2.15c vypovídá o úplném vyčerpání plasticity materiálu. Při silovém působení vznikly trhliny na povrchu, které způsobily pokles tvrdosti.²¹

2.6 Trhliny v povrchové vrstvě

Při výrobě součástí dochází k trhlinám, které vznikají v důsledku zbytkových napětí, působením vysokých tlaků při obrábění, lokálních změnách teploty a jiných.




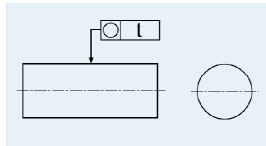
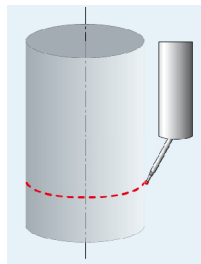
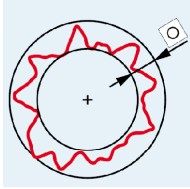
Obr. 2.16 Šíření trhliny po hranicích původních austenitických zrn¹³

Vnitřní a vnější trhliny je možno spatřit jak běžným pohledem, nebo pomocí mikroskopie. Pokud vyžaduje trhlina deseti a vícenásobné zvětšení, proto aby byla viděna, je považována za mikrotrhlinu.²⁰

2.7 Geometrické tolerance obrobené díry


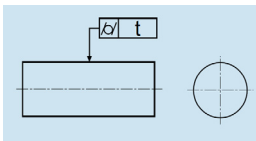
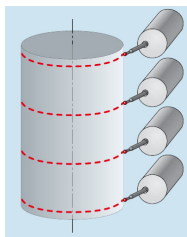
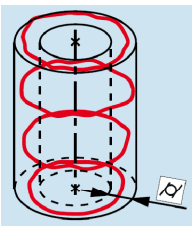
U vystružené díry jsou nejdůležitější geometrické tolerance tvaru a to kruhovitost a válcovitost (viz. tab. 2.2, 2.3).

Tab. 2.2 Geometrická tolerance kruhovitosti²³

Značka*	Definice*	Označení tolerovaného prvku	Použití	Výsledek
	<p>Kruhovitost</p> <p>Toleranční pole je omezeno v dané rovině průřezu dvěma soustřednými kružnicemi, vzdálenými od sebe o šířku mezikružjí rovnou toleranci kruhovitosti.</p>			

* (Ve smyslu ČSN EN ISO 1101 : 2007)

Tab. 2.3 Geometrická tolerance válcovitosti²³

Značka*	Definice*	Označení tolerovaného prvku	Použití	Výsledek
	<p>Válcovitost</p> <p>Toleranční prostor je omezen dvěma sousými válci, vzdálenými od sebe o hodnotu tolerance válcovitosti.</p>			

* (Ve smyslu ČSN EN ISO 1101 :2007)

3 ROZBOR A PŮSOBNÍ SIL PŘI OBRÁBĚNÍ

Kapitola 3 popisuje z obecného hlediska působení sil při ortogonálním obrábění, kdy je ostří kolmé na směr řezného pohybu, jako základ pro pochopení řezného procesu z pohledu hodnocení silového zatížení. Jelikož při silové analýze vystružovací hlavičky MT3 dochází k mnoha specifickým procesům, které jsou charakteristické pro tento konkrétní nástroj, budou podrobně měřeny a následně vyhodnoceny až v experimentální části diplomové práce.

Kromě vyjádření sil ze smykového napětí, lze určit sílu z hlediska energie vzniklé během tvorby třísky, dané z energie vzniklé při působení řezné síly F_c po určité dráze l_c .

$$E_C = F_c l_c \quad (3.4)$$

Celková řezná energie vzniklá při řezném procesu je dána součtem deformační a smykové energie E_φ , třecí energie vyvolané na čele nástroje E_γ , třecí energie vyvolané na hřbetu nástroje E_α , plošná energie při vytvoření nového povrchu E_τ a kinetickou energií třísky E_k .

$$E_C = E_\varphi + E_\gamma + E_\alpha + E_\tau + E_k \quad (3.5)$$

Hodnotu specifické energie spotřebované při řezném procesu lze vyjádřit jako podíl řezné energie E_C a množství odebraného materiálu V_w .²²

$$e_c = \frac{E_C}{V_w} \quad (3.6)$$

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST - HODNOCENÍ ŘEZNÝCH SIL V ZÁVISLOSTI NA INTEGRITĚ POVRCHU

Experimentální část diplomové práce se zabývá analýzou procesu řezání u výměnné vystružovací hlavice MT3 od firmy *HAM-FINAL* v závislosti na integritě povrchu vystružené díry. Experiment je hodnocen z dvou základních pohledů:

- **Analýza silového účinku** (viz. kapitola 4.1) - ze silového rozkladu výsledné síly při řezném procesu je měřena posuvová silová složka F_f a řezný moment M_c se specifickými průběhy pro daný nástroj. Tento průběh bude podrobně rozebrán do jednotlivých úseků, které budou následně analyzovány. Průběhy silových zatížení budou sledovány s ohledem na opotřebení nástroje a možný vznik adhezního procesu u vodítek nástroje.
- **Analýza integrity povrchu** (viz. kapitola 4.2) - u vystružené díry proběhne měření týkající se:
 - drsnosti povrchu (hloubka drsnosti, střední hodnota drsnosti),
 - kruhovitosti, válcovitosti,
 - hodnocení mikrostruktury pod elektronovým mikroskopem.

Cílem práce bude srovnání výsledků získaných při silovém měření s hodnotami dosaženými při nově vzniklém povrchu.

4.1 Analýza silového účinku vystružovací hlavice MT3

Celková síla vytvořená vystružovací hlavicí MT3 je dána součtem celkových sil působících od tří břitů a dvou vodítek.

$$F_{výsl.} = \sum F_{zz} + \sum F_{zv} \quad (4.1)$$

Celkovou sílu F_{zz} zubu nástroje lze vyjádřit jako:³⁰

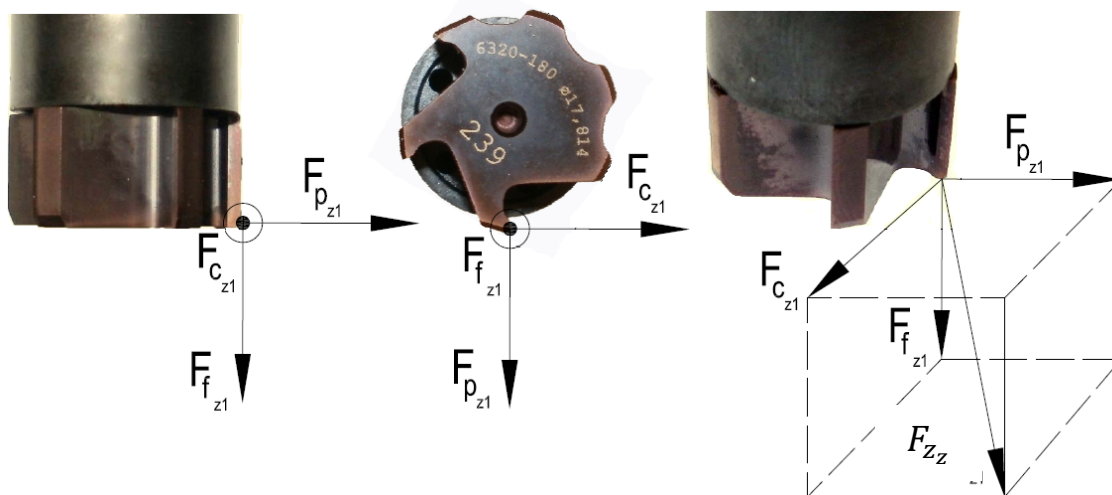
$$dF_{zz} = \sqrt{\left(\frac{\partial F_c}{\partial t} dt\right)^2 + \left(\frac{\partial F_f}{\partial t} dt\right)^2 + \left(\frac{\partial F_p}{\partial t} dt\right)^2} \quad (4.2)$$

Dále pak síla působící na vodítku F_{zv} je dána vztahem:

$$dF_{zv} = \sqrt{\left(\frac{\partial F_f}{\partial t} dt\right)^2 + \left(\frac{\partial F_p}{\partial t} dt\right)^2} \quad (4.3)$$

Jednotlivé zuby mají odlišnou funkci a konstrukci od vodících částí, což se také výrazným podílem projevuje na velikosti silových složek. Přesněji řečeno nejvyšší hodnoty řezné síly F_c se dosahuje u třicetistupňového sražení na čele nástroje a dále pak u třístupňové kalibrační části, která se zapojuje do řezného procesu právě po třicetistupňovém sražení. Ta již ovšem vykazuje

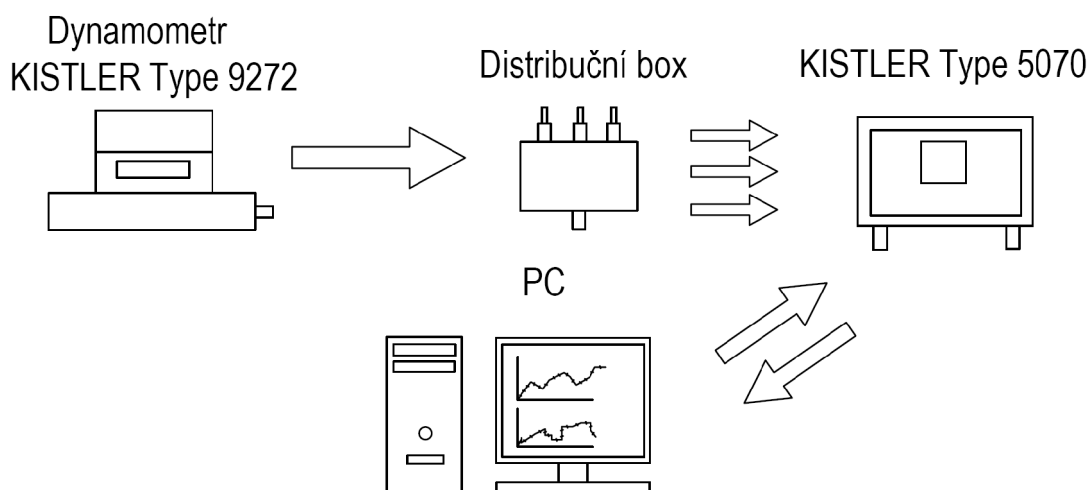
řádově nižší hodnoty řezné síly. V průběhu řezání dochází k opotřebení nástroje a vytváří se tzv. fazety.³⁰ Tento jev může mít za následek zvyšování řezných a pasivních sil. Pasivní silové složky převládají u vodících částí nástroje, jelikož vodítka pouze částečně vyhlazují vystruženou díru a podporují jednotlivé zuby v řezu, přičemž sami neřezou.



Obr. 4.1 Rozložení silových složek u vystružovací hlavice MT3

4.1.1 Popis experimentu

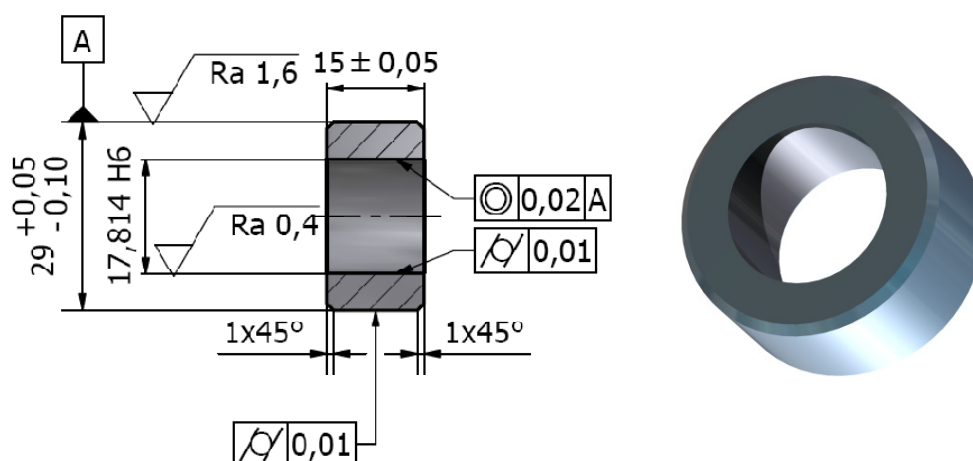
Pro změření posuvové síly F_f a řezného momentu M_c je využita měřící aparatura s piezoelektrickým dynamometrem od firmy Kistler s označením 9274. Dynamometr je propojen pomocí distribučního boxu s osmikanálovým nábojovým zesilovačem Kistler 5070.



Obr. 4.2 Schéma zapojení měřící aparatury podle literatury³⁰

4.1.2 Vzorek pro testování

Pro testování byla vybrána kruhová tyč nařezána na válce o délce 15 mm a průměru 29 mm (viz. obr. 4.3) z materiálu dle normy DIN 1.4404 odpovídající ČSN 17 349. Materiál vykazuje nízký obsah uhlíku s dobrou svařitelností. Mezi hlavní výhody patří odolnost vůči mezikrystalické korozi v agresivním prostředí do teploty 400 °C a vysoká houževnatost. Ocel je využívána ve farmaceutickém, potravinářském, chemickém a textilním průmyslu, kde je kladen důraz na zvýšenou odolnost proti neoxidujícím kyselinám nebo čistotu produktu.²⁷



Obr. 4.3 Geometrické požadavky vystruženého vzorku podle literatury³⁰

Tab. 4.1 Chemické složení testovaného materiálu podle literatury³⁰

Chemické složení materiálu	C	Si	Mn	P	Ni	Cr	Mo	S	N
Obsah [%]	0,016	0,39	1,4	0,027	11,21	17,31	2,11	0,026	0,052

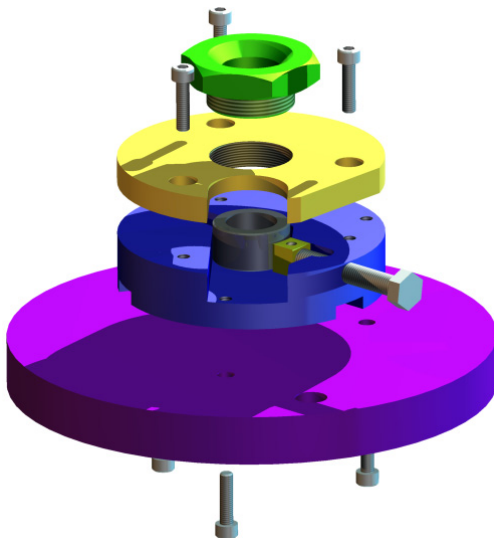
4.1.3 Přípravek pro upínání vzorků

Pro přesné vystředění a ustavení vzorků byl využit speciální upínací přípravek s konstrukcí znázorněnou na obrázku 4.4, kdy se vzorek zasouvá z boku přípravku. Vystředění a ustavení polotovaru je realizováno pomocí prizmatické konstrukce kruhové desky (modrá barva viz. obr. 4.4) s bočním upínáním a překryto vrchní kruhovou deskou (žlutá barva viz. obr. 4.4). Pro konečné dotažení a zároveň vstup pro nástroj slouží dutá matice, která vytváří tlak na čele vzorku. Tímto systémem upnutí nedochází k deformaci po obvodu obrobku.

Ovšem při měření nastal v přípravku zásadní problém s přívodem kapaliny do vystružené díry. Kapalina má za úkol snižovat tření mezi nástrojem a obrobkem při řezném procesu a zároveň umožnit lepší odvod třísek z místa řezu. Pokud jsme ale využili speciální přípravek (viz. obr. 4.4), kapalina se téměř nedostávala do místa řezu, neboť vnější chlazení nevytvářelo potřebný tlak vody mezi vrchní upínací maticí a rotující nástroj. Vnitřní chlazení nebylo na CNC stroji nainstalováno. Výsledkem byl extrémní

nárůst posuvové síly a řezného momentu v lokálních částech silového a momentového průběhu z důvodu vysokých hodnot tření nástroje s obrobkem.

Proto bylo zvoleno náhradní řešení v podobě univerzálního upínacího sklíčidla (viz. obr. 4.5). Při změření vzorků na 3D měřicím přístroji LK Integra bylo zjištěno, že hodnoty kruhovitosti a válcovitosti jsou ještě stále v tolerančním poli pro provedení experimentu.



4.4 Konstrukce upínacího přípravku



4.5 Standardní tříčelistový upínač

4.1.4 Stroj pro provedení experimentu

V experimentu je využit vysoce produktivní stroj s označením Tajmac ZPS MCV 1210. Jedná se o obráběcí centrum pracující v pěti osách, sloužící pro výrobu tvarově složitých součástí. Stroj je ovládán pomocí řídicího systému Sinumerik 840D.²⁸



Obr. 4.6 Tajmac ZPS MCV 1210²⁸

4.1.5 Nástroje pro provedení experimentu

Tab. 4.2 Technologický postup výroby díry³⁰

Operace a použité nástroje					
Číslo operace	Operace	Použitý nástroj			
1	Navrtávání	Středící vrták 1,5 x 60°			
2	Vrtání díry	Vrták DIN 338 HSSCo ø 10mm			
3	Rozšíření díry	Vrták SK M44 ø17 mm			
4	Vyvrátávání	Vyvrátávací tyč HF s VBD CCMT 060204 ø17,7 mm +0,05 mm			
5	Sražení hrany	Kruželový záhlubník 45°			
6	Vystružování	Tepelně upnutá vystružovací hlavice MT3 ø17,814			
Řezné podmínky v jednotlivých operacích					
Číslo operace	Průměr díry	Otáčky n [ot·min ⁻¹]	Posuv f [mm·ot ⁻¹]	Řezná rychlost v_c [m·min ⁻¹]	Posuvová rychlost v_f [m·min ⁻¹]
1	-	2500	0,05	35	125
2	10,000	1390	0,10	35	139
3	17,000	700	0,15	35	110
4	17,650	1100	0,10	60	110
5	-	1300	0,08	35	139
6	17,814	1100	0,42	60	462

4.1.6 Hodnocení průběhu posuvové síly a řezného momentu z naměřených dat

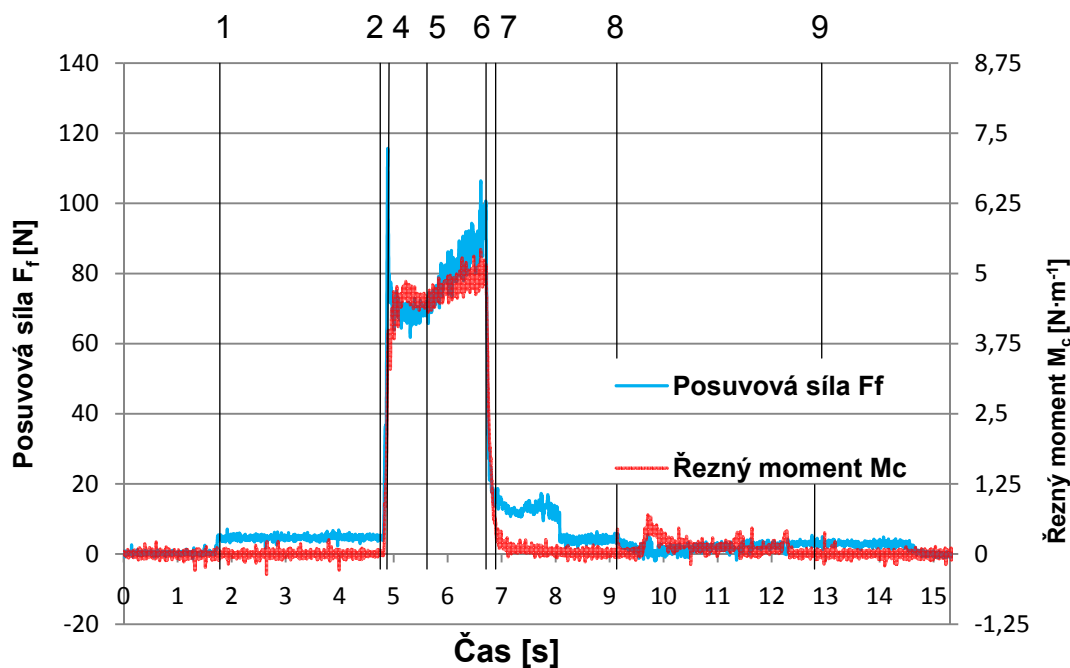
Z programu na počítači byla získána data ve formátu *txt* posuvové složky síly F_f (N), řezného momentu M_c (N·m⁻¹) a času t (s). Tyto veličiny byly dány do grafu jako závislost F_f , M_c na čase t (viz. obr. 4.7). Z geometrických parametrů nástroje a konstantního posuvu $f = 0,42$ mm·ot⁻¹ vystružovací hlavice lze analyticky určit v jakém čase se udály jednotlivé procesy nástroje při průchodu dírou (viz. tab. 4.3).

Tab. 4.3 Časový sled procesů při vystružování hlavice MT3

Oblast grafu	Popis procesu	Čas pro vykonání procesu [s]	Ujetá dráha při daném procesu [mm]
1 - 2	Doba mezi startem programu a sjezdu nástroje na nulovou souřadnici v ose Z	3,219	100,00
2 - 3	První zub jde do řezu a následně se zapojují další dva	0,016	0,12
3 - 4	Dvě vodítka se souběžně dotýkají povrchu, probíhá vystružování do okamžiku, kdy se zapojuje do vystružování kalibrační část nástroje	0,143	1,1
4 - 5	Všechny břity a vodítka jsou v řezu plnou plochou	0,621	4,78

5 - 6	Probíhá řezání, až do okamžiku kdy zub 1 vyjíždí z řezu	1,169	9,00
6 - 7	Vyjíždí postupně všechny zuby	0,016	0,12
7 - 8	Vyjíždí z díry zbylá část výstružníku s časovými prodlevami	2,413	10,88
8 - 9	Výstružník se vrací v ose Z+ až do okamžiku, kdy poslední zub vyjede z díry	3,942	26,50

Pásmo 2-3 a 3-4 je v grafu sloučené, protože se jedná o velmi tenkou oblast v setinách sekundy. Oblast je analyzována v samostatném grafu (viz. obr. 4.8)



Obr. 4.7 Graf závislosti posuvové síly a rezného momentu na čase

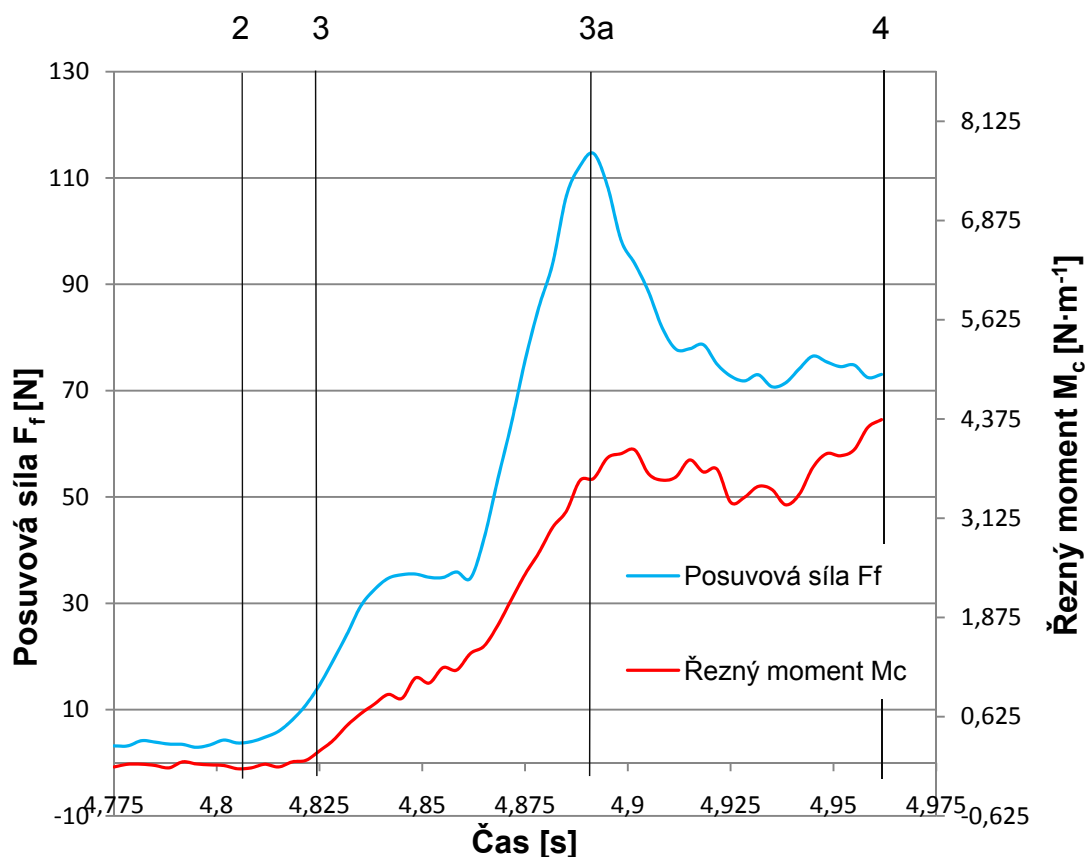
Z grafu je možné vyčíst jednotlivé děje, které provázely proces vystružování, jak popisuje tabulka 4.3.

V experimentu bylo využito vnější chlazení, které se projevilo na silovém průběhu. Přesněji řečeno, jedná se oblast 1-2, kde síla skokově narostla přibližně o 4 N ve směru osy Z.

Jednou z důležitých oblastí grafu je pásmo 2-4, kdy první břit vniká do materiálu a následně se přidávají další dva, nakonec souběžně zabírají vodítka. Tři zuby nástroje jsou rovnoměrně rozmístěny v rozsahu 210°, tudíž nejsou rozmístěny rovnoměrně po obvodu vystružovací hlavice MT3. Tato skutečnost má za následek nerovnoměrné zatížení do doby, než se souběžně zapojí dvě vodítka, které podpoří zuby v řezu a stabilizují proces rotace

nástroje. Tento proces znázorňuje i graf na obrázku 4.8, kdy v oblasti 2-3a postupně narůstá jak posuvová síla, tak i řezný moment. Tento jev lze vysvětlit postupným zapojením břitů do řezu a následným zvyšováním hloubky odebírané třísky. Osa 3a vyznačuje čas, kdy se do procesu zapojily vodítka. Z grafu lze pozorovat, že od tohoto okamžiku nastal výrazný pokles posuvové síly a následná stabilizace. Řezný moment vykazuje spíše jen stabilizaci bez výrazného skoku.

Vysoký nárůst v bodě 3a byl sledován u všech vyhodnocených silových průběhů. Snížení prudkého navýšení posuvové síly by mohla částečně eliminovat změna geometrie na čele nástroje.



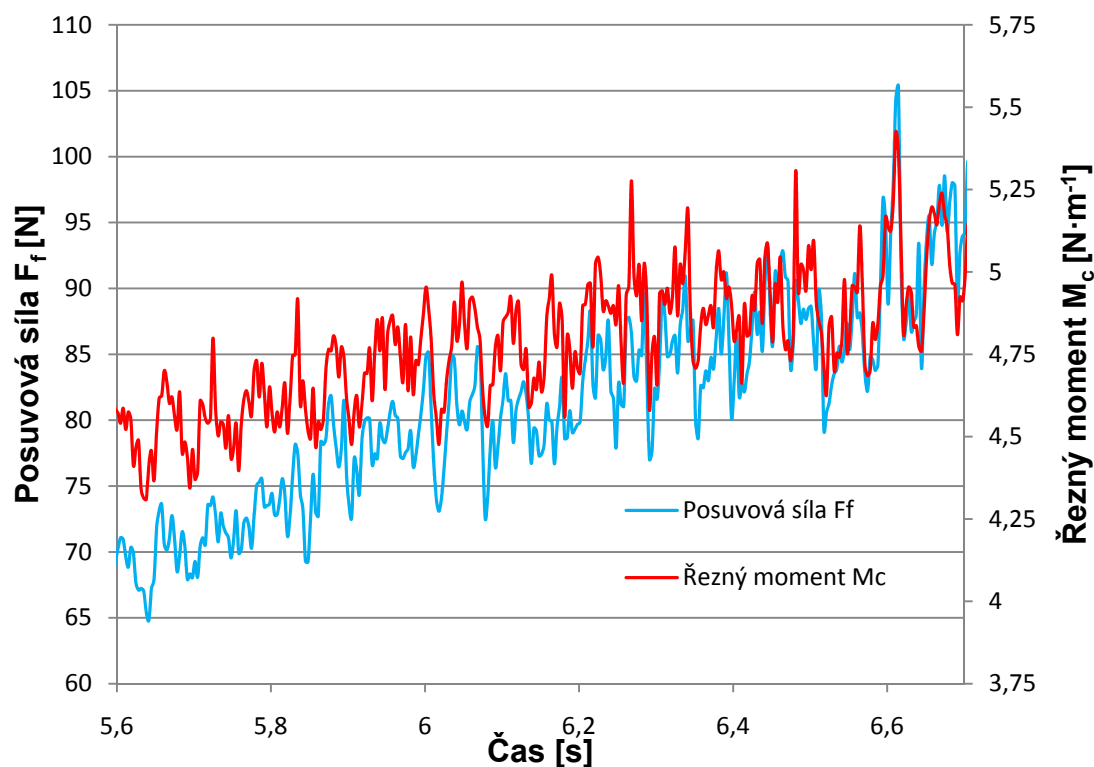
Obr. 4.8 Separovaná oblast 2-4

Tab. 4.4 Časový sled procesů v oblasti grafu 2-4

Oblast grafu	Popis procesu	Čas pro vykonání procesu [s]	Ujetá dráha při daném procesu [mm]
2 - 3	První zub jde do řezu a následně se zapojují další dva	0,016	0,120
3 - 3a	Všechny tři zuby jsou v řezu a průřez třísky narůstá	0,065	0,500
3a - 4	Dvě vodítka se souběžně dotýkají povrchu, probíhá vystružování do okamžiku, kdy se zapojuje do vystružování kalibrační část nástroje	0,143	1,100

4.1.7 Srovnání silového, momentového zatížení u nového a pak následně opotřebovaného nástroje MT3 v plném vytížení

Další sledovaná oblast v naměřeném grafu se týká pásma 5-6, neboli časový okamžik, kdy vystružovací hlavice byla plně vytížena a všechny její části byly plně zapojeny celou svou plochou v procesu.



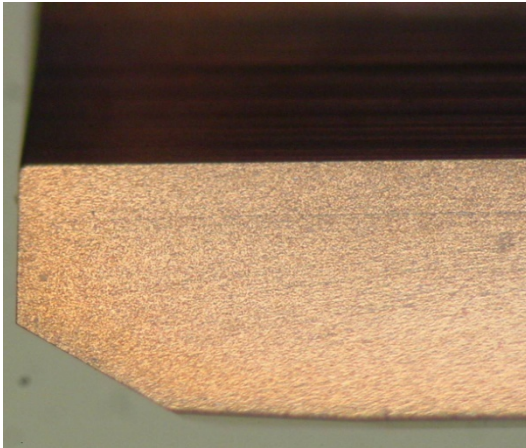
Obr. 4.9 Separovaná oblast 5-6

Graf na obrázku 4.9 má vzrůstající tendenci s lokálními silovými a momentovými výchyly. Náhlý nárůst hodnot v určitých pasážích může být způsoben tvrdostí a houževnatostí obráběného materiálu. Dále pak adhezí, která se v průběhu vystružování tvoří na vodících částech nástroje (viz. obr. 4.13), nebo nedostatečným chlazením v místě řezu. Jelikož nebylo k dispozici vnitřní chlazení, nástroj se daleko rychleji opotřebovával a při zvýšení tření docházelo k vyšší náchylnosti k vytváření adheze. Ve výsledku to znamená, že i když by vodící části neměly mít řeznou funkci, ulpěné částice kovu vytváří výstupky, které řezou a vytváří zmetkovitý povrch.

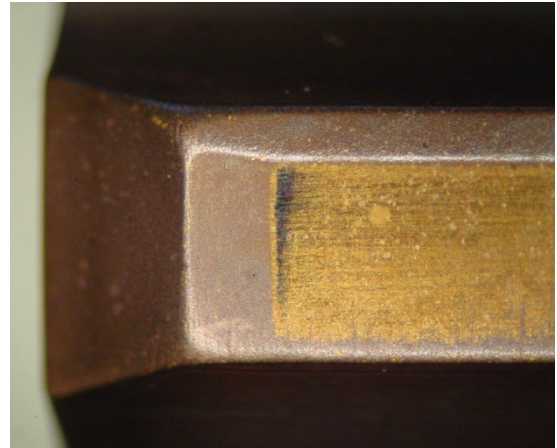
Z dvaceti silových průběhů bylo separováno 350 hodnot F_f a M_c odpovídající pásma 5-6, které byly použity pro statickou analýzu.

V rámci pozorování oblasti 5-6 bylo naměřeno a vyhodnoceno dvacet vzorků, z toho deset vzorků vyrobených novým nástrojem (viz. obr. 4.10, 4.11) a dalších deset tímtož nástrojem, již opotřebovaným (viz. obr. 4.12, 4.13).

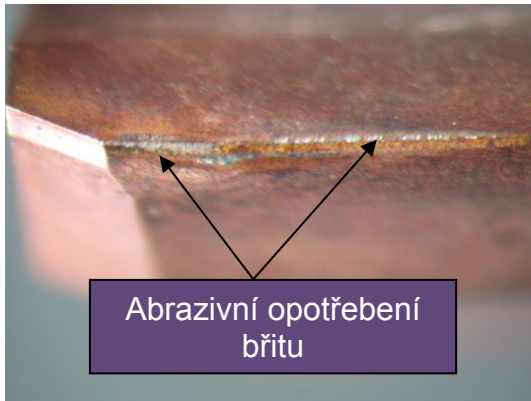
Následující vyhodnocené grafy porovnávají, zda docházelo ke změnám posuvové síly a řezného momentu při vystružování pomocí výše uvedeného nástroje s povlakem HNS².



Obr. 4.10 Geometrie břitu nové vystružovací hlavice MT3



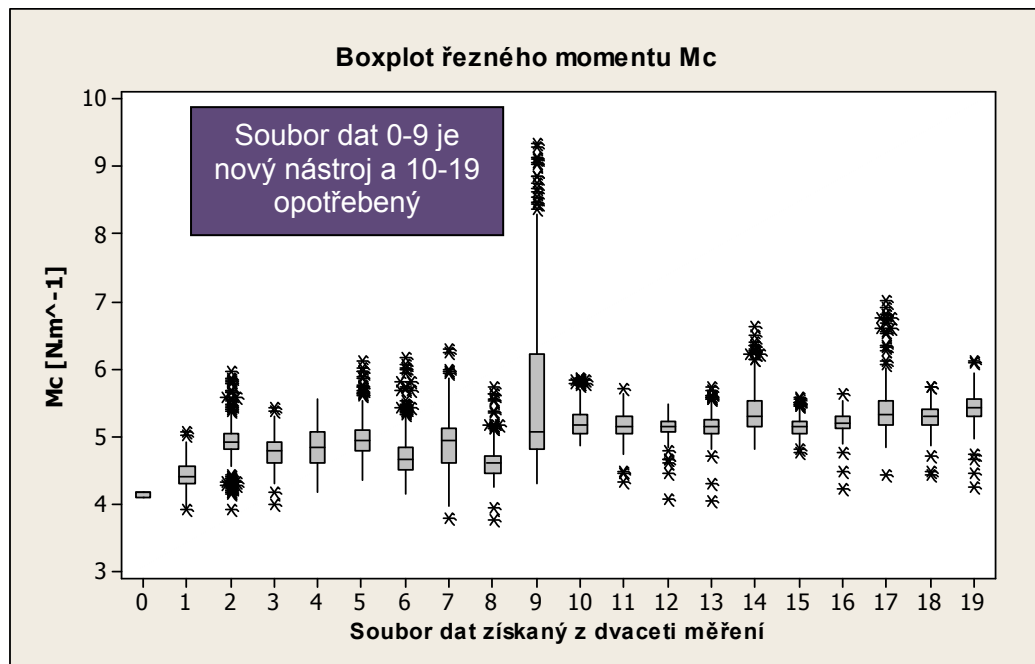
Obr. 4.11 Geometrie vodička nové vystružovací hlavice MT3

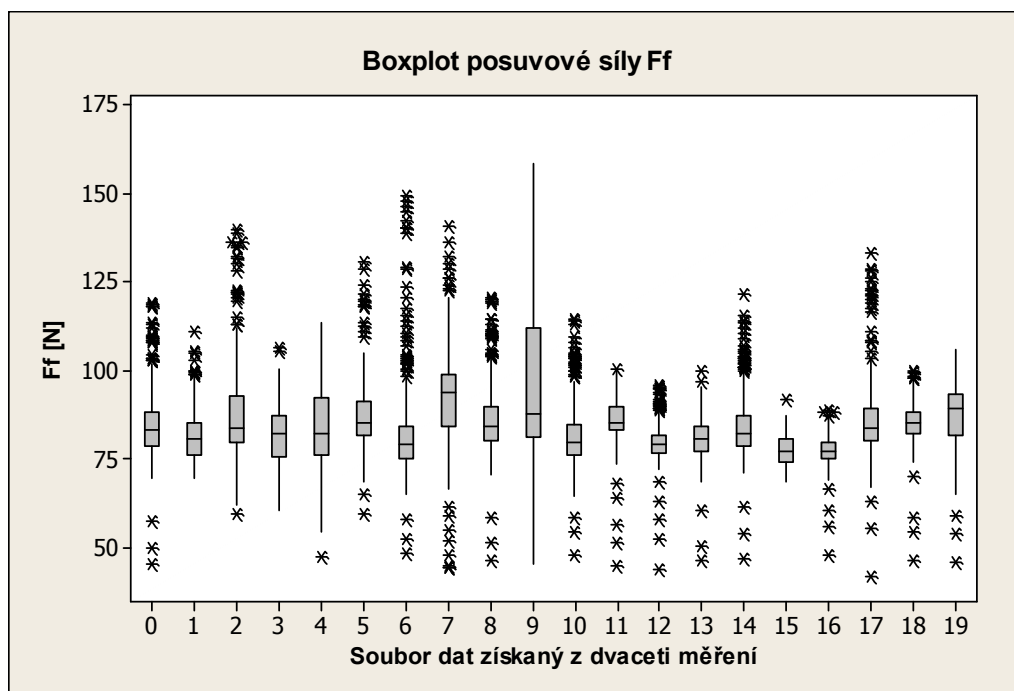


Obr. 4.12 Geometrie břitu opotřebované vystružovací hlavice MT3

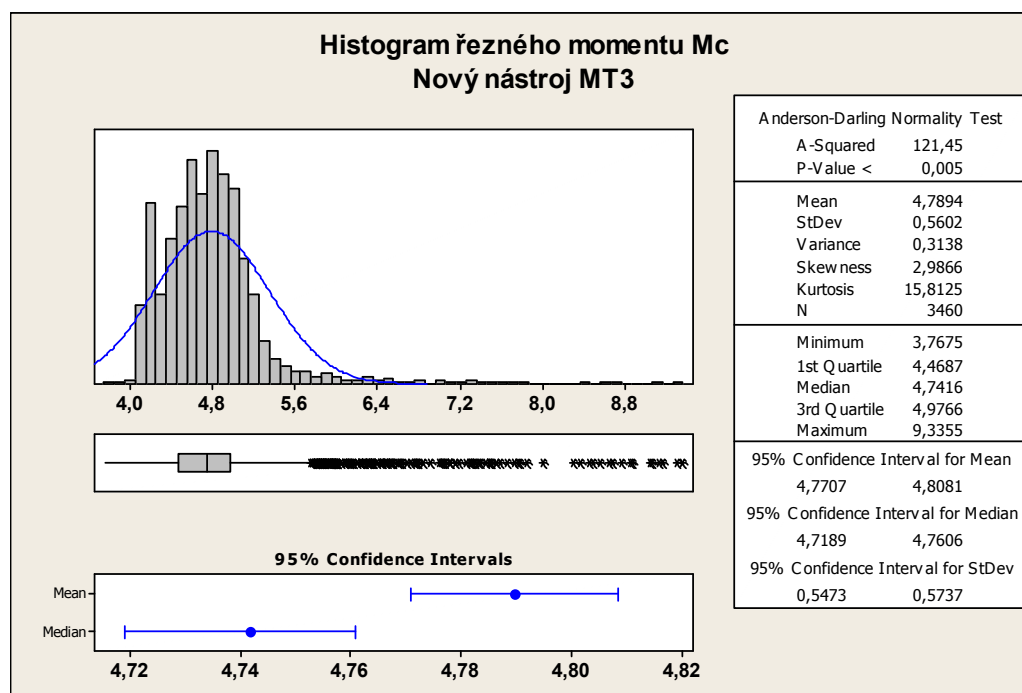


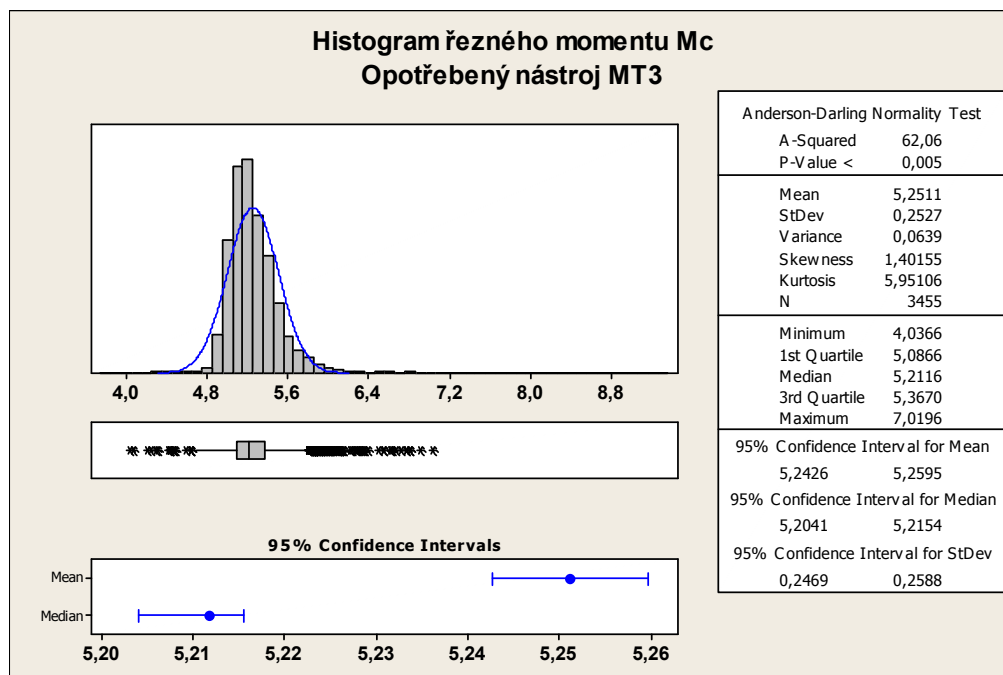
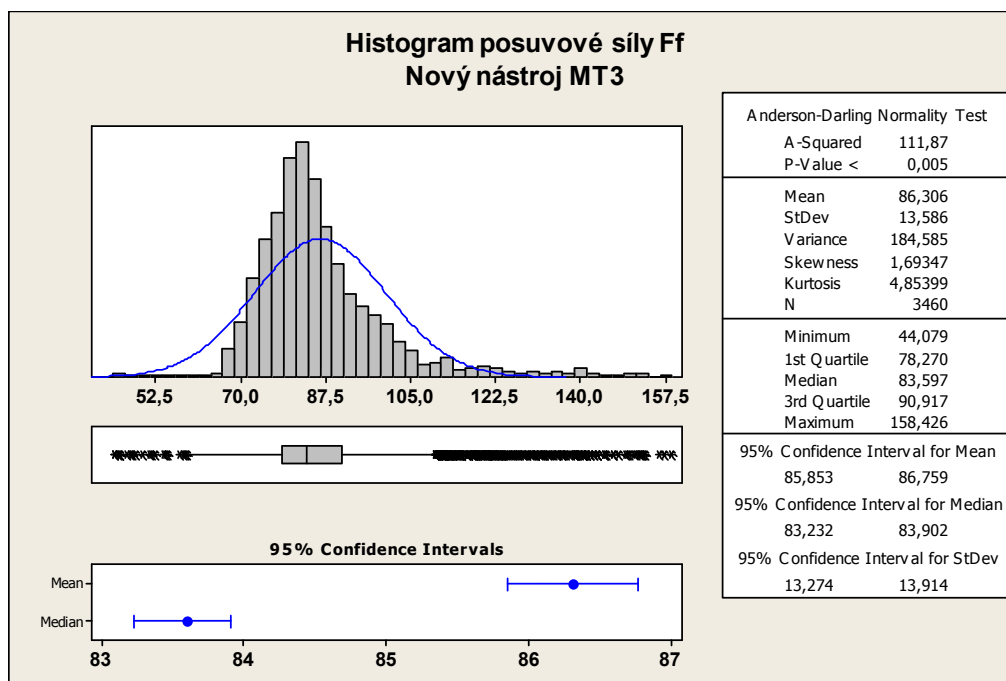
Obr. 4.13 Geometrie vodička opotřebované vystružovací hlavice MT3

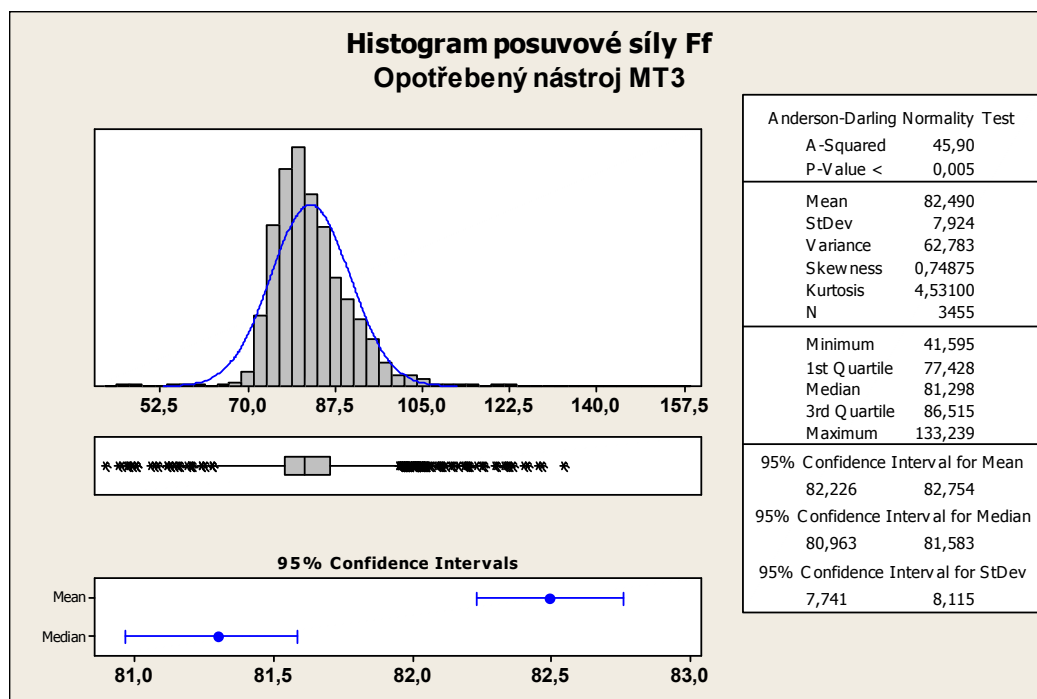
Obr. 4.14 Boxplot řezného momentu M_c

Obr. 4.15 Boxplot posuvové síly F_f

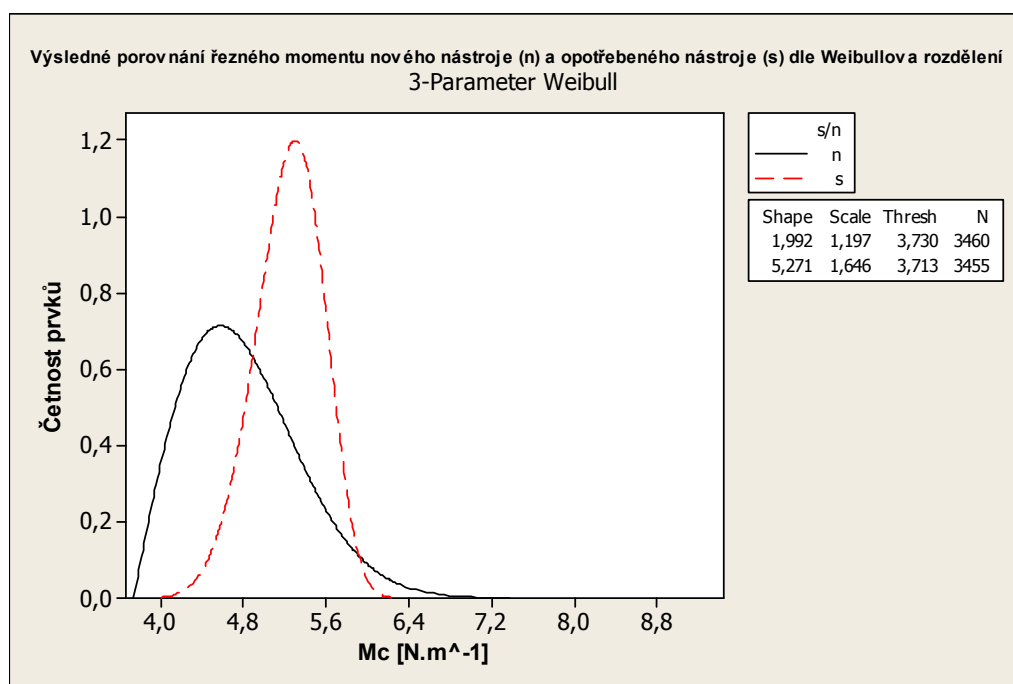
Z vytvořených boxplotů je možno vypožorovat, že hodnoty u nového nástroje (soubor dat 0-9) mají ve většině případů větší rozptyl než u nástroje opotřebovaného (soubor dat 10-19). Jelikož bylo množství hodnocených dat obsáhlé (přibližně 7000 hodnot řezného momentu a 7000 hodnot posuvové síly) statistické testy zamítly hypotézu o jakémkoli rozdělení, protože i malá odchylka od daného rozdělení je statisticky významná.

Obr. 4.16 Četnost řezného momentu M_c nového nástroje MT3

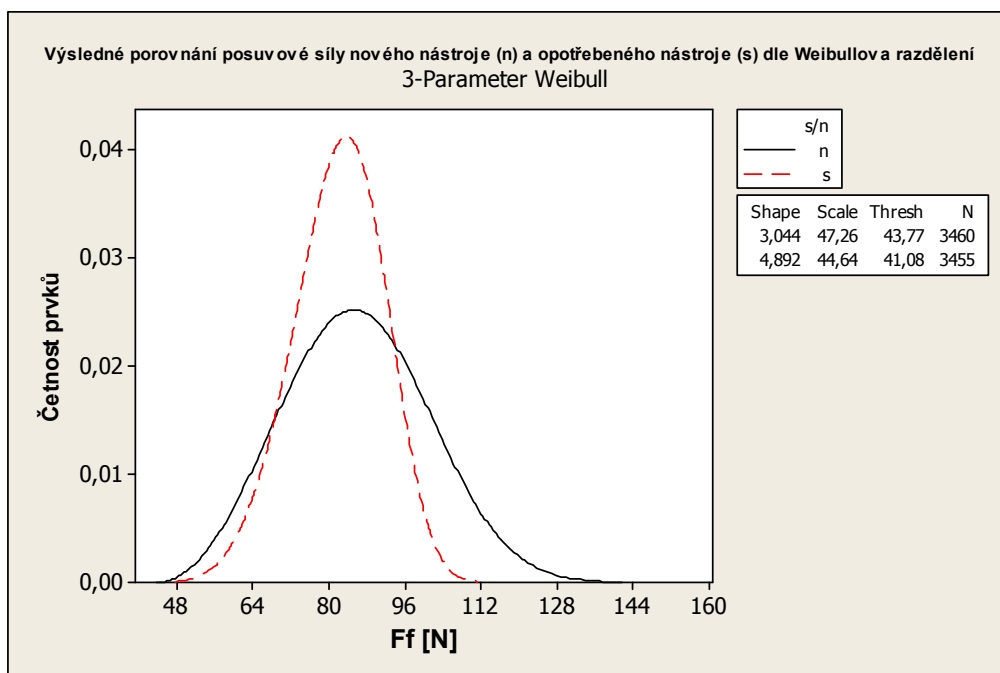
Obr. 4.17 Četnost řezného momentu M_c opotřebeného nástroje MT3Obr. 4.18 Četnost posuvové síly F_f nového nástroje MT3

Obr. 4.19 Četnost posuvové síly F_f opotřebeného nástroje MT3

Vytvořené histogramy řezného momentu a posuvové síly (viz. obr. 4.16, 4.17, 4.18 a 4.19) ukazují, že se nejedná o normální rozdělení. Do grafu byla vložena křivka, která pouze demonstrativně vyznačuje průběh normálního rozdělení pro zobrazení rozdílu. Dále je pod histogramem umístěn boxplot všech hodnot ze kterých byl histogram sestaven.



Obr. 4.20 Srovnání řezného momentu nového a opotřebeného nástroje dle Weibulla



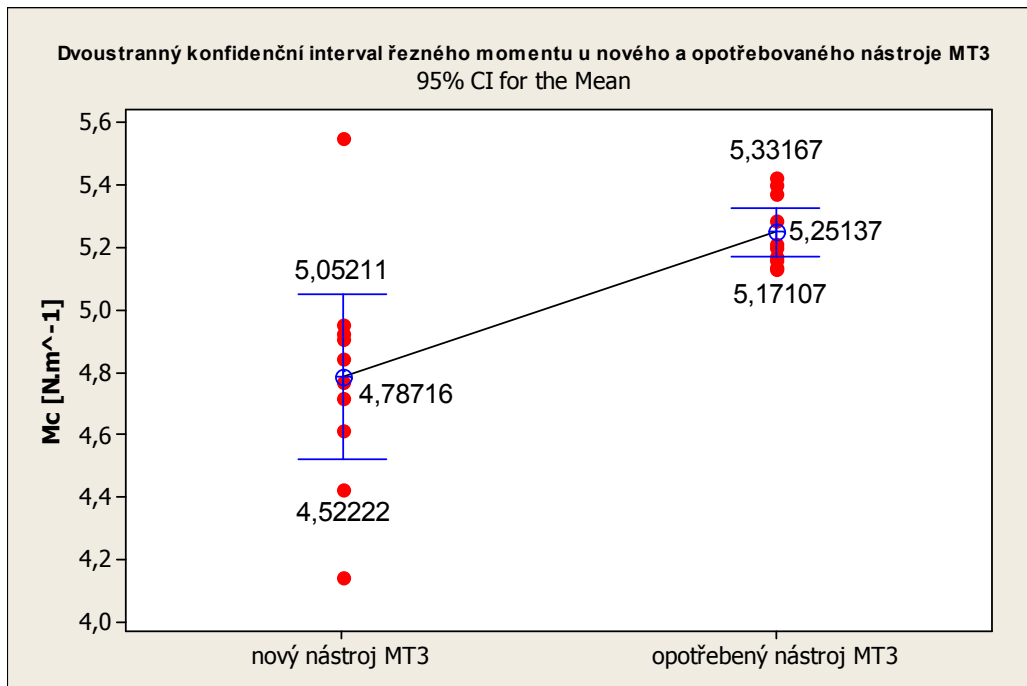
Obr. 4.21 Srovnání posuvové síly nového a opotřebeného nástroje dle Weibulla

Jak již bylo zmíněno v minulém odstavci zamítá se jakákoli hypotéza o rozdělení. Protože jsou ovšem data výrazně asymetrická a práh od nuly je různý, pro grafické znázornění bylo zvoleno Weibullovo rozdělení (viz. obr. 4.20 a 4.21), kde je srovnána křivka nového a opotřebeného nástroje MT3.

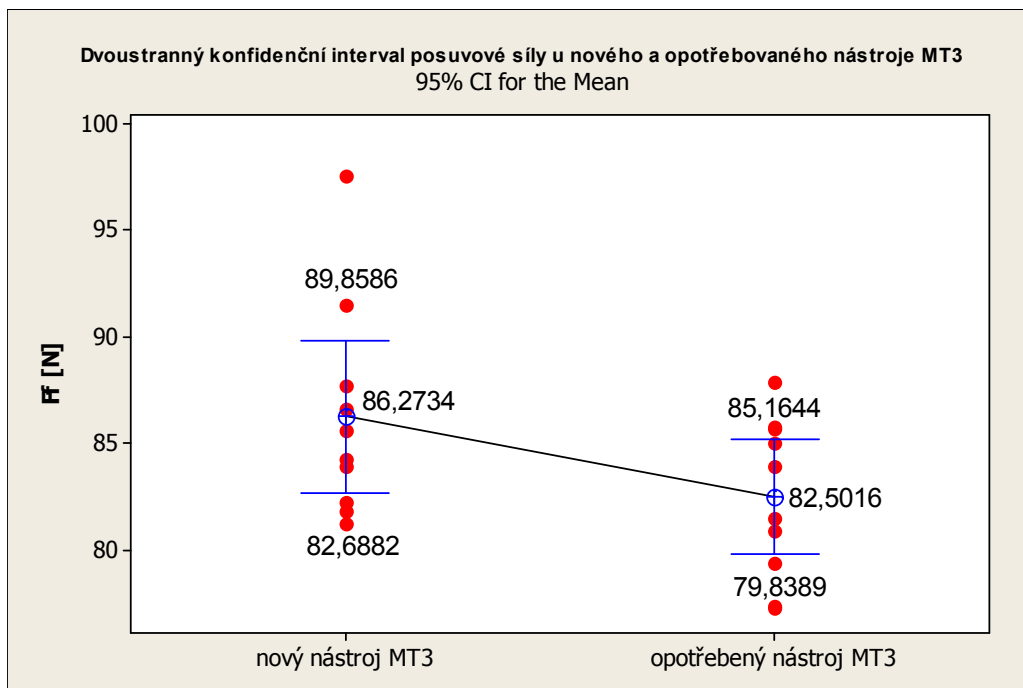
Srovnání řezných momentů a posuvové síly v obou případech ukazuje na to, že rozptyl hodnot u nového nástroje byl vyšší nežli u opotřebeného.

Tento jev je možné vysvětlit postupným obrušováním jednotlivých zubů a vodiček nástroje, které měly geometrické odchylky vzniklé při jejich výrobě. Odchytky geometrie mohly vzniknout již při samotném obrábění tvaru nástroje a také při nerovnoměrném povlakování. Vystružovací hlavici ovšem nelze vytvořit v absolutních hodnotách. Jde pouze o to, v jaké míře se mohou tyto chyby eliminovat, a tím pádem i zkvalitnit výrobu.

Pro další názornost a potvrzení rozptylu hodnot řezného momentu a posuvové síly, byly vytvořeny grafy (viz. obr. 4.22 a 4.23), které vyznačují střední hodnoty u všech dvaceti měření. Data se ale na rozdíl od minulých vyhodnocených grafů řídí normálním rozdělením. Jelikož se jedná o normální rozdělení, byla vypočtena střední hodnota z deseti měření a dvoustranný konfidenční interval s konfidenční úrovní 0,95.



Obr. 4.22 Dvoustranný konfidenční interval posuvové síly dvaceti hodnot u nového a opotřebovaného nástroje MT3



Obr. 4.23 Dvoustranný konfidenční interval posuvové síly dvaceti hodnot u nového a opotřebovaného nástroje MT3

Srovnání řezných momentů (viz. obr. 4.22) u nového a opotřebeného nástroje MT3 jasně ukazují, že střední hodnota řezných momentů u nového nástroje MT3 je přibližně o $0,46 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ nižší než u opotřebeného. Ovšem při srovnání dvoustranných konfidenčních intervalů vyplývá, že nová hlavice MT3 dosahuje vyššího rozptylu hodnot než hlavice opotřebené. Zde se opět potvrzuje geometrická stabilizace opotřebeného nástroje, jak již bylo zmíněno v minulých odstavcích. Nižší řeznou sílu u neopotřebené hlavice lze vysvětlit tím, že u jednotlivých zubů nedošlo k opotřebení ostří břitu, tudíž nástroj nemusel vykazovat takovou sílu při průchodu břitu materiálem.

Při porovnání posuvových sil (viz. obr. 4.23) již tak výrazný rozdíl v konfidenčním intervalu není. Pouze střední hodnota posuvové síly u opotřebené hlavice MT3 vypovídá o snížení hodnot průměrně o 4 N.

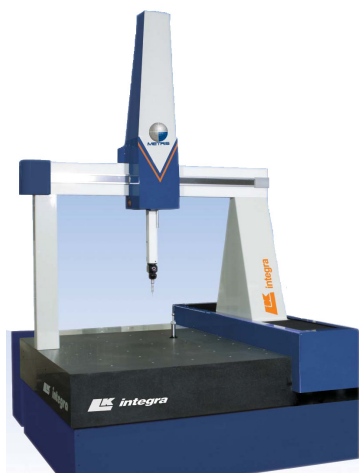
4.2 Analýza vybraných parametrů integrity povrchu u vzorků vyrobených novým a pak následně opotřebeným nástrojem MT3

Měření a vyhodnocení jednotlivých vlastností vystružené díry proběhlo u dvaceti vzorků které byly silově analyzovány v předchozí kapitole.

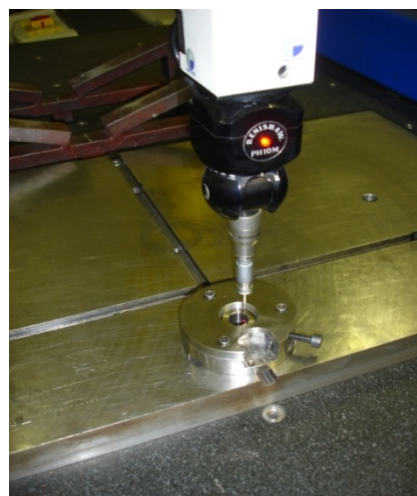
4.2.1 Dosažená kruhovitost a válcovitost vzorků

Měření kruhovitosti a válcovitosti bylo provedeno na 3D měřícím portálovém přístroji LK Integra (1500 x 1000 x 800 mm), pracujícím v tisícinách milimetru. Přístroj je řízen a programován ve třech osách pomocí softwaru Camino.

Kruhovitosti vzorků byly měřeny ve třech hladinách na vnitřním průměru a to v hloubce 3 mm, 6 mm a 12 mm od čela, přičemž sonda vyhodnotila kruh v každé hladině z dvaceti dotyků po vnitřním průměru. Z jednotlivých kruhovitostí a průměru byla vypočtena hodnota válcovitosti.



Obr. 4.24 3D měřící přístroj LK Integra³¹



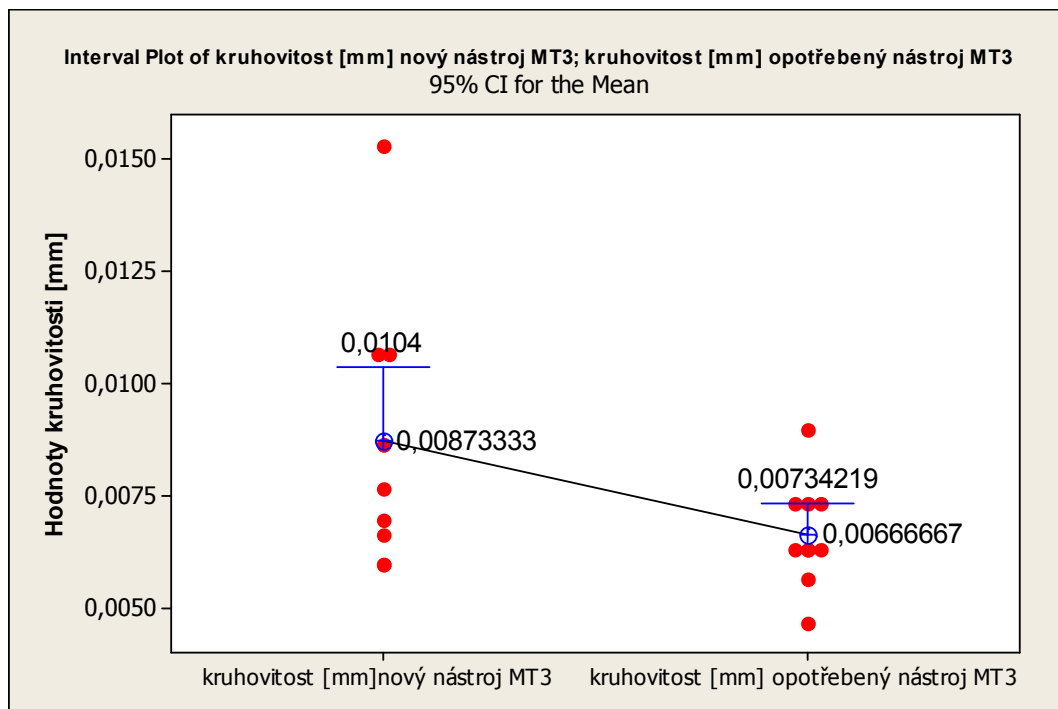
Obr. 4.25 Měření kruhovitosti a válcovitosti vzorků

Tab. 4.5 Hodnoty kruhovitosti a válcovitosti u nového nástroje

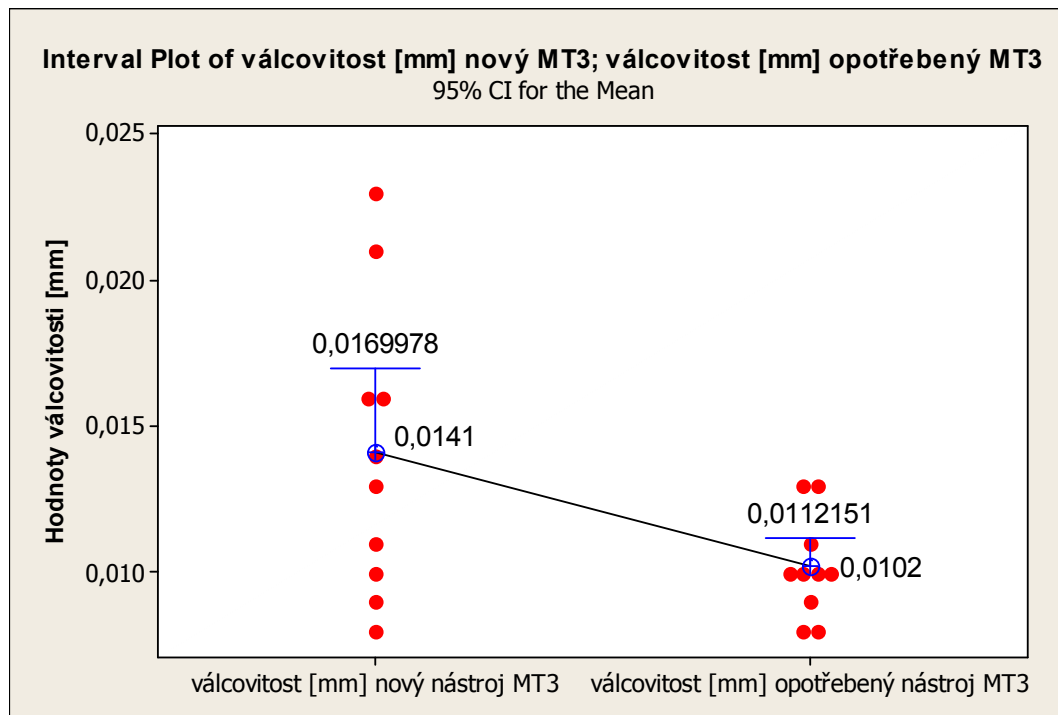
Vzorek	Válcovitost [mm]	Kruhovitost [mm] v hloubce 3 mm	Kruhovitost [mm] v hloubce 6 mm	Kruhovitost [mm] v hloubce 12 mm	Průměrná hodnota kruhovitosti [mm]
1	0,016	0,01	0,007	0,009	0,009
2	0,014	0,012	0,010	0,010	0,011
3	0,023	0,016	0,010	0,020	0,015
4	0,011	0,004	0,006	0,011	0,007
5	0,021	0,014	0,007	0,011	0,011
6	0,013	0,007	0,006	0,010	0,008
7	0,008	0,005	0,005	0,008	0,006
8	0,010	0,008	0,008	0,004	0,007
9	0,016	0,013	0,005	0,008	0,009
10	0,009	0,004	0,007	0,007	0,006

Tab. 4.6 Hodnoty kruhovitosti a válcovitosti u opotřebeného nástroje

Vzorek	Válcovitost [mm]	Kruhovitost [mm] v hloubce 3 mm	Kruhovitost [mm] v hloubce 6 mm	Kruhovitost [mm] v hloubce 12 mm	Průměrná hodnota kruhovitosti [mm]
1	0,011	0,006	0,005	0,011	0,007
2	0,010	0,004	0,005	0,010	0,006
3	0,013	0,008	0,009	0,010	0,009
4	0,010	0,004	0,005	0,010	0,006
5	0,009	0,006	0,008	0,008	0,007
6	0,010	0,008	0,007	0,004	0,006
7	0,008	0,004	0,003	0,007	0,005
8	0,013	0,009	0,005	0,008	0,007
9	0,008	0,004	0,005	0,008	0,006
10	0,010	0,005	0,004	0,010	0,006



Obr. 4.26 Jednostranný konfidenčný interval strednej hodnoty novej a opotrebené hlavice MT3 s horní mezí pro kruhovitosť



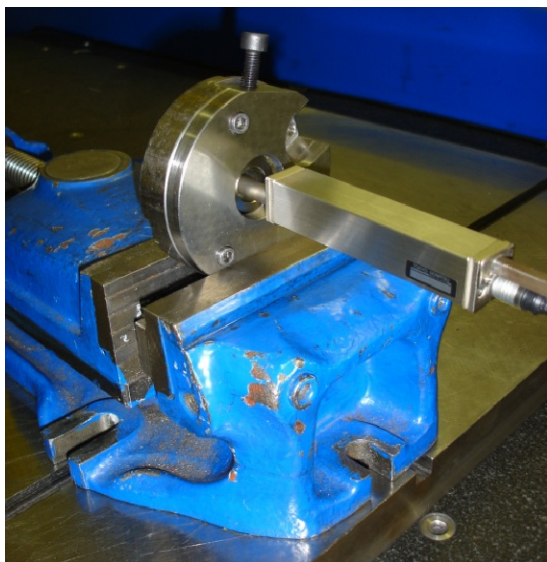
Obr. 4.27 Jednostranný konfidenčný interval strednej hodnoty s horní mezí novej a opotrebené hlavice MT3 pro válcovitosť

Úchyly rozměrů kruhovitosti a válcovitosti naměřených vzorků vyrobených novým a opotřebeným nástrojem, mají spojitý náhodný charakter a řídí se normálním rozdělením. Grafy na obrázcích 4.26 a 4.27 znázorňují střední hodnotu souboru dat a vypočtenou horní mezní odchylku jednostranného konfidenčního intervalu střední hodnoty s konfidenční úrovní 0,95.

Při výsledném porovnání nového a opotřebeného nástroje vyplývá, že jak střední hodnota souboru dat, tak i velikost horní mezní úchyly u kruhovitosti a válcovitosti jsou u nového nástroje vyšší než u opotřebeného. V konkrétních hodnotách vychází průměrná hodnota kruhovitosti nového nástroje o přibližně dvě tisíce milimetru vyšší a podobně tak i velikost horní mezní úchyly. Válcovitost je na tom podobně, kdy průměrná hodnota a horní mezní odchylka nového nástroje vychází průměrně o čtyři až pět desetin milimetru vyšší. Dále je možno pozorovat u nového nástroje daleko vyšší extrémní hodnot válcovitosti a kruhovitosti.

Tento jev lze vysvětlit tím, že při výrobě nového nástroje došlo k úchybkám geometrie břitů a vodítek. Jednotlivé části vystružovací hlavičky byly více zatěžovány a tudíž i více opotřebovány do okamžiku, než se geometrie vystružovacího nástroje rozměrově stabilizovala. Tuto skutečnost potvrzují i hodnoty rozptylu kruhovitosti a válcovitosti u opotřebené díry.

4.2.2 Dosažená textura vzorků



Obr. 4.28 Průběh měření drsnosti povrchu

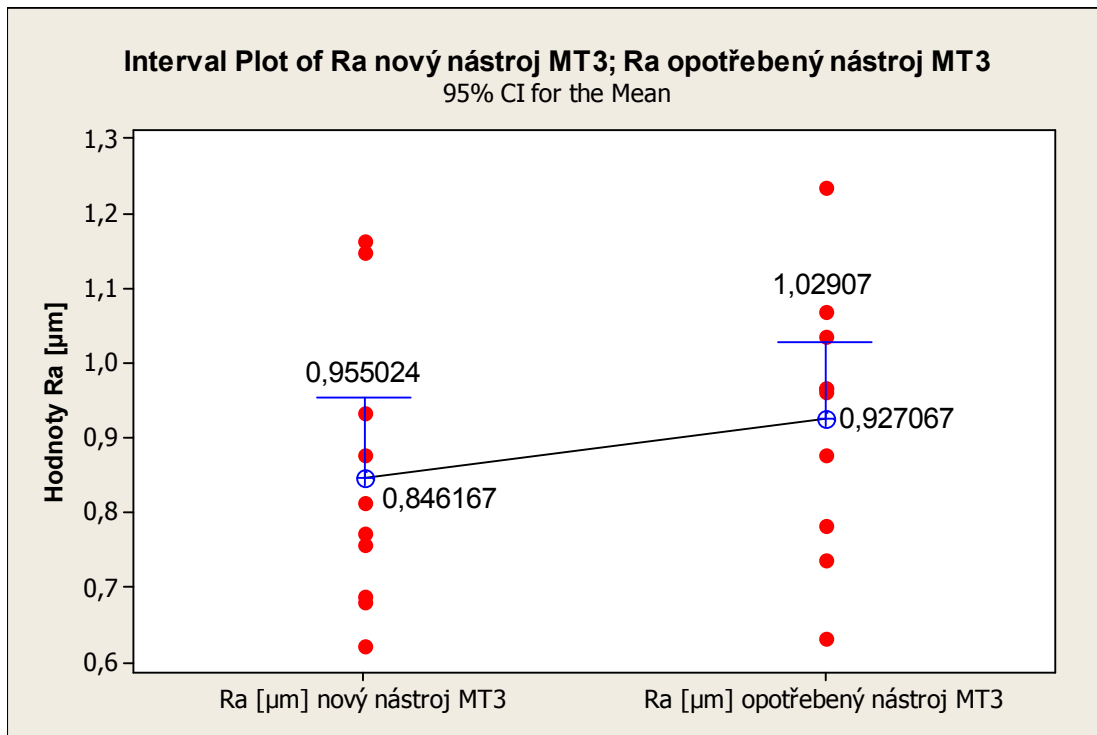
Měření textury povrchu proběhlo pomocí dílenského drsnoměru ZEISS typ HandySurf E-35A opět u stejných vzorků jako při měření kruhovitosti a válcovitosti. Vyhodnocovány a statisticky zpracovávány jsou hodnoty střední aritmetické úchyly R_a a největší výšky profilu R_z . Měření proběhlo ve třech bodech v rozmezí 120° po vnitřním průměru po měřené dráze 4 mm dle normy ISO'97/JIS'01/DIN. Naměřené hodnoty jsou zobrazeny v tabulkách 4.8 a 4.9 a dále pak statisticky interpretovány grafy na obrázcích 4.29 a 4.30.

Tab. 4.8 Parametry textury u nového nástroje

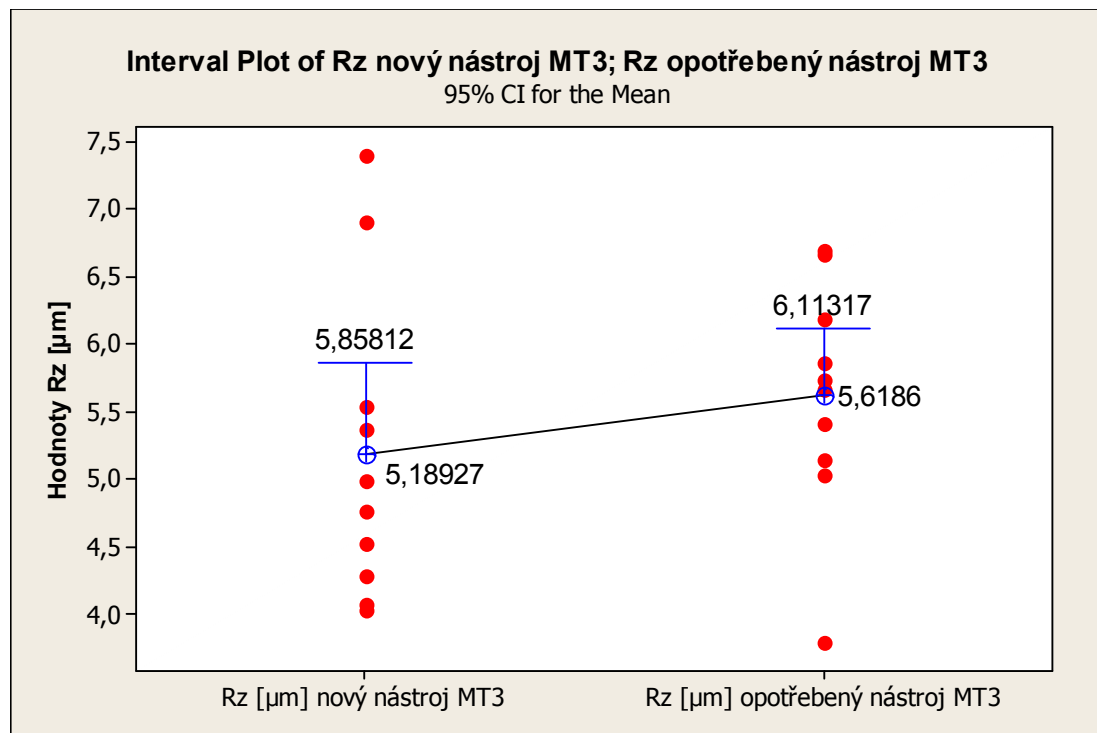
Vzorek	R _a [μm] v bodě 1	R _a [μm] v bodě 2	R _a [μm] v bodě 3	Střední hodnota R _a [μm]	R _z [μm] v bodě 1	R _z [μm] v bodě 2	R _z [μm] v bodě 3	Střední hodnota R _z [μm]
1	0,736	0,811	0,898	0,815	4,610	4,345	5,333	4,763
2	0,800	0,860	0,970	0,877	4,410	4,940	5,640	4,997
3	0,730	0,740	0,800	0,757	4,330	3,930	4,590	4,283
4	1,200	1,180	1,110	1,163	7,900	7,440	6,830	7,390
5	1,140	1,030	1,280	1,150	6,890	6,220	7,610	6,907
6	1,300	0,730	0,770	0,933	6,200	4,820	5,070	5,363
7	0,800	0,820	0,700	0,773	4,000	4,100	4,000	4,033
8	0,540	0,640	0,690	0,623	4,130	4,600	4,860	4,530
9	0,720	0,630	0,690	0,680	4,310	3,680	4,260	4,083
10	0,700	0,790	0,580	0,690	5,000	6,490	5,140	5,543

Tab. 4.8 Parametry textury u opotřebeného nástroje

Vzorek	R _a [μm] v bodě 1	R _a [μm] v bodě 2	R _a [μm] v bodě 3	Střední hodnota R _a [μm]	R _z [μm] v bodě 1	R _z [μm] v bodě 2	R _z [μm] v bodě 3	Střední hodnota R _z [μm]
1	1,070	0,900	1,140	1,037	6,130	4,950	6,120	5,733
2	0,530	0,890	0,930	0,783	3,940	4,730	6,420	5,030
3	0,500	0,700	0,700	0,633	3,400	4,000	4,000	3,800
4	0,900	0,890	1,100	0,963	5,500	5,100	6,400	5,667
5	0,900	1,100	0,900	0,967	5,300	5,730	5,200	5,410
6	0,890	0,840	0,900	0,877	5,930	5,420	6,230	5,860
7	0,810	0,700	0,700	0,737	5,220	5,040	5,190	5,150
8	0,900	0,900	1,100	0,967	6,200	5,140	7,200	6,180
9	1,310	1,100	1,300	1,237	7,180	6,000	6,800	6,660
10	1,021	1,203	0,988	1,071	6,987	5,989	7,112	6,696



Obr. 4.29 Jednostranný konfidenční interval střední hodnoty s horní mezí pro střední aritmetickou úchylku profilu R_a



Obr. 4.30 Jednostranný konfidenční interval střední hodnoty s horní mezí pro nejvyšší výšku profilu R_z

Střední aritmetické úchyly profilu a nejvyšší hodnoty výšky drsnosti profilu vzorků mají opět jako v předchozím případě spojitý náhodný charakter a řídí se normálním rozdělením s konfidenční úrovní 0,95. Opět byla vypočtena střední hodnota souboru dat s horním jednostranným intervalem.

Z dosažených výsledků a následné statistické interpretace je patrné, že střední hodnota profilu R_a a její horní mezní úchylka vycházela o přibližně pět setin mikrometru vyšší. Podobný charakter má i statistické porovnání nejvyšší výšky profilu s její horní mezní odchylkou, kdy opotřebený nástroj dosahuje v průměru o přibližně pět desetin mikrometru vyšší hodnoty.

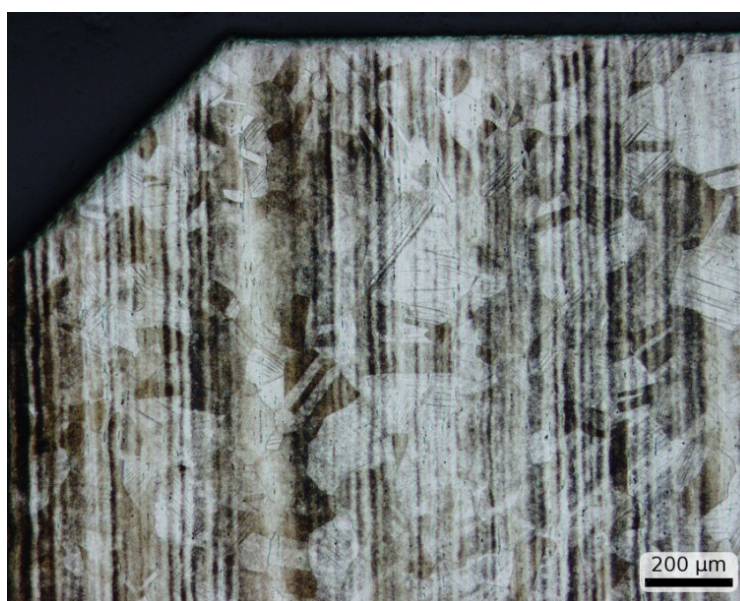
Střední aritmetické hodnoty profilu vychází přibližně o 0,5 μm vyšší, než li uvádí výrobce nástrojů *HAM-FINAL*. Tato vysoká odchylka může mít několik vysvětlení:

- nedostatek přívodu kapaliny do místa řezu vlivem absence vnitřního chlazení, tím pádem vyšší koeficient tření a špatné odplavování třísky z místa řezu,
- špatně zvolený posuv, posuv byl příliš vysoký a vzorky jsou vyrobeny z vysoce houževnatého, tvrdého materiálu a jiné.

4.2.3 Mikrostruktura povrchu vzorků

Vystružené vzorky byly rozřezány tak, aby bylo možné znázornit povrch po vystružení. Poté byly zalisovány, vybroušeny, vyleštěny a nakonec naleptány, aby byly patrné hranice zrn. Takto připravené vzorky byly snímány na mikroskopu s označením Olympus GX 71 a nafoceny na kameře Olympus DP 11 s padesátinásobným zvětšením (viz. obr. 4.30).

Výsledky ovšem ukázaly, že nedošlo ke změnám v povrchové vrstvě, jelikož materiál je značně houževnatý s vysokou tvrdostí a při procesu vystružování nepůsobil na vzorek dostatečný tlak a teplota, které by zapříčinily deformaci zrn nebo vznik ovlivněných oblastí.



Obr. 4.30 Mikrostruktura vzorku po vystružování

ZÁVĚR

Při grafickém znázornění pomocí Weibullova rozdělení a konfidenčních intervalů bylo zřejmé, že opotřebený nástroj měl menší rozptyl hodnot posuvové síly a řezného momentu nežli nový. Sestavené boxploty dále ukazovaly, že nová hlavice MT3 obsahovala větší množství extrémních hodnot. Tyto skutečnosti byly vysvětleny pomocí geometrické stabilizace z důvodu vlivu opotřebení. Statistické výsledky dále poukazyvaly na to, že výsledná střední hodnota řezného momentu byla vyšší u opotřebené hlavice nežli u nové. Opačně tomu bylo u síly posuvové. Vyšší řezný moment u nástroje s opotřebením lze vysvětlit tím, že hlavice musela vynaložit větší sílu při průchodu materiálem, jelikož u břitů a vodítek došlo k abrazivním a adhezním účinkům.

Měření a následné statistické interpretace ukázaly, že vzorky vyrobené za využití opotřebeného nástroje MT3, dosahovaly vyšší přesnosti střední hodnoty kruhovitosti a válcovitosti. Zároveň bylo patrné, že opotřebený nástroj dosahoval nižší hodnoty horního konfidenčního intervalu, nežli nový nástroj MT3. Vyhodnocená textura povrchu, přesněji řečeno střední aritmetická odchylka a nejvyšší výška profilu, dosáhly nižších hodnot u nového nástroje. Velikosti horních konfidenčních intervalů zůstaly přibližně stejné.

Analýza mikrostruktury povrchu vystruženého vzorku neukázala pod elektronovým mikroskopem žádné změny v podobě deformace zrn či vznik ovlivněných oblastí, protože materiál vykazuje vysokou tvrdost a houževnatost v kombinaci s hloubkou záběru ostří 0,082 mm.

Lze konstatovat, že rozdíly mezi rozptyly hodnot u nového a opotřebeného nástroje MT3 byly sledovány jak u průběhu silového zatížení, tak i u vybraných parametrů integrity povrchu. Rozptyl hodnot opotřebeného nástroje MT3 byl nižší u silového průběhu i u vybraných parametrů povrchu. Rozptyl hodnot posuvové síly a řezného momentu vzniklých při procesu vystružování, měl největší vliv na výslednou kruhovost a válcovitost, kde byly rozdíly patrnější nežli u textury povrchu. Na velikost řezných sil a kvalitu povrchu by mělo vliv několik faktorů. Kvalitnějšího povrchu a snížení působících sil může být docíleno:

- snížením posuvu,
- větší přísun procesních kapalin do místa řezu, tím pádem lepší odvod třísky z místa řezu a snížení koeficientu tření mezi nástrojem a obrobkem,
- způsob upínání tepelného nástavce do držáku nástroje,
- velikost přídavku, zvýšení přídavku má za následek zvýšení působících sil při řezném procesu,
- materiál obrobku.

Další výzkum by bylo vhodné zaměřit na řezné podmínky, neboli zkoumat souvislost mezi řeznými silami, posuvy a poté hodnotit vlastnosti nově vzniklého povrchu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. *Prezentace firmy HAM-FINAL*. HAM-FINAL, s.r.o., Česká republika. 2008.
2. *KOMET GROUP* [online]. 2011 [cit. 2011-02-04]. Catalogue download – Reaming. Dostupné z WWW: <<http://www.kometgroup.com/pdf/dihart-cz.pdf>>.
3. *MAPAL* [online]. 2010 [cit. 2011-02-11]. Download catalogues and brochures from MAPAL as PDF files. Dostupné z WWW: <http://www.mapal.com/fileadmin/00_PDF-Dateien/Kataloge/englisch/Reiben_Feinbohren_e_10_2009.pdf>.
4. FIALA, Stanislav; KOUŘIL Karel. Moderní nástroje pro dokončování dř. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 25. dubna 2007, Vydání č. 4, [cit. 2011-02-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-nastroje-pro-dokoncovani-der>>.
5. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing, s.r.o., 2008. 235 s. ISBN 987-80-254-2250-2.
6. FIALA, Stanislav; KOUŘIL, Karel. Nová generace průmyslového diamantu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2010, Vydání č. 9, [cit. 2011-02-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nova-generace-prumysloveho-diamantu>>.
7. FOREJT, Milan; PÍŠKA, Miroslav. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
8. HUMÁR, Anton. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. 1. vydání. Brno: CCB spol. s r.o., 1995. 265 s. ISBN 80-85825-10-4.
9. HOLUBÁŘ, Pavel; JÍLEK, Mojmír; RŮŽIČKA, Milan. Moderní PVD povlaky pro řezné aplikace a tváření. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2004, Vydání č. 9, [cit. 2011-02-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-pvd-povlaky-pro-rezne-aplikace-a-tvareni>>.
10. HOLUBÁŘ, Pavel; JÍLEK, Mojmír; ŠÍMA, Michal. Nanokompozitní otěruvzdorné PVD vrstvy. In *METAL 2001: 10. mezinárodní metalurgická konference* [online]. Ostrava: [s.n.], 2001 [cit. 2011-02-27]. Dostupné z WWW: <<http://www.nanocon.cz/data/metal2001/sbornik/papers/10.pdf>>.
11. *PVD povlaky*. CEMECON, s. r. o., Česká republika. 2007.
12. BUMBÁLEK, Bohumil. Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci. *Kvalita a Geometrické specifikace produktů* [online]. 2005, Vydání č. 11, [cit. 2011-02-28]. Dostupný z WWW: <http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2512_Bumbalek.pdf>.
13. KRŽIŽ, Antonín. Vliv povrchu na užité vlastnosti výrobku. In *Čtvrtý ročník konference „Strojírenská technologie - Plzeň 2011“* [online]. Plzeň: [s.n.], 2011 [cit. 2011-02-28]. Dostupné z WWW: <http://www.ateam.zcu.cz/download/kriz_prispevek_technologie_2011.pdf>.

14. KRAUS, Václav. *Tepelné zpracování a slinování*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. 274 s. ISBN 80-7082-582-0.
15. NOVÁK, Zdeněk. Zvyšování kvality hodnocení struktury povrchu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2004, Vydání č. 11, [cit. 2011-03-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/zvysovani-kvality-hodnoceni-struktury-povrchu>>.
16. Zeiss spol. s r.o. [online]. 1999 [cit. 2011-03-02]. Parametry (drsnosti) povrchu. Dostupné z WWW: <[http://www.zeiss.sk/C12571AF002D4699/EmbedTitelIntern/Prospekt_Drsnost/\\$File/drsnost.pdf](http://www.zeiss.sk/C12571AF002D4699/EmbedTitelIntern/Prospekt_Drsnost/$File/drsnost.pdf)>.
17. BUMBÁLEK, Bohumil. *FYZIKÁLNÍ PODSTATA ŘEZÁNÍ* [online]. Brno: [s.n.], 2005 [cit. 2011-03-04]. Dostupné z WWW: <<http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>>.
18. SHAW, Milton Clayton. *METAL CUTTING PRINCIPLES*. Druhé vydání. New York: Oxford University Press, Inc., 2005. 651 s. ISBN 0-19-514206-3.
19. DOLEŽAL, Pavel; PACAL, Bohumil. *Ústav materiálových věd a inženýrství : Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně* [online]. 2007 [cit. 2011-03-09]. Hodnocení mikrotvrdosti struktur materiálů. Dostupné z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/hmsm/index.htm>>.
20. DAVIM, J. Paulo. *Surface Integrity in Machining*. 1st Edition. London: Springer, 2010. 215 s. Dostupné z WWW: <<http://www.springerlink.com/content/978-1-84882-873-5#section=649038&page=1>>. ISBN 978-1-84882-873-5.
21. KOČMAN, Karel; PROKOP, Jaroslav. *Technologie obrábění*. druhé vydání. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
22. GROTE, Karl-Heinrich; ANTONSSON, Erik. *Springer Handbook of Mechanical Engineering*. New York: Springer, 2009. 1580 s. ISBN 978-3-540-49131-6.
23. MITUTOYO Česko s.r.o. [online]. 2003, 2009 [cit. 2011-03-14]. Geometrické úchyly tvaru a polohy. Dostupné z WWW: <http://www.mitutoyo-czech.cz/cz/pdf/Form_plakat%20A3_17_9_final.pdf>.
24. *HAM-FINAL*. Katalog výrobků - výstružníky. [s.l.] : [s.n.], 2010. 60 s.
25. JAWORSKA, L., et al. Functionally graded cermets. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* [online]. July-August 2006, VOLUME 17, [cit. 2011-03-16]. Dostupný z WWW: <http://www.journalamme.org/papers_amme06/195.pdf>.
26. FIALA, Stanislav; HLADÍK, Petr. Cermetové výstružníky. *MM Průmyslové spektrum*. 2004, Vydání č. 4, s. 36-37. Dostupný také z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/cermetove-vystruzniky>>.
27. *Ocel 17 349 Cr-Ni-Mo*. [s.l.]: [s.n.], 1.2.1982. 2 s.

28. *TAJMAC-ZPS* [online]. 24.3.2011 [cit. 2011-04-04]. PRODUKTY. Dostupné z WWW: <<http://www.tajmac-zps.cz/c1210cz.html>>.
29. DAVIM, J. Paulo. *Machining: fundamentals and recent advances* [online]. London: Springer, 2008 [cit. 2011-05-20]. Finite Element Analysis, s. 359. Dostupné z WWW: <http://books.google.cz/books?id=0zFMCFIANNAC&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false>. ISBN 978-1-84800-213-5.
30. SLANÝ, Martin. *Studium účinku pasivních silových složek řezání na obráběný povrch*. Brno, 2010. 26 s. Pojednání k získání akademického titulu Doktor (Ph.D.). Fakulta strojního inženýrství VUT Brno.
31. *Nikon Metrology* [online]. 2011 [cit. 2011-05-22]. Download. Dostupné z WWW: <http://www.google.cz/url?sa=t&source=web&cd=3&sqj=2&ved=0CC0QFjAC&url=https%3A%2F%2Fwww.nikonmetrology.com%2Fdownloads%2Fdownload.php%3Ff%3D31.integra_eng_1106.pdf%26n%3Dintegra_eng_110>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	Jednotka	Popis
SK	[-]	slinutý karbid
HK	[-]	tvrdost dle Knoopa
HRA	[-]	tvrdost dle Rockwella
HV	[-]	tvrdost dle Vickerse
PVD	[-]	Physical Vapour Deposition
CVD	[-]	Chemical Vapour Deposition

Symbol	Jednotka	Popis
W_t	[μm]	hloubka vlny
l_n	[mm]	měrná délka
R_a	[μm]	střední aritmetická hodnota drsnosti
R_q	[μm]	střední kvadratická hodnota drsnosti
R_{zi}	[μm]	hloubka jednotlivých drsností
R_z	[μm]	hloubka drsnosti
R_{max}	[μm]	maximální hloubka drsnosti
R_{sk}	[$^\circ$]	sklon profilu
R_{ku}	[$^\circ$]	strmost profilu
R_{mr}	[%]	materiálový podíl
c	[-]	hladina řezu
R_{sm}	[μm]	střední šířka rýh
$R_{\Delta q}$	[μm]	střední stoupání profilu
K_r	[$^\circ$]	hlavní úhel nastavení
K_r'	[$^\circ$]	vedlejší úhel nastavení
C_s	[$^\circ$]	hlavní úhel nastavení
C_e	[$^\circ$]	vedlejší úhel nastavení
R_{zt}	[μm]	maximální výška profilu
r_ϵ	[μm]	poloměr špičky nástroje
f	[mm.ot $^{-1}$]	posuv
F	[N]	zatěžovací síla
α	[$^\circ$]	vrcholový úhel jehlanu
β	[$^\circ$]	vrcholový úhel jehlanu
l_p	[mm]	hloubka materiálu od povrchu
F_z	[N]	výsledná síla
F_p	[N]	pasivní síla
F_f	[N]	posuvová síla
F_c	[N]	řezná síla
$F_{T\varphi}$	[N]	síla působící v rovině stříhu
$F_{N\varphi}$	[N]	síla kolmá na rovinu stříhu
F_{TV}	[N]	třecí síla
F_{NY}	[N]	normálová složka k třecí síle
v_c	[m.min $^{-1}$]	řezná rychlost
h'	[mm]	výška pýchované třísky
γ	[$^\circ$]	úhel čela nástroje
α	[$^\circ$]	úhel hřbetu nástroje
φ	[$^\circ$]	úhel mezi střížnou rovinou a řeznou silou

A_o	$[\text{mm}^2]$	součin výšky a šířky řezu
h	$[\text{mm}]$	výška odebíraného materiálu
w	$[\text{mm}]$	šířka řezu
l_c	$[\text{mm}]$	újetá dráha
E_c	$[\text{J}]$	řezná energie
E_φ	$[\text{J}]$	deformační a smyková energie
E_Y	$[\text{J}]$	řezná energie vyvolaná na čele nástroje
E_T	$[\text{J}]$	Plošná energie při vytvoření nového povrchu
E_k	$[\text{J}]$	kinetická energie
e_c	$[\text{J} \cdot \text{m}^{-3}]$	hodnota specifické energie spotřebované při řezném procesu
V_w	$[\text{m}^3]$	množství odebraného materiálu
M_c	$[\text{N} \cdot \text{m}^{-1}]$	řezný moment
$F_{\text{výsl.}}$	$[\text{N}]$	výsledná síla vyvolaná nástrojem MT3
F_{zz}	$[\text{N}]$	síla vyvolaná zuby nástroje MT3
F_{zv}	$[\text{N}]$	síla vyvolaná vodítky nástroje MT3
t	$[\text{s}]$	čas
F_{pz1}	$[\text{N}]$	pasivní síla vyvolaná zubem číslo 1 nástroje MT3
F_{fz1}	$[\text{N}]$	posuvová síla vyvolaná zubem číslo 1 nástroje MT3
F_{cz1}	$[\text{N}]$	řezná síla vyvolaná zubem číslo 1 nástroje MT3
n	$[\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}]$	otáčky
v_f	$[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$	Posuvová rychlost

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Řezné podmínky výstružníku firmy DIHART
Příloha 2 Řezné podmínky výstružníku firmy MAPAL
Příloha 3 Protokol o měření průměru, válcovitosti a kruhovitosti vzorku
Příloha 4 Protokol o měření textury vzorku