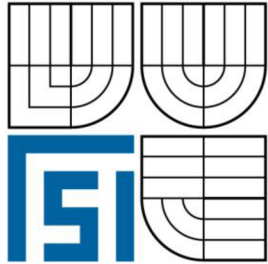


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

Vliv rozměrového účinku na integritu povrchu při vystružování s využitím moderní vystružovací hlavice MT3

Effect of size impact on surface integrity while reaming with modern
reaming head MT3

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAROSLAV RYBAŘÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MARTIN SLANÝ

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2010/11

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jaroslav Rybařík

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

obor: **Strojírenská technologie a průmyslový management (2303T005)**

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:

Vliv rozměrového účinku na integritu povrchu při vystružování s využitím moderní vystružovací hlavice MT3

v anglickém jazyce:

Effect of size impact on surface integrity while reaming with modern reaming head MT3

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

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

Cíle diplomové práce:

Student by se měl seznámit s problematikou vysoce produktivního přesného vystružování za využití moderních vystružovacích MT3 hlavic fy HAM-FINAL. Cílem práce bude hodnocení vlivu předchozí operace vyvrtávání a zvoleného přídatku pro operaci vystružování. Po vystružení otvoru za využití nástroje MT3 bude provedeno hodnocení integrity nově vzniklého povrchu a vyvozeny závěry.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jaroslav Rybařík

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

obor: **Strojírenská technologie a průmyslový management (2303T005)**

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

Vliv rozměrového účinku na integritu povrchu při vystružování s využitím moderní vystružovací hlavice MT3

v anglickém jazyce:

Effect of size impact on surface integrity while reaming with modern reaming head MT3

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

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

Cíle diplomové práce:

Student by se měl seznámit s problematikou vysoce produktivního přesného vystružování za využití moderních vystružovacích MT3 hlavic fy HAM-FINAL. Cílem práce bude hodnocení vlivu předchozí operace vyvrtávání a zvoleného přídavku pro operaci vystružování. Po vystružení otvoru za využití nástroje MT3 bude provedeno hodnocení integrity nově vzniklého povrchu a vyvozeny závěry.

Seznam odborné literatury:

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

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

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

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

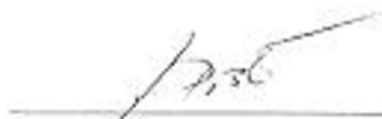
CERMÁK, J. Soudobé otěruvzdorné povlaky a jejich vliv na efektivní využití řezných nástrojů ze slinutých karbidu. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2009. ISBN 978-80-214-3901-6

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

Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Slaný

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

V Brně, dne 25.11.2010



prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Ředitel ústavu

L.S.



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

Licenční smlouva

ABSTRAKT

Cílem této práce je navržení, provedení a vyhodnocení experimentu, který ověří vliv rozměrového účinku na vybrané parametry integrity povrchu. Experiment byl prováděn vysokoproduktivní vystružovací hlavicí MT3 firmy HAM-FINAL. Hodnocení integrity povrchu bylo prováděno z hlediska charakteristik drsnosti povrchu, geometrických tolerancí a změny mikrostruktury. Dále byl vliv velikosti přídavku hodnocen z hlediska změny posuvové síly, řezného momentu a změny měrné energie řezání. Teoretická část práce se zabývá popisem rozměrového účinku, charakteristikou vystružování, integritou povrchu, přípravou polotovaru a seznámením s vysoce produktivní vystružovací hlavicí MT3.

Klíčová slova

Vystružování, Rozměrový účinek, Integrita povrchu.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to design, implement and evaluate an experiment that verifies the influence the size effect on selected parameters of the surface integrity. For the experiment were used highly productive reaming head MT3 made by HAM-FINAL. Evaluation of the surface integrity was done in terms of the characteristics of the surface roughness, geometric tolerances and changes in microstructure. Furthermore, the influence of the depth of chips evaluated for changes in the feed force, cutting torque and changes in specific cutting energy. The theoretical part deals with the description of the size effect, characteristic reaming, surface integrity, preparation of material and identification of highly productive MT3 reaming head.

Key words

Reaming, Size effect, Surface Integrity

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RYBAŘÍK, J. *Vliv rozměrového účinku na integritu povrchu při vystružování s využitím moderní vystružovací hlavice MT3*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 74 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Slaný.

Prohlášení

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

Datum

.....
Jméno a příjmení diplomanta

Poděkování

Děkuji tímto prof. Ing. Bohumilu Bumbálkovi, CSc., doc. RNDr. Miloslavu Ohlídalovi, CSc., Mgr. Kateřině Brillové, Ph.D., Ing. Josefu Bednářovi, Ph.D., Ing. Pavlu Doležalovi, Ph.D., Ing. Aleši Polzerovi, Ph.D., Ing. Martinu Slanému, Ing. Pavlu Gejdošovi, Dagmar Polzerové, Vladimíru Vaňkovi, Jiřímu Čechovi a Vojtěchu Řiháčkovi, za cenné připomínky, pomoc a rady při vypracování diplomové práce. Dále děkuji firmě HAM-FINAL, firmě CemeCon a Ústavu Strojírenské Technologie za poskytnutí zázemí a materiálů pro vypracování této diplomové práce.

OBSAH

Abstrakt	2
Prohlášení.....	3
Poděkování.....	4
Obsah	5
Úvod	7
1 ROZMĚROVÝ ÚČINEK.....	8
1.1 Energetická analýza řezání	8
1.1.1 Velikost měrné energie.....	8
1.2 Smyková deformace procesu řezání	11
1.3 Stanovení minimální hloubky řezu	13
1.4 Silové zatížení při řezání	16
2 DOKONČOVACÍ OPERACE VYSTRUŽOVÁNÍ	17
2.1 Charakteristika vystružování	17
2.2 Stroje pro vystružování	17
2.3 Nástroje pro vystružování	17
2.3.1 Dělení strojních výstružníků.	18
2.4 Řezné podmínky	19
2.5 Dosažitelné hodnoty kvality povrchu při vystružování	19
3 INTEGRITA OBROBENÉHO POVRCHU.....	20
3.1 Drsnost povrchu	20
3.1.1 Charakteristiky drsnosti povrchu:	21
3.2 Geometrické tolerance	25
3.2.1 Geometrické tolerance tvaru	25
3.2.2 Geometrické tolerance polohy	26
3.3 Úchyly rozměru	26
3.4 Vlastnosti povrchové vrstvy	27
3.4.1 Zbytková napětí.	27
4 PŘÍPRAVA POLOTOVARU	28
4.1 Technologie výroby polotovaru pro vystružování	28
4.2 Stanovování přídavek pro vystružování	29
5 VYSTRUŽOVACÍ HLAVICE MT3.....	30
5.1 Konstrukce nástroje.....	30
5.2 Materiál nástroje.....	31
5.2.1 Cermety.	31
5.3 Řezné podmínky	32
5.4 Povrchová úprava	32
5.5 Výhody vystružovací hlavice MT3.....	34
6 PRAKTICKÁ ČÁST.....	35
6.1 Volba obráběcího stroje	35
6.2 Nástroj použitý pro experiment	35
6.3 Testované vzorky a jejich materiál	36
6.4 Příprava polotovaru	37
6.5 Přípravek pro upnutí polotovaru	37
6.6 Postup nastavování přídavek.....	38
6.7 Pístroje použité k měření posuvové síly F_f a řezného momentu M_c	40
6.8 Změny posuvové síly a řezného momentu v závislosti na čase pro měnící se hloubky třísky.....	40

6.9 Změna velikosti měrné energie v závislosti na změně hloubky třísky.....	50
6.10 Závislosti hodnot struktury povrchu na velikosti přídavku materiálu.....	51
6.11 Měření kruhovitosti a válcovitosti pro různé velikosti přídavků.....	59
6.12 Pozorování změn mikrostruktury zrna v závislosti na velikosti přídavku	59
6.13 Měření tvrdosti.....	64
7 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	65
8 ZÁVĚR.....	66
Seznam použité literatury.....	68
Seznam zkratk a symbolů.....	71
Seznam příloh.....	73

ÚVOD.

Moderní doba vyžaduje pracovat a vyrábět efektivněji, přesněji a v co nejkratších výrobních časech. To zvyšuje nároky na kvalitu a s tím i náklady na výrobu. Není tomu jinak ani při obrábění přesných děr ve strojírenském průmyslu. Zvyšující se nároky na přesnost výroby otvorů jsou důvodem pro vývoj a výzkum nových a inovaci starých nástrojů na obrábění děr. Aby tento krok kupředu byl možný, je třeba znalosti vlivů, které na nástroj a obráběný povrch při obrábění působí. A to počínaje reznými podmínkami, přes materiál nástroje a obrobku, až po fyzikální a mechanické vlivy působící v procesu obrábění. Důležité je znát i požadavky na obráběné otvory, abychom byli schopni jich dosáhnout a dodržet je. Mezi základní požadavky na hotovou díru patří tolerance rozměrové, geometrické, polohy a charakteristiky drsnosti povrchu.

Tato práce se zabývá problematikou vlivu rozměrového účinku a zvláště pak přídatkem na dokončovací operaci vystružování při použití vystružovací hlavice MT3 od firmy HAM-FINAL. Tyto nástroje se používají pro dokončovací operace otvorů vysokou reznou rychlostí, a proto je zapotřebí, aby volba přídatku před najetím dokončovacího nástroje byla dobře zvolena. Správně zvolený přídatek může mít vliv na hodnotu povrchu konečné plochy, jako je například hodnota R_a , R_z nebo napětí v povrchových vrstvách. Na tyto hodnoty má vliv i geometrie nástroje.

Literatura [19] uvádí, že existuje minimální hloubka třísky, pod kterou nástroj neodebírá materiál, ale pouze tváří. Toto rozhraní tvoří bod, který se nazývá Bifurkační [20]. Materiál pod tímto bodem, je pýchován do povrchové vrstvy, ve které po obrobení vznikají tlaková, popřípadě tahová napětí.

Bifurkační bod je závislý i na velikosti zaoblení ostří nástroje, které je s velikostí odebírané třísky v literatuře označováno jako rozměrový účinek. Jinak řečeno, rozměrový účinek je vlastně vliv rozměru zaoblení rezné hrany a velikosti odebírané třísky při třískovém obrábění, na velikosti pasivní složky rezné síly a velikosti měrných energií.

Cílem této práce je seznámení se s problematikou vysoce produktivního přesného vystružování. Dále pak hodnocení vlivu předchozí operace vyvrtávání z hlediska zvoleného přídatku pro vystružování. A hodnocení závislosti, měnící se velikosti přídatku, před operaci vystružováním na vybraných kritériích integrity obráběného povrchu.

Pro testování byla použita vysoce produktivní vystružovací hlavice MT3 od firmy HAM-FINAL. Tedy zaoblení ostří nástroje bylo konstantní a vliv rozměrového účinku se hodnotil jen z hlediska velikosti přídatku po vyvrtávání. K nastavení různé škály přídatků nám sloužila stavitelná vyvrtávací tyč NGV, díky které jsme mohli nastavit přídatky před vystružováním, od hodnoty, která se blížila k minimální hloubce třísky, až po hodnotu, kterou jsme si určili jako hraniční.

Na vyrobených vzorcích byly měřeny změny posuvové síly F_f a rezného momentu M_c v záběru nástroje, charakteristiky drsnosti povrchu, geometrické tolerance a změny mikrostruktury. Dále byla zhodnocena změna měrné energie na velikosti hloubky třísky a vyvozeny závěry.

1 ROZMĚROVÝ ÚČINEK

Proces řezání je procesem plastické deformace, která probíhá za extrémních podmínek zatěžování [4]. I když moderní stroje a nástroje splňují požadavky, které jsou kladeny na vysoce přesné metody obrábění, je nutné rozumět procesu vzniku a oddělování třísky a znát podmínky, které tyto procesy ovlivňují [19]. Pro vysoce přesné metody obrábění je nutné vzít v potaz zmenšování přídavek materiálu a tím i zmenšování rozměru třísek [4].

Jedním z hlavních činitelů při procesu řezání u vysoce přesných metod obrábění je tzv. rozměrový účinek.

Rozměrový účinek lze definovat jako poměr poloměru zaoblení ostří a hloubky odebíraného materiálu. Projevem rozměrového účinku je změna velikosti měrné energie a změna velikosti složek řezných sil při obrábění. Na těchto změnách je závislá kvalita obrobenej plochy. Nebo také jej lze popsat jako růst řezného odporu a měrné energie vlivem zmenšování rozměru odebíraného materiálu [3, 4, 19, 24].

1.1 Energetická analýza řezání

Při hodnocení vysoce přesných metod obrábění je vhodné je posuzovat z energetického hlediska, tedy z hlediska spotřeby energie pro jednotlivé fáze tvoření třísky a porovnávat je s podmínkami běžného obrábění. Při běžném obrábění je největší část energie spotřebována na oddělení třísky smykovým mechanismem v oblasti primární plastické deformace, tření třísky na čele a tření obrobku na hřbetě nástroje [5].

1.1.1 Velikost měrné energie

Na měrnou energii mají vliv zejména:

- chemické a strukturální vlastnosti materiálu,
- úhel čela,
- nedeformovaná tloušťka třísky h_D [4].

Celková energie spotřebovaná za jednotku času je dána vztahem [5]:

$$E = F_c \cdot v_c \quad [\text{Nm} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1.1)$$

v_c – řezná rychlost

F_c – řezná síla

Celková měrná energie na jednotku času je potom dána [5]:

$$e_c = \frac{U}{v_c \cdot h_D \cdot b_D} = \frac{F_c}{h_D \cdot b_D} \quad [\text{Nm} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1.2)$$

h_D - hloubka třísky

b_D – šířka třísky

Celková měrná energie se skládá z těchto energií:

- smyková měrná energie e_s v rovině maximálních smykových napětí,
- třecí měrná energie e_f na čele nástroje,
- povrchová měrná energie e_a na vytváření nového povrchu při řezání,
- hybnostní měrná energie e_m v důsledku změn hybnosti, vyvolaných průchodem kovu rovinou smykových napětí [5].

Měrná smyková energie je dána vztahem [5]:

$$e_s = \frac{F_{ST} \cdot v_s}{v_c \cdot h_D \cdot b_D} = \tau \cdot \left(\frac{v_s}{v_c \cdot \sin \phi} \right) \quad [\text{Nm} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (1.2)$$

Kde: τ – smykové napětí

v_s - rychlost pohybu materiálu v rovině max. smykových napětí

$$v_s = \frac{\cos \gamma_0 \cdot v_c}{\cos(\phi - \gamma_0)} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1.3)$$

ϕ – úhel deformace

γ_0 – ortogonální úhel čela

Měrná třecí energie je dána vztahem [5]:

$$e_f = \frac{F_{SN} \cdot v_t}{v_c \cdot h_D \cdot b_D} \quad [\text{Nm} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (1.4)$$

Kde: v_t – rychlost odcházející třísky

$$v_t = \Lambda \cdot v_c \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1.5)$$

Λ – součinitel pěchování třísky

Povrchovou měrnou energii e_a a hybnostní měrnou energii e_m je možné zanedbat, jelikož velikosti těchto energií jsou malé vůči ostatním složkám [5].

Potom můžeme napsat, že celková měrná energie:

$$e = e_s \cdot e_f \quad [\text{Nm.m}^{-3}] \quad (1.6)$$

Všechny energie spojené s řezáním jsou spotřebovány na plastickou deformaci nebo na tření a v konečné fázi se přemění na teplo [5].

Závislost změny celkové měrné energie na rozměrovém účinku můžeme také vyjádřit pomocí vztahu 1.7 [4], ve kterém, je znázorněno, jak se celková měrná energie mění s hloubkou řezu.

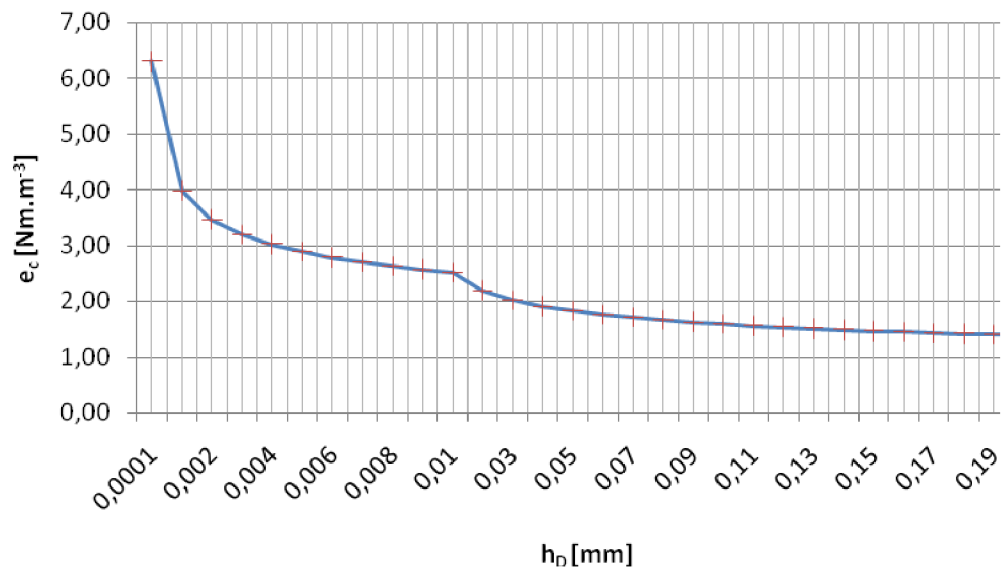
Je nutno připomenout, že měrná energie se mění „přibližně“ s hloubkou odebíraného materiálu [4].

$$e_c \approx \frac{1}{h_D^{0,2}} \quad [\text{Nm.m}^{-3}] \quad (1.7)$$

Tab. 1.1 Závislost celkové měrné energie na hloubce řezu.

h_D	e_c	h_D	e_c	h_D	e_c
[mm]	[Nm.m ⁻³]	[mm]	[Nm.m ⁻³]	[mm]	[Nm.m ⁻³]
0,2	1,38	0,1	1,58	0,009	2,57
0,19	1,39	0,09	1,62	0,008	2,63
0,18	1,41	0,08	1,66	0,007	2,70
0,17	1,43	0,07	1,70	0,006	2,78
0,16	1,44	0,06	1,76	0,005	2,89
0,15	1,46	0,05	1,82	0,004	3,02
0,14	1,48	0,04	1,90	0,003	3,20
0,13	1,50	0,03	2,02	0,002	3,47
0,12	1,53	0,02	2,19	0,001	3,98
0,11	1,55	0,01	2,51	0,0001	6,31

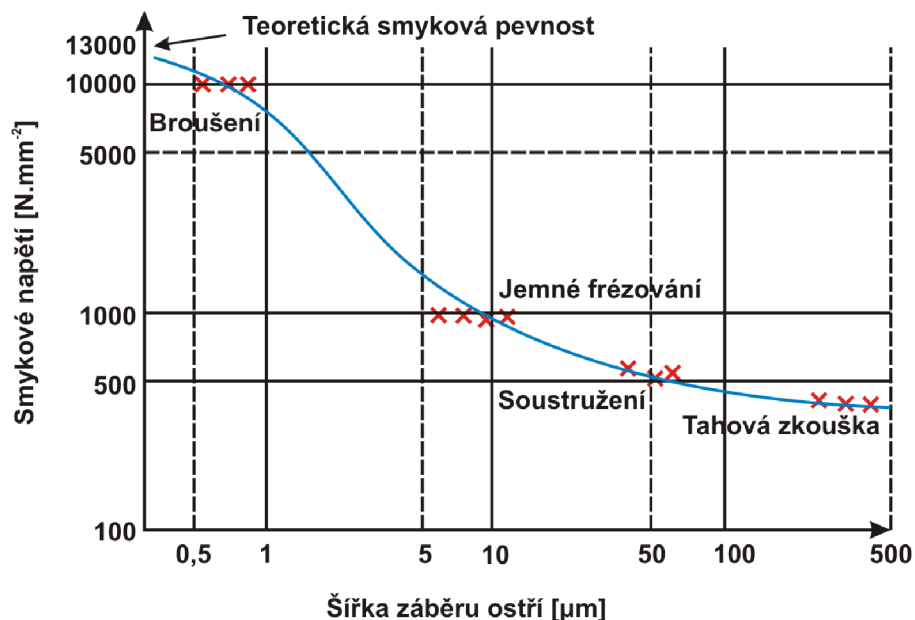
Jak je vidět z tabulky 1.1 měrná energie e_c v závislosti na nedeformované tloušťce třísky h_D exponenciálně roste. Přehledněji je průběh měrné energie v závislosti na zmenšující se tloušťce třísky viditelný z obrázku 1.1.



Obr 1.1. Závislost celkové měrné energie na hloubce řezu

1.2 Smyková deformace procesu řezání

Rozměrový účinek má významný vliv na hodnotu smykového napětí τ . Zvláště pak hodnota hloubky řezu přímo ovlivňuje smykové napětí, které je rovnoměrně rozloženo ve smykové rovině [3]. Názorný příklad je na obr. 1.2. Na kterém jsou výsledky zpracované profesorem Tanaguchim při řezání a doplněné ještě o údaje při tahových zkouškách [4].



Obr. 1.2 Vliv tloušťky třísky na smykové napětí [4].

Na obr. 1.2 vidíme, jak se zmenšující se tloušťkou odebírané třísky vzrůstá hodnota smykového napětí.

Seznam veličin, které ovlivňují proces řezání:

Φ	[°]	– úhel roviny max. smykových napětí (úhel deformace)
γ_0	[°]	– ortogonální úhel čela
φ	[°]	– úhel tření
τ	[MPa]	– smykové napětí
v_c	[m.min ⁻¹]	– řezná rychlost
a_p	[mm]	– šířka záběru ostří
f	[mm]	- posuv

Určení úhlu maximálních smykových napětí Φ neboli úhlu deformace je funkcí úhlu tření φ a ortogonálního úhlu čela γ_0 [3].

$$\phi = f(\gamma_0, \varphi) \quad (1.8)$$

Existuje několik vztahů, od různých autorů, pro výpočet úhlu maximálních smykových napětí Φ . Jsou uvedeny v tabulce 1.2 a je nutno podotknout, že všechny způsoby výpočtu mají dobrou shodu s výsledky experimentů [3].

Tab. 1.2 Vztahy pro výpočet úhlu max. smykových napětí Φ [3].

Autor	Vzorec pro výpočet Φ
Ernst a Merchant	$\phi = 45 - \frac{\varphi}{2} + \frac{\gamma_0}{2}$
Merchant	$\phi = \frac{\cot g^{-1} K}{2} - \frac{\varphi}{2} + \frac{\gamma_0}{2}$
Stobler	$\phi = 45 - \varphi + \frac{\gamma_0}{2}$
Lee a Shaffer	$\phi = 45 - \varphi + \gamma_0$
Lee a Shaffer	$\phi = 45 + \theta - \varphi + \gamma_0$ pro nárůstek
Hück	$\phi = 45 - \frac{\text{tg}^{-1} 2\mu}{2} + \gamma_0$
Hück	$\phi = \frac{\cot g^{-1} K}{2} - \frac{\text{tg}^{-1} 2\mu}{2} + \frac{\gamma_0}{2}$

Smykové napětí se vypočítá ze vztahu [3]:

$$\tau = \frac{F_c \cdot \cos(\phi + \varphi - \gamma_0) \cdot \sin \phi}{A_s} \quad [\text{MPa}] \quad (1.9)$$

1.3 Stanovení minimální hloubky řezu

Sokolowski předpokládal, že existuje minimální hloubka řezu, pod kterou se tříška netvoří. Když nastane tento stav, dochází ke tření hřbetu nástroje po obrobku. Tato minimální hloubka řezu závisí zejména na poloměru ostří, řezné rychlosti a tuhosti celého systému. Například Sokolovského měření prokázala, že pro poloměr ostří $12\mu\text{m}$ a řeznou rychlost $210\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ je nejmenší hloubka řezu kolem $4\mu\text{m}$ [19].

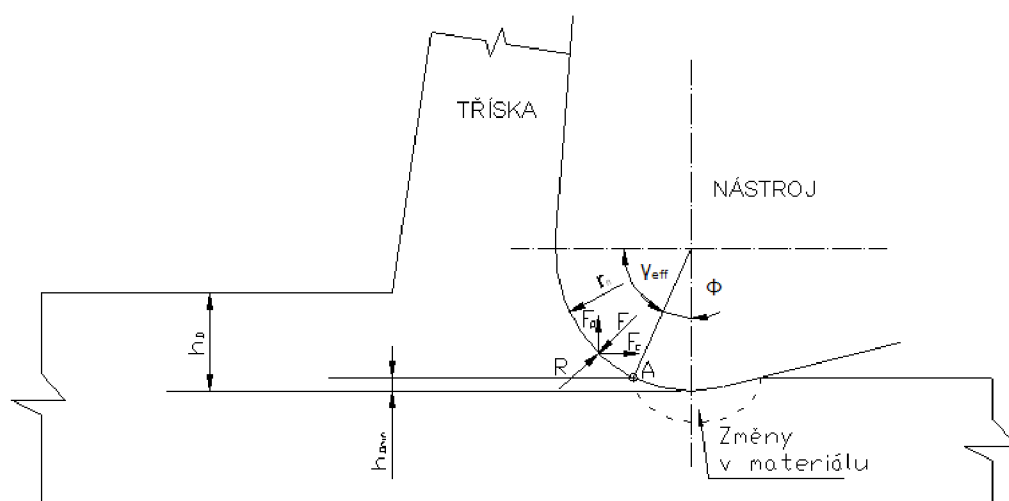
Obráběcí systém se může odchýlit od požadované hodnoty dvěma způsoby. Statickou úchylkou vedoucí k nepřesnosti obráběných součástí nebo dynamickou nestabilitou vedoucí k periodické chybě jako je vlnitost a drsnost [19, 24].

Dynamická nestabilita, při které dochází k cyklickému relativnímu pohybu mezi nástrojem a obrobkem má formy: chvění v důsledku řezných sil a samobuzené chvění [19].

Zdroje samobuzeného chvění se týkají vibrací o nízkých frekvencích. Jiný názor je, že samobuzené chvění je spojeno se změnou energie řezání vlivem měnící se hloubky řezu [19, 24].

Abdel Moneim předpokládá existenci pásma pod břitem nástroje, které je stacionární. Významným bodem tohoto pásma je bod A, který určuje hloubku, pod kterou nedochází k odřezávání materiálu. Tento bod je definován úhlem θ . Tedy úhlem, který svírá střed poloměru ostří s bodem A [19, 24].

Materiál pod bodem A je vystaven tření, a tím vzniká pásmo změn v materiálu vyjádřené hloubkou elastické a plastické deformace [19, 24]. Vše je přehledně znázorněno na obr. 1.3.



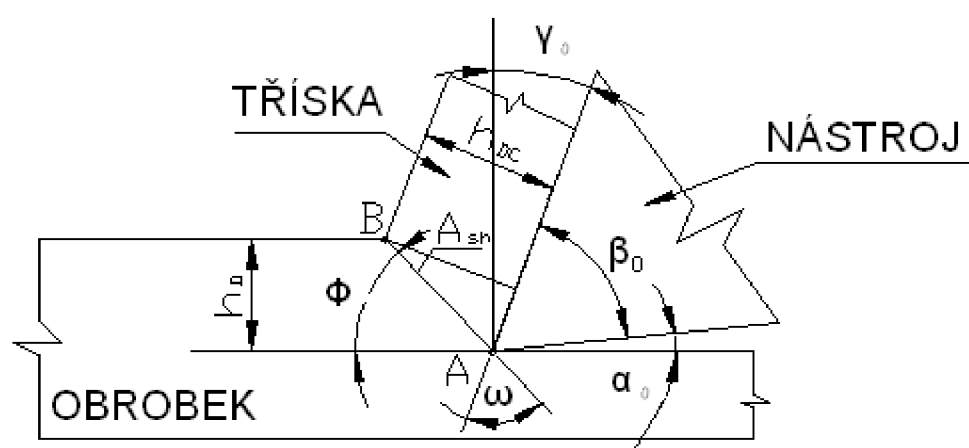
Obr. 1.3 Model minimální hloubky třísky dle Abdel Moneima [19].

Pro stanovení minimální hloubky řezu je třeba znát úhel určující směr odchodu třísky γ_{eff} . Ten je možné vyjádřit pomocí vzorce z poloměru zaoblení ostří nástroje r_n a hloubky řezu h_D [19]:

$$\gamma_{\text{eff}} = \arcsin\left(\frac{h_D}{r_n} - 1\right) \quad [^\circ] \quad (1.10)$$

Z vypočítaného úhlu směru odvodu třísky γ_{eff} se určí úhel Φ , který svírá bod A se středem poloměru zaoblení ostří r_n [19].

$$\phi = 90 - |\gamma_{\text{eff}}| \quad [^\circ] \quad (1.11)$$



Obr. 1.4 Model pro odvození vztahu mezi úhlem střížné roviny Φ a součinitelem pěchování třísky [7].

Další způsob určení úhlu střížné roviny Φ je pomocí součinitele pěchování třísky Λ . Tento součinitel je stanoven jako poměr tloušťky odebrané třísky h_{DC} a tloušťky třísky neodebrané h_D dle vztahu (1.12) [7].

$$\Lambda = \frac{h_{DC}}{h_D} \quad (1.12)$$

Dále je třeba, dle modelu (obr. 1.4), uvést vztah mezi úhlem střížné roviny a součinitelem příčného pěchování [7, 20].

$$\Lambda = \frac{h_{DC}}{h_D} = \frac{\overline{AB} \cdot \sin(90 - \phi + \gamma_0)}{\overline{AB} \cdot \sin \phi} = \frac{\sin(90 - \phi + \gamma_0)}{\sin \phi} \quad (1.13)$$

Poté můžeme napsat [7]:

$$\Lambda = \frac{\cos(\phi - \gamma_0)}{\sin \phi} \quad (1.14)$$

Z rozboru geometrie v ortogonální rovině obecně platí $\gamma_0 = 90^\circ - \delta_0$, přičemž ortogonální úhel řezu δ_0 je definován vztahem [7]:

$$\delta_0 = \alpha_0 + \beta_0 \quad (1.15)$$

Pak můžeme napsat [7]:

$$\Lambda = \frac{\cos(\phi - 90 + \delta_0)}{\sin \phi} \quad (1.14)$$

Pak platí [7]: $\cos(\phi - 90) \cdot \cos \delta_0 + \sin(\phi - 90) \cdot \sin \delta_0$, $\sin(\phi - 90) = \cos \phi$

$$\Lambda = \frac{\sin(\phi + \delta_0)}{\sin \phi} = \frac{\sin \phi \cdot \cos \delta_0 + \cos \phi \cdot \sin \delta_0}{\sin \phi} = \cos \delta_0 + \frac{\sin \delta_0}{\operatorname{tg} \phi} \quad (1.15)$$

Z čehož vyplývá [7]:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{\sin \delta_0}{\Lambda - \cos \delta_0} \Rightarrow \phi = \operatorname{arctg} \frac{\sin \delta_0}{\Lambda - \cos \delta_0} \quad (1.16)$$

Hodnota teoretické minimální hloubky řezu, která je závislá na poloměru zaoblení ostří r_n a úhlu střížné roviny Φ se určí ze vztahu [19]:

$$h_{D\min} = r_n \cdot (\cos \phi - 1) \quad [\text{mm}] \quad (1.17)$$

Dle příručky obrábění Garant [21] se minimální hloubka řezu pro vystružování stanovuje ze vztahu:

$$h_{D\min} = r_n \cdot (0,5 \dots 1) \quad [\text{mm}] \quad (1.18)$$

Vhodné by ovšem bylo připsat k tomuto vzorci i kriteria pro volbu hodnoty 0,5 až 1, abychom mohli určit minimální hloubku třísky v nějaké přesnosti. V příručce obrábění Garant [21] tato kritéria chyběla.

Při nedosažení minimální hloubky řezu se materiál pouze elasticky a plasticky deformuje. Ostří neproniká do materiálu a dochází vlivem tlaku a tření ke zvýšenému otěru nástroje [21].

1.4 Silové zatížení při řezání

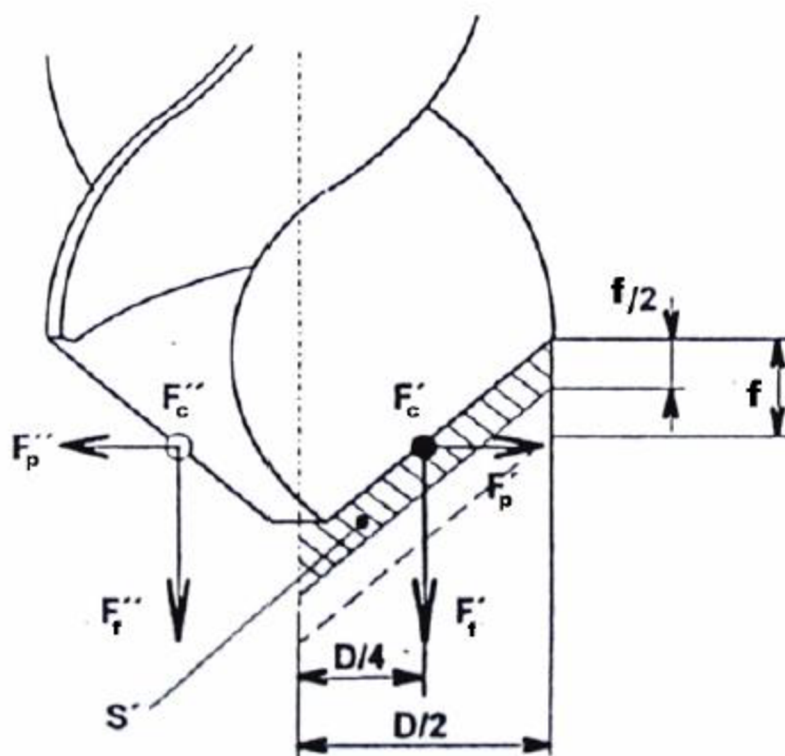
Při obrábění reznými nástroji (soustružnickými noži, frézami, vrtáky, vyvrtávacími tyčemi, výstružníky, apod.) můžeme definovat dva základní druhy silových složek. Jedná se o složky aktivní a pasivní. Jsou to průvodní veličiny, při kterých dochází k přeměně mechanicky vykonané práce [20].

Při obrábění je zatížení rezného nástroje realizováno zejména odporem obrobku proti vnikání břitu daného nástroje.

Mezi aktivní složky silového zatížení břitu patří rezná síla (F_c) a posuvová síla (F_f). Tyto složky jsou při obrábění spojeny zejména s úběrem materiálu. Řezná a posuvová síla se podílí na výkonech a pracích, spojených s přeměnou odebíraného materiálu na třísku [20].

Pasivní složky silového zatížení břitu jsou obvykle značeny F_p . Jsou namáháním břitu nástroje, které s tvorbou třísky souvisí, ale nástroj se ve směru silového působení relativně nepohybuje a tedy tyto síly nekonají přímo žádnou práci [20].

Jako příklad jsou na obrázku (1.5) znázorněny rezné síly při vrtání.



Obr. 1.5 Řezné síly při vrtání [27].

2 DOKONČOVACÍ OPERACE VYSTRUŽOVÁNÍ

Dokončování válcových a kuželových děr s vyššími požadavky na parametry přesnosti se provádí vystružováním, které technologicky navazuje na vrtání, vyvrtávání nebo jiné obrábění uvažovaných děr [13]. Moderní vystružovací nástroje mohou, v některých případech, nahradit operaci broušení děr, při kterém dochází k významnému tepelnému ovlivnění povrchové vrstvy při obrábění.

2.1 Charakteristika vystružování

Jedná se o dokončovací obráběcí operaci, jedno ale i více břitým nástrojem s definovanou geometrií břitu. Vystružování bývá většinou poslední operací obráběné díry. Pouze v některých případech následuje po vystružování další dokončování broušením, válečkováním, honováním apod. [14].

Charakteristickou vlastností vystružování je, že se nástroj sám zavádí do otvoru [21]. Na vystružované díry jsou kladeny vysoké požadavky, které se týkají přesnosti rozměrové i tvarové. Dalším sledovaným parametrem je kvalita obrobeneho povrchu, zejména jeho drsnost [14].

Při vystružování odebíráme výstružníkem materiál v malých vrstvách, a tak dosáhneme na předvrtaných nebo před-hrubovaných válcových nebo kuželových dírách, přesný rozměr, správný geometrický tvar a hladký povrch [12].

2.2 Stroje pro vystružování

Pro vystružování jsou vhodné stroje s vysokou tuhostí soustavy, které zajistí plynulé a přesné vedení nástroje dírou. Jako takové se nejčastěji používají vertikální frézovací CNC centra, CNC soustruhy, vrtačky a vyvrtávačky.

2.3 Nástroje pro vystružování.

Vyšší požadavky na obráběné díry a snaha obrábět co nejúspěšněji a nejefektivněji, vyvolává potřebu vyvíjet nové technologie pro obrábění děr. Díky vývoji nástrojových materiálů a jejich povlaků se i vývoj výstružníků posunul hodně kupředu a v některých případech je vystružováním možno nahradit i jiné, nákladnější metody obrábění děr (například broušení).

Výstružník je nástroj s jedním nebo více břity s definovanou geometrií ostří. Výstružníky se vyrábějí jako monolitní nebo s vyměnitelnými břitovými destičkami. Vyrábějí se jako pevné nebo se stavitelnými zuby. Zuby výstružníků bývají rovné nebo ve šroubovici [12].

2.3.1 Dělení strojních výstružníků.

Strojní výstružníky lze dělit následujícím způsobem dle těchto hledisek:

- Tvaru řezných ploch:
 - válcové,
 - kuželové,
 - tvarové.

- Dle konstrukce:
 - pevné
 - monolitní,
 - pájené,
 - s vyměnitelnými břitovými destičkami.
 - stavitelné.

- Dle tvaru stopky upínací části:
 - s válcovou stopkou,
 - s kuželovou stopkou,
 - nástrčné.

- Dle materiálu nástroje:
 - Cermetové,
 - SK,
 - RO.

Mezi nástroje patřící do skupiny strojních výstružníků můžeme zařadit i výměnné vystružovací hlavice, například firma HAM-Final uvádí ve svém katalogu [32] tyto varianty nástrojů:

- Výměnné vystružovací hlavice:
 - s břity z cermetu
 - do průchozích děr
 - do neprůchozích děr
 - s břity z SK
 - do průchozích děr
 - do neprůchozích děr

2.4 Řezné podmínky

Podmínky pro vystružování musí být voleny tak, aby byly splněny požadavky na rozměrovou i tvarovou přesnost, kvalitu povrchové vrstvy a životnost nástroje. Jsou závislé na obráběném materiálu, na materiálu a geometrii nástroje, na způsobu chlazení a intenzitě chlazení a na možnostech stroje.

V katalogu nástrojů určených k obrábění otvoru společnosti Narex consult a.s. doporučují pro vystružování řezné podmínky uvedené v tabulce 2.1. Tyto podmínky platí pro výstružníky z rychlořezných ocelí [31].

Tab. 2.1 Doporučené řezné podmínky pro vystružování nástroji z RO [31].

Materiál	Pevnost [Mpa]	Řezná rychlost [m.min ⁻¹]	Posuv v mm/ot pro Φvýstružníku v mm								Chlazení	
			5	10	18	25	40	63	80	100		
Nelegovaná ocel	< 500	7 až 9	0,12	0,22	0,32	0,4	0,5	0,6	0,8	1	E	
	< 700	5 až 8	0,12	0,22	0,32	0,4	0,5	0,6	0,8	1	E	
	< 900	4 až 6	0,1	0,18	0,22	0,32	0,4	0,5	0,6	0,8	E	
Legovaná ocel	< 800	4 až 6	0,12	0,22	0,32	0,4	0,5	0,6	0,8	1	E	
	< 1000	3 až 4	0,1	0,18	0,22	0,32	0,4	0,5	0,8	0,8	E	
Nerezová ocel	< 850	2 až 4	0,1	0,18	0,22	0,32	0,4	0,5	0,6	0,8	O	
Šedá litina	< 200HB	6 až 8	0,12	0,15	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1	E/L	
	> 200HB	3 až 5	0,12	0,15	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1	E/L	
Temperovaná litina	< 300HB	6 až 8	0,16	0,22	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9	1,1	E	
Titan a jeho slitiny	< 850	3 až 4	0,08	0,12	0,15	0,2	0,25	0,35	0,5	0,6	O	
AL a jeho slitiny - tvářené	< 450	10 až 15	0,2	0,25	0,32	0,4	0,6	0,8	1	1,2	E	
Al pro odlévání	< 10%Si	< 600	8 až 10	0,1	0,25	0,32	0,4	0,6	0,8	1	1,2	E
	> 10%Si	< 600	6 až 8	0,2	0,25	0,32	0,4	0,6	0,8	1	1,2	E
Elektrolit, měď Cu > 99%	< 400	4 až 8	0,12	0,15	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1	E/O	
Mosaz	-krátká tříška	< 600	11 až 15	0,16	0,22	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9	1,1	E
	-dlouhá tříška	< 600	6 až 11	0,16	0,22	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9	1,1	E
Bronz	< 600	4 až 6	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1	E/O	
Umělá hmota	-termoset	< 300	3 až 6	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9	1,2	1,5	L
	-termoplast	< 600	6 až 10	0,1	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9	1,2	1,5	L

Chlazení je značeno:

E-emulze

L-vzduch

O-oleje

2.5 Dosažitelné hodnoty kvality povrchu při vystružování

Vystružováním jsou obvykle zhotovovány otvory stupně přesnosti IT7 až IT8. Moderní nástroje z cermetů a PKD jsou schopny obrábět v přesnosti IT5 až IT6., přičemž se dosahuje hodnot Ra od 0,2 do 0,4μm. Stupeň přesnosti IT5 je dle normy ISO označován jako velmi přesný [12].

3 INTEGRITA OBROBENÉHO POVRCHU

Integrita obrobeného povrchu je dnes poměrně široký pojem a znamená souhrn fyzikálně-chemických vlastností součástí, vzhledem k jejímu předpokládanému využití. Významná je drsnost povrchu, která je závislá i na geometrii břitu nástroje [7].

Integritu obrobeného povrchu posuzujeme dle:

- rozměrové a tvarové přesnosti (válcovitost, kuželovitost, souosost, kolmost,...),
- drsnosti povrchu a mikrostruktury (R_a , R_z ,...),
- vlastností povrchové vrstvy (tepelné degradace, fázové transformace, zbytková napětí,...) [19].

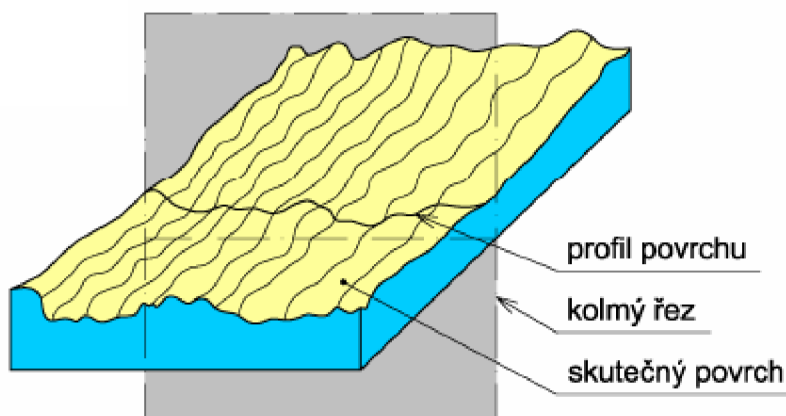
Jinak řečeno, integrita povrchu je odrazem podmínek, za kterých funkční plocha vzniká. Bere v úvahu důsledky působení technologických metod na jakost obrobené plochy a dává je do vztahu k funkčním požadavkům na celý obrobek [19].

3.1 Drsnost povrchu

Jakákoliv technologická metoda po sobě na povrchu zanechává nerovnosti [25].

Pro posouzení nerovností povrchu jsou důležité tyto pojmy [25]:

- **nedokonalost povrchu** (rýhy, trhliny, póry, staženiny, koroze, mikrotrhliny apod.)
- **struktura povrchu** (člení se podle velikosti rozteče nerovností na drsnost povrchu, vlnitost povrchu a základní profil)



Obr. 3.1 Profil povrchu [6]

K měření a vyhodnocování struktury povrchu se používá profilová metoda hodnocení, kdy profil povrchu vzniká jako průsečnice nerovností skutečného povrchu s rovinou, kolmo k tomuto měřenému povrchu. Pro posuzování struktury povrchu je pak profil povrchu základním zdrojem informací [25].

Z profilu povrchu se pomocí profiloměrů odvodí profil drsnosti povrchu (R-profil), profil vlnitosti (W-profil) a základní profil povrchu (P-profil) [25].

Drsnost povrchu je ovlivněna bezprostředně procesem řezání[19]. Tedy stopami, které zanechává břit nástroje při obrábění. Stupeň drsnosti je kromě fyzikálních a mechanických vlastností obráběného materiálu také závislý na [8]:

- tvaru a geometrii břitu,
- na velikosti posuvu,
- řezné rychlosti,
- tuhosti soustavy stroj-nástroj-obrobek,
- řezném prostředí [8].

Z geometrie břitu ovlivňují drsnost obrobené plochy především úhly nastavení hlavního ostří (K_r) a vedlejšího ostří (K_r'), a to zejména při větších posuvech. Dále pak poloměr zaoblení špičky. Větší poloměry zaoblení špičky nástroje drsnost obrobené plochy snižují, hlavně při malých posuvech a malé hloubce řezu [8].

Posuv má na drsnost povrchu největší vliv. Se zvyšujícím se posuvem roste úměrně i drsnost obrobené plochy [8]. Větší drsnost obrobené plochy v závislosti na řezné rychlosti se projevuje především při malých řezných rychlostech, kdy vzniká možnost tvoření nárůstku [8].

Malá tuhost soustavy, stroj-nástroj-obrobek, má za následek vznik chvění, a tedy i následné zvyšování drsnosti obrobené plochy. Chvění se dá eliminovat pevným upnutím obrobku, co nejmenším vyložení nástroje, zvětšením úhlu nastavení ostří κ , změnou řezné rychlosti nebo posuvu [8].

Řezné prostředí se na drsnosti obrobené plochy příznivě projeví použitím řezných kapalin a olejů s chladícími účinky. Zejména při obrábění na čisto a při malých řezných rychlostech, kdy chladící účinek zamezuje tvorbě nárůstku a omezuje tření na ploše řezu [8].

3.1.1 Charakteristiky drsnosti povrchu:

Drsnost povrchu je charakterizována parametry drsnosti povrchu. Jako nejčastěji uváděné parametry drsnosti povrchu lze pokládat střední aritmetickou úchylku R_a a maximální výšku profilu R_z . Dalšími parametry, které charakterizují, drsnost povrchu jsou: střední kvadratická hodnota R_q , materiálový podíl drsnosti profilu $R_{mr}(c)$, střední vzdálenost rýh R_{Sm} a střední vzdálenost výšek elementů profilu R_c [29].

Průměrná aritmetická úchylka Ra [29]:

-Dle DIN EN ISO 4287 se jedná o aritmetický střed absolutních odchylek filtrovaného profilu drsnosti od střední čáry uvnitř základní délky lr.

$$Ra = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad [\mu\text{m}] \quad [25] \quad (3.1.)$$

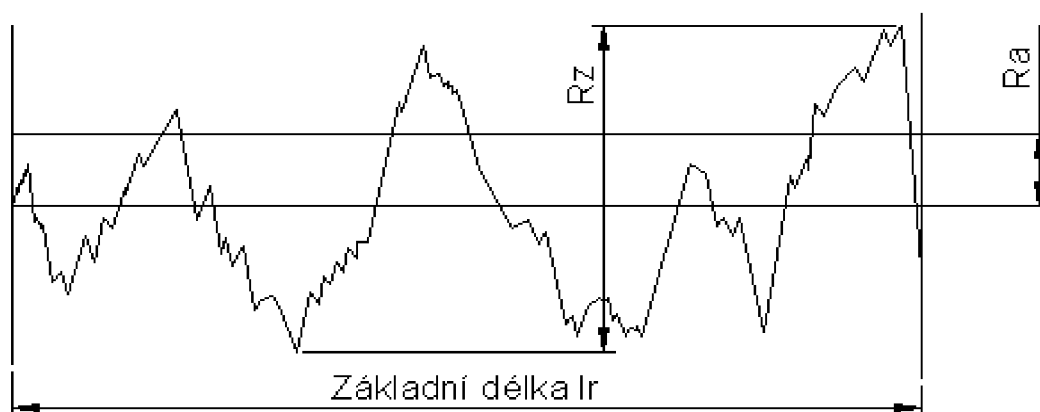
lr- Základní délka

Z(x) - výška posuzovaného profilu v libovolné poloze x.

Maximální výška profilu Rz [29]:

-Dle DIN EN ISO 4287 součet výšky nejvyššího výstupku Rp a hloubky nejnižší rýhy Rv uvnitř základní délky lr.

$$Rz = \frac{1}{n} \cdot (Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n) \quad [\mu\text{m}] \quad [25] \quad (3.2)$$



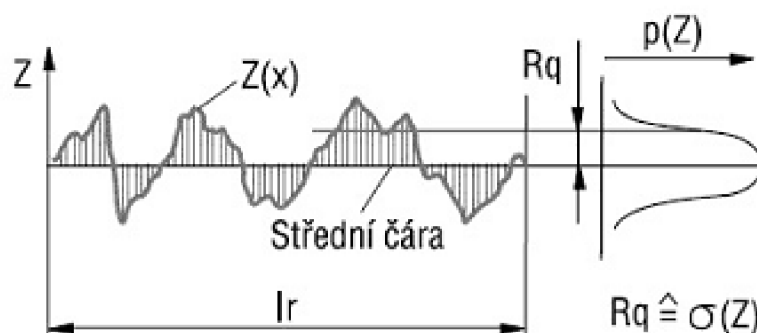
Obr. 3.2 Průměrná aritmetická úchylka Ra, maximální výška profilu Rz [25]

Střední kvadratická hodnota drsnosti Rq [29]:

-Dle DIN EN ISO 4287 je Rq střední kvadratická hodnota odchylek filtrovaného profilu drsnosti uvnitř základní délky l_r .

-Parametr Rq má význam při statistickém pozorování profilu povrchu, neboť Rq zároveň odpovídá standardní odchylce z profilových souřadnic.

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z^2(x) dx} \quad [\mu\text{m}] \quad [29] \quad (3.3)$$

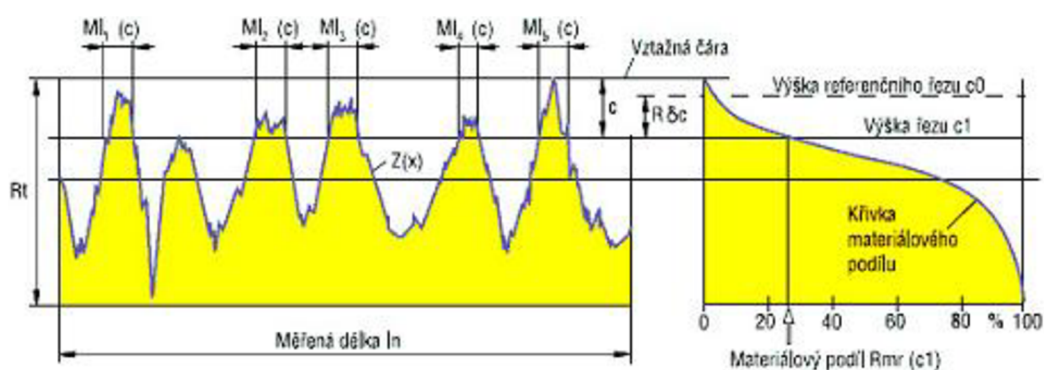


Obr. 3.3 Střední kvadratická hodnota drsnosti Rq [29].

Materiálový podíl drsnosti profilu $Rmr(c)$ [29]:

-Dle DIN EN ISO 4287 je $Rmr(c)$ procentuální podíl součtu délek materiálových přímek $MI(c)$ v dané výšce profilu v k měřené délce l_n . Křivka podílu materiálu udává podíl materiálu jako funkci hladiny (výšky) řezu.

$$Rmr'(c) = \frac{100}{l_n} \sum_{i=1}^m MI_i(c) = \frac{MI(c)}{l_n} \quad [\%] \quad [29] \quad (3.4)$$

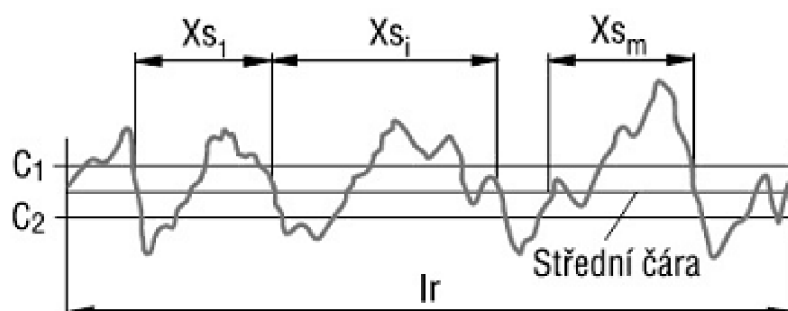


Obr. 3.4 Materiálový podíl drsnosti profilu $Rmr(c)$ [29].

Střední vzdálenost rýh RSm [29].

-Dle DIN EN ISO 4287 je RSm střední hodnota roztečí nerovností profilu v rozsahu vyhodnocované délky l_r .

$$RSm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{s_i} \quad [\mu\text{m}] \quad [29] \quad (3.5)$$

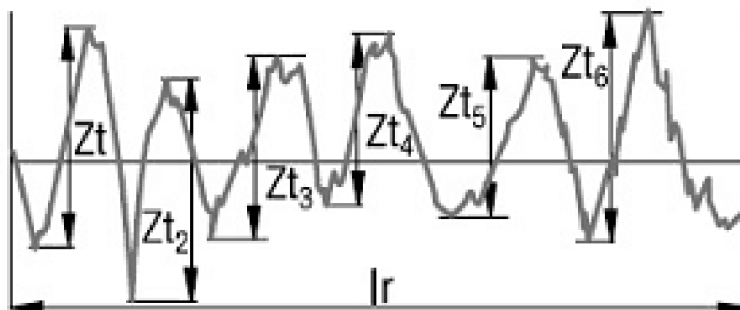


Obr 3.5 Střední vzdálenost rýh RSm [29].

Střední vzdálenost výšek elementů profilu Rc [29].

-Dle DIN EN ISO 4287 je Rc aritmetický střed výšek elementů drsnosti profilu Z_t uvnitř základní délky l_r .

$$Rc = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_{t_i} \quad [\mu\text{m}] \quad [29] \quad (3.5)$$



Obr 3.6 Aritmetický střed výšek elementů drsnosti profilu Rc [29].

3.2 Geometrické tolerance

Zvyšování požadavků na přesnost výrobků, rozšiřování výrobní kooperace a zhromadňování výroby, vyvolalo potřebu jednotného definování a předepisování tolerancí tvaru, směru, polohy a házení. Tyto tolerance se souhrnně nazývají geometrické tolerance [25].

Geometrické tolerance tvaru, směru, polohy a házení mohou nepříznivě ovlivnit funkci jak jednotlivých součástí, tak celých strojů. Příkladem je hlučnost chodu a zvyšování opotřebení u elementů valivých ložisek vlivem úchytky kruhovitosti těchto elementů [25].

Geometrické úchytky, ale také úchytky rozměrů a struktury povrchu nám napomáhají k možnosti zaměnitelnosti součástí [25].

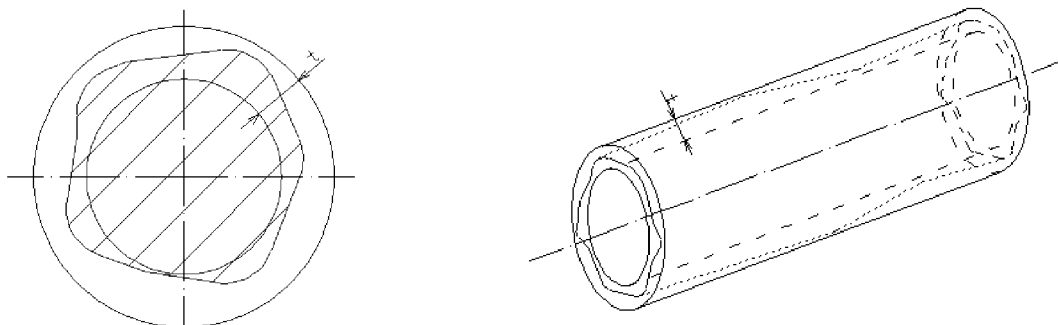
3.2.1 Geometrické tolerance tvaru

Mezi geometrické tolerance tvaru patří úchytky:

- přímosti,
- rovinnosti,
- kruhovitosti (obr. 3.7a),
- válcovitosti (obr. 3.7b) [25].

Pro obrábění děr se z hlediska geometrie díry zaměřuje na sledování úchytky kruhovitosti a válcovitosti.

Za správnou se považuje kruhovitost nebo válcovitost tehdy, jestliže vzdálenost každého bodu prvku od obalové kružnice nebo obalového válce ideálního geometrického tvaru je nejvýše rovna hodnotě předepsané tolerance [25].



Obr. 3.7a Kruhovitost a obr. 3.7b Válcovitost [29]

3.2.2 Geometrické tolerance polohy

Mezi geometrické tolerance polohy patří úchytky:

- rovnoběžnosti,
- kolmosti,
- souososti [25].

Jedná se o geometrické tolerance vztahující se k předepsaným základnám.

V případě tolerancí rovnoběžnosti a kolmosti se jedná o tolerance orientace. Tolerance orientace předepisuje obecně orientaci tolerančního prostoru k základně a současně předepisuje i šířku tolerančního prostoru [25].

V případě rovnoběžnosti, toleranční zóna, v níž musí ležet povrchové linie tolerovaného válce, je ohraničena 2 rovnoběžnými přímkami o vzdálenosti t , které jsou rovnoběžné se vztažnou osou [29].

U kolmosti je to toleranční zóna ohraničena 2 rovnoběžnými rovinami o vzdálenosti t , které jsou kolmé ke vztažné ose. Tolerované čelní plochy musí ležet mezi těmito rovinami [29].

V případě tolerance souososti se jedná o toleranci umístění, která předepisuje umístění tolerovaného prvku vzhledem k základně a zároveň předepisuje i velikost tolerančního prostoru [25].

U souososti je toleranční zóna ohraničena válcem o průměru t , jehož osa je totožná se vztažnou osou, tedy základnou. Skutečná osa tolerovaných elementů musí ležet uvnitř toleranční zóny [29].

Přesnost rozměru, tvaru a polohy je především dána tuhostí soustavy stroj-nástroj-obrobek, vlastní přesností stroje a dalšími faktory, které ale působí nepřímo na technologický proces [19].

3.3 Úchytky rozměru

Úchylka rozměru je povolená odchylka skutečného (naměřeného) rozměru od jmenovitého, neboli požadovaného rozměru, který je navržen konstruktérem na výkrese součásti. Velikost úchytky rozměru je dána tolerančním polem.

Toleranční pole, je prostorové pole určené velikostí tolerance a její polohou, vzhledem k jmenovitému rozměru [25]. Je to pole, které je ohraničeno horní mezní úchytkou a dolní mezní úchytkou a mezi těmito hodnotami leží jmenovitý rozměr. Velikost tolerančního pole je dána tolerančním stupněm přesnosti IT.

Aby se vyhovělo požadavkům různých výrobních oborů na přesnost výroby, zavádí norma ISO pro rozměry do 500mm 20 tolerančních stupňů. Ty jsou značeny IT01, IT0, IT1, IT2 až IT18, přičemž toleranční stupně IT01 až IT5 jsou označovány jako velmi přesné [25].

Pro rozměry od 500mm do 3150 mm jsou určeny toleranční stupně pouze IT1 až IT18 [25].

3.4 Vlastnosti povrchové vrstvy

Jsou vyjadřovány strukturními změnami, stupněm zpevnění, které jsou úměrné velikosti zbytkových napětí [19].

Při posuzování vlivu technologických procesů na vlastnosti povrchové vrstvy obrobku je možné vycházet z druhu a intenzity energií, které se na jeho realizaci podílejí. Jedná se o energii mechanickou, tepelnou a chemickou. Je však nutné brát v úvahu i vlivy metalurgické, fyzikální a také vlivy vlastností materiálu [19].

3.4.1 Zbytková napětí.

Než se z materiálu stane hotový výrobek, projde celou řadou operací, postupů a zpracování. Pro přetvoření materiálu do konečného stavu je ve většině případů použito vnější síly, která se liší pro každou technologickou operaci [18].

Zbytková napětí jsou napětí, která existují v materiálu i bez působení vnějších sil. Jejich velikost a smysl mohou být různé. V podstatě rozeznáváme dva druhy zbytkových napětí a to tahová a tlaková. Tahová zbytková napětí jsou kladná, zatím co tlaková napětí jsou záporná. Při jakémkoliv procesu, kdy je materiál vystaven působení vnějších sil vznikají napětí, která se vždy sčítají v absolutních hodnotách. Zejména tahová napětí působí jako koncentrátoři napětí v nerovnostech a mikrotrhlinách. Cílem je tedy z hlediska řezných podmínek eliminovat všechna možná rizika vzniku zbytkových napětí [18].

Příčiny vzniku zbytkových napětí:

- nerovnoměrná plastická deformace v obrobeném povrchu,
- nerovnoměrný ohřev a ochlazení materiálu, které vyvolává jeho roztažení a smršťování,
- nerovnoměrné změny struktury, vyvolané působením tepla a mechanických sil,
- chemické procesy spojené s reakcí částic pronikajících do povrchové Vrstvy [19].

Zbytková napětí jsou důkazem průběhu řezného procesu. Nelze u nich brát v úvahu pouze jejich absolutní velikost, ale je nutno se zabývat i druhem a průběhem zbytkových napětí [18].

4 PŘÍPRAVA POLOTOVARU

4.1 Technologie výroby polotovaru pro vystružování

Při obrábění polotovaru se postupně mění jeho tvar, rozměry a struktura povrchu. Uvedené změny způsobuje postupné ubírání vrstev materiálu z povrchu polotovaru v jednotlivých fázích technologického postupu [11].

Vystružování technologicky navazuje na vrtání, vyvrtávání nebo jiné obrábění uvažovaných děr [13]. Tedy příprava díry před vystružováním musí splňovat určité požadavky, aby byl konečný povrch vyroben v zadané toleranci.

Nevhodně předobrobená díra před vystružováním, má značný vliv na výslednou přesnost vystružování, trvanlivost břitů, kvalitu vystruženého povrchu díry a celkovou geometrii [32].

Zejména musí být dodrženo:

- rovnoměrný a optimální přídavek materiálu pro následné vystružování,
- dostatečná kruhovitost a přímost předpracované díry,
- souosost a rovnoběžnost předpracované díry s osou vřetene stroje při vystružování (při velké nesouososti může dojít k poškození nástroje) [32].

Nejlepších výsledků při vystružování se dosahuje předpracováním díry jednobřitým vyvrtávacím nástrojem [32]. Na obrázku 4.1 je vyvrtávací tyč NGV.



Obr. 4.1 Nastavitelná vyvrtávací tyč NGV firmy HAM-FINAL [32].

4.2 Stanovování přídavků pro vystružování

Přídavky pro vystružování mají vliv zejména na požadované přesnosti a drsnosti povrchu obrobené díry. Závisí i na druhu obráběného a nástrojového materiálu, velikosti průměru, konstrukci nástroje apod. [12].

Příliš malý přídavek zhoršuje vstupní parametry procesu. Vlivem velké plastické deformace při odebírání příliš malého přídavku by docházelo k intenzivnímu opotřebení břitů nástroje [21].

V praxi se pro stanovení přídavku na vystružování užívá vztahu [10]:

$$p(2a_p) = 0,1 + 0,005 \cdot D \quad [\text{mm}] \quad (4.1)$$

Přídavek je určen na průměr vystružované díry a jeho velikost je na tomto průměru závislá. Například pro vystružované díry $\Phi 20$ mm, bude přídavek volen takto:

$$p = 0,1 + 0,005 \cdot 20 = \underline{\underline{0,2\text{mm}}}$$

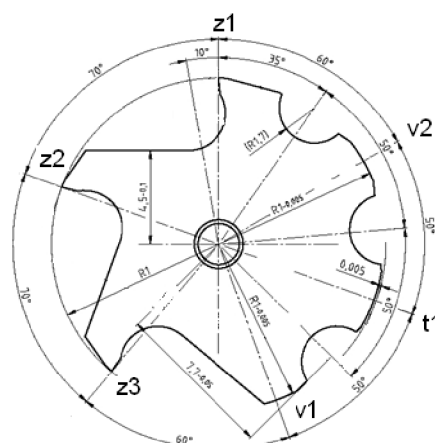
5 VYSTRUŽOVACÍ HLAVICE MT3

Vysokorychlostní vystružovací hlavice MT3 je produktem firmy HAM-FINAL. HAM-FINAL je česko-německá firma zabývající se vývojem, výrobou a prodejem nástrojů pro vystružování, vyvrtávání a obrábění velmi přesných děr.

Vystružovací hlavice MT3 je nástroj s definovanou geometrií břitu určený k dokončování otvorů za vysokých řezných rychlostí.

Tyto vystružovací hlavice umožňují obrábět velmi přesné díry od stupně přesnosti IT5 [33].

Dosahovaná kvalita obrobeného povrchu se v závislosti na pracovních podmínkách a obráběném materiálu pohybuje od IT 5 až IT6. Uvedené hodnoty profilu povrchu vystružené díry odpovídají broušenému povrchu. Je tedy možné vystružováním s nástroji MT3, nahradit mnohdy neefektivní dokončovací broušení přesných děr [33].



Obr. 5.1 Vystružovací hlavice MT3 [16, 33].

5.1 Konstrukce nástroje

Hlavice se skládá z řezné části, která je pomocí tvrdého pájení (indukčního či vakuového) připevněna k upínací části nástroje. Řezná část nástroje obsahuje 3 zuby (z1, z2 a z3), 2 vodítka (v1 a v2) a jeden opěrný měřicí člen (technologickou základnu t1) obr. 5.1. Zuby jsou umístěny za sebou (po 70°) přibližně na jedné polovině nástroje a zajišťují vlastní proces úběru třísky. Aby nedocházelo k vychylování nástroje při obrábění mimo osu, jsou na protější polovině nástroje umístěna dvě vodítka. Vodítka jsou určena ke správnému vedení nástroje v ose vyvrtané díry. Tím je zajištěna souosost vystružované díry a správný chod nástroje dírou. Měřicí člen slouží jako technologická základna pro kontrolu a měření průměru výstružníku. Nástroj se tepelně upíná do pouzdra. Tepelné upnutí v upínacím pouzdře zajišťuje přesné ustavení vystružovací hlavice.

5.2 Materiál nástroje

Vystružovací hlavice MT3 jsou vyráběny s břity z cermetů, PKD nebo KNB. Slinuté karbidy se pro MT3 nepoužívají.

5.2.1 Cermety.

Název Cermet vznikl složením prvních tří hlásek slov **ceramics** (keramika) a **metal** (kov). Cermet by měl tedy být rezný materiál, jehož mechanické vlastnosti vykazují vhodnou kombinaci tvrdosti keramiky a houževnatosti kovů. Skutečnost se však podstatně liší, jelikož materiál takovýchto vlastností se ještě vyrobit nepodařilo [9].

Cermety jsou slinuté materiály s tvrdou fází, která je tvořena zejména TiC, TiN, Mo₂C, popřípadě kombinací těchto prvků. Tvrdá fáze cermetů vytváří při obrábění plochy s velmi nízkou drsností povrchu. To je způsobeno nízkou náchylností k reakci s obráběným materiálem a vysokou odolností proti adhezi. Osvědčili se jako vhodný materiál pro dokončovací obrábění vysokými rychlostmi, protože TiC je termochemicky stabilnější než WC [9].

Pro výrobu cermetů se používá technologie podobná technologii výroby běžných slinutých karbidů, kde jako základní materiály jsou obvykle používány sloučeniny TiC, TiN, WC, Mo₂C, TaC nebo NbC. Tyto sloučeniny jsou důkladně promíchány s pojivem, což je prášek Co, Ni nebo kombinace těchto prvků. Nejčastější metodou výroby cermetů je slinování [9].

Mezi základní vlastnosti cermetů patří:

- vysoká chemická stabilita a tvrdost za tepla,
- vysoká odolnost proti opotřebení,
- malá náchylnost k tvoření nárůstku,
- vysoká odolnost proti difúznímu a oxidačnímu opotřebení,
- nízká měrná hmotnost,
- nízký koeficient tření při obrábění kovů [1].

5.3 Řezné podmínky

Řezné podmínky jsou jedním z hlavních předpokladů, na kterých závisí, jak bude vypadat obrobený povrch po obrábění nástrojem. Jsou závislé jak na materiálu obráběného povrchu a materiálu nástroje, tak i na způsobu a druhu použitého chlazení při obrábění. Vystružovací hlavice MT3 jsou vyráběny s vnitřním přívodem chladicí kapaliny. To umožňuje lepší odvod třísky z obráběné díry a zajištění lepšího odvodu tepla při obrábění než při použití vnějšího chlazení. Ne všechny stroje jsou však uzpůsobeny k obrábění nástrojem s vnitřním chlazením, a proto někdy nezbyvá než použití vnějšího chlazení. Pokud není možné využití vnitřního chlazení, je třeba uzpůsobit řezné podmínky, tedy řeznou rychlost a posuv na otáčku.

5.4 Povrchová úprava

Vystružovací hlavice MT3, jsou vyrobeny z cermetu a vyžadují povrchovou úpravu ve formě naneseného povlaku. Povlak je vrstva v μm nanesená na povrch základního materiálu nástroje. Povlaky se nanášejí především ke snížení tření a zvýšení trvanlivosti nástroje. Na nástroje pro vystružování se nanášejí vrstvy povlaku od 3 do 6 μm [33].

Hlavice MT3 jsou povlakovány ve firmě CemeCon. Pro tyto nástroje se používá povlak Hyperlox, Titanlox nebo HSN². V poslední době je povlak hyperlox nejpoužívanější.

Mezi výhody povlaku Hyperlox patří:

- jemnozrná struktura,
- vysoká oxidační odolnost (je závislá na množství hliníku),
- vysoká teplotní stabilita,
- vysoká tvrdost a houževnatost,
- velká flexibilita povlaku [35].

Než dojde k vlastnímu nanesení povlaku je třeba nový nástroj odmastit a očistit od různých nečistot. Čištění probíhá takzvaným pískováním. Pískování dělíme na mokré a suché pískování. Metoda mokrého pískování se používá pro nástroje vyrobené práškovou metalurgií. Důvodem pískování je odstranění otřepů a nečistot vzniklých výrobou či používáním. Problémem u pískování je, že u nástrojů s malým zaoblením ostří dojde vlivem působení částic písku k zvětšení zaoblení ostří nástroje. A tedy nástroje, u kterých je požadována, co nejmenší hodnota zaoblení ostří jsou pouze odmašťovány a umývány před nanesením povlaku. K pískování u nich tedy nedochází.

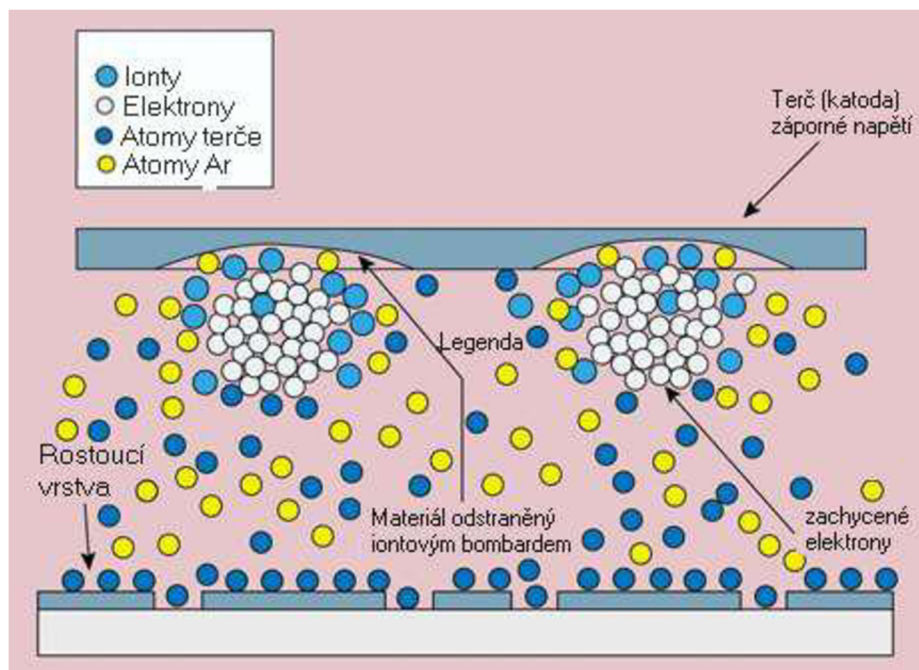
Po očištění jsou nástroje naskládány na stojany (viz obrázek 5.2 a umístěny do stroje (viz obr. 5.3) k nanesení povlaku.

To probíhá takzvaným magnetonovým napařováním. Metoda magnetonového (viz obrázek 5.4) napařování je metodou PVD (**P**hysical **V**apour **D**eposition) tedy fyzikální metodou nanášení povlaku. Probíhá za teplot do 550°C v prostředí vakua.



Obr. 5.2 a 5.3 Umístění nástrojů v držáku před umístěním do stroje vlevo a vpravo povlakovací stroj CC800/9ML – foto z firmy CemeCon

Do povlakovacího zařízení jsou vloženy nástroje v držácích, ve kterých konají sdružený planetový pohyb, zatímco je na ně nanášen povlak. Ten je odpařován z terčů (katod) a nanášen pomocí magnetického pole na povrch nástroje (anoda).



Obr. 5.4 Magnetronové napařování [17].

5.5 Výhody vystružovací hlavice MT3

Mezi hlavní přednosti vystružovací hlavice MT3 patří [15]:

- možnost obrábět díry ve stupni přesnosti IT5 a IT6,
- drsnost obrobeného povrchu $R_a = 0,4\mu\text{m}$, což nahrazuje nákladnou operaci broušením,
- provedení vystružovací hlavice je monolitní nebo pájené, není tedy nutné seřízení řezných segmentů nástroje,
- tepelné upnutí hlavice v upínači a z toho plynoucí vysoká tuhost a přesnost upnutí, tím je odstraněna nutnost seřízení rzivosti nástroje,
- díky přívodu chladící kapaliny uvnitř nástroje, je zabezpečen dobrý odvod třísky,
- vysoká provozní spolehlivost [15].

6 PRAKTICKÁ ČÁST

6.1 Volba obráběcího stroje

K provedení experimentu byl použit stroj Tajmac ZPS MCV 1210 (viz příloha 1). Tento stroj (Obr. 6.1) patří k vybavení strojního parku ÚST odboru obrábění na Vysokém učení technickém v Brně.

Stroj je konstruován jako pětiosé CNC obráběcí centrum s automatickým zásobníkem nástrojů až na 30 kusů. Stroj je vybaven řídicím systémem Sinumerik 840D.



Obr. 6.1 Tajmac ZPS MCV 1210 [36].

Mezi jeho přednosti patří:

- Vysoká produktivita,
- vysoká tepelná a dynamická stabilita,
- vysoká přesnost při obrábění,
- lineární vedení ve všech osách,
- přímé odměřování ve všech osách,
- snadné nakládání velkých dílů,
- možnost obrábění v pěti osách,
- ekologický provoz,
- využití HSC technologie [36].

6.2 Nástroj použitý pro experiment

Diplomová práce se zabývá vlivem rozměrového účinku, z hlediska změny šířky záběru ostří, na integritu obrobeného povrchu za použití vystružovací hlavice MT3 (viz obr 5.1). Jedná se o produkt firmy HAM-FINAL. Jde o pájený nástroj, který je vybaven třemi břity, dvěma vodítky a posledním členem je technologická základna. Nástroj je vyroben z cermetu a opatřen povlakem HSN². Povlak je nanášen metodou PVD.

Břity jsou umístěny na jedné polovině obvodu nástroje, po 70° od sebe a zařezávají se postupně do obrobku během první otáčky nástroje v záběru. Umístění břitů na jedné polovině nástroje by způsobovalo vychýlení nástroje z osy a z toho důvodu jsou na protější polovině nástroje vodítka, která udržují nástroj v ose a pomocí tváření zvyšují kvalitu obrobeného povrchu. Ploška mezi vodítky slouží jako technologická základna pro kontrolu a měření průměru.

Nástroj je tepelně upnut v termo-upínači a tím je zajištěno přesné a pevné upnutí nástroje. Výhodou tepelného upnutí je, že nástroj je díky tepelné roztažnosti upnut přesně v ose upínače a tedy i stroje.

6.3 Testované vzorky a jejich materiál

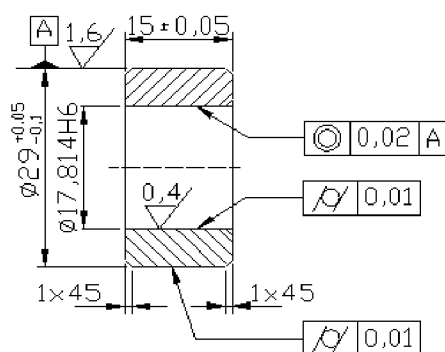
Vzorky jsou vyrobeny z austenitické korozivzdorné oceli značené dle normy DIN 1.4404. Tedy ocel 17 349 dle ČSN 41 7349. Fotografie materiálového listu je přiložena jako příloha č. 2. Chemické složení obráběné oceli je uvedeno v tabulce 6.1. Materiál patří mezi nízko uhlíkové oceli.

Tab. 6.1. Chemické složení oceli pro testovací vzorky [20].

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

Technologické vlastnosti materiálu DIN 1.4404:

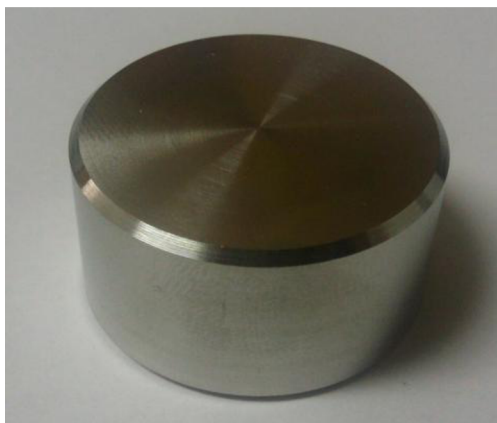
- materiál není feromagnetický,
- je houževnatý,
- je dobře svařitelný,
- má velmi dobrou odolnost vůči korozi [20].



Obr. 6.2 Testovaný vzorek [20].

6.4 Příprava polotovaru

Polotovar testovaného vzorku byl připraven z tyčového materiálu, u kterého bylo srážení hran a dělení (upichovacím nožem) provedeno na soustruhu. Požadované rozměry polotovaru: $\Phi 29$ mm a délka 15 mm. Na Obr. 6.3 můžeme vidět polotovar připravený k testování.

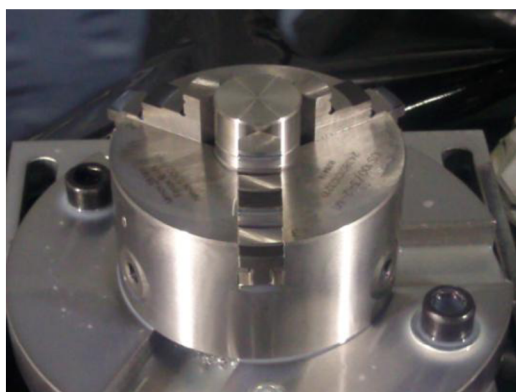


Obr. 6.3 Polotovar testovaného vzorku

6.5 Přípravek pro upnutí polotovaru

Z důvodu eliminace vzniku chyb při upínání byl ve školních laboratořích zkonstruován přípravek, který realizuje samotné upnutí polotovaru shora a eliminuje tím tak deformaci tělesa při upínání po obvodu. Tento přípravek upíná obrobek z vrchní části. Díky tomu tedy nedochází k deformaci na průměru obrobku při obrábění vlivem upnutí ve sklíčidle.

Při experimentu však vlivem uzavřeného přípravku nedocházelo k dostatečnému chlazení, z toho důvodu muselo být použito, k upnutí obráběných kusů, tříčelistové sklíčidlo (viz obr. 6.4).



Obr. 6.4 Vzorek upnutý v tříčelistovém sklíčidle a připravený k obrábění

6.6 Postup nastavování přídávku

Aby při obrábění nedocházelo ke vzniku chyb, které by vznikly vlivem upínání obrobku. Musely se všechny obráběcí operace obrábět na jedno upnutí. Tím se chyba při upnutí eliminovala a obráběný kus byl stále v ose obrábění.

Aby bylo možno nastavit vhodný přípravek před vystružováním bylo potřeba předvrtat díru pro vyvrtávací tyč NGV.

Nejdříve se pomocí navrtávačku HSS COBALT 5 s úhlem 90° upnutý vzorek navrtá. Tím se zajistí přesné navedení vrtáku do osy obrábění. Pro vyvrtání otvoru bylo potřeba dvou vrtáků a to $\Phi 10$ mm a $\Phi 17$ mm. Vrták průměru 10 mm byl použit z důvodu odlehčení a tím i zvýšení životnosti vrtáku průměru 17 mm.

Po vyvrtání otvoru $\Phi 10$ mm a následně $\Phi 17$ mm došlo k nastavení vyvrtávací tyče na přibližnou hodnotu požadovaného přídávku. Nastavování bylo prováděno mechanicky, pomocí stupnice na vyvrtávací tyči NGV, která byla osazena vyměnitelnou břitovou destičkou typu WCMT 06T304. Nastavená vyvrtávací tyč se utáhla pomocí šroubů v upínači WELDON. Tím bylo zajištěno, že se nastavený rozměr nezmění. Následovalo vyvrtání otvoru vyvrtávací tyčí. Z důvodu přibližného nastavení rozměru vyvrtávací tyče bylo prováděno měření rozměru, vyvrtaného otvoru, pomocí sondy (obr. 6.5) upnuté ve stroji. Tím se stanovil aktuální přídavek před vystružováním. Velikost připraveného otvoru před vystružováním se zaznamenala do protokolu a následnou operací došlo k zahloubení otvoru a tím se otvor připravil na finální operaci. Postup operací, volbu nástrojů a řezných podmínek použitých pro tyto operace je uveden v tabulce 6.2.

Tab. 6.2 Nástroje a řezné podmínky volené pro jednotlivé operace [20].

Číslo operace	Operace	Nástroj	Rezné podmínky					
			Φ díry v dané operaci	Řezná rychlost v_c	Otáčky n	Posuv f	Posuvová rychlost v_f	Chlazení
			[mm]	[m.min ⁻¹]	[ot.min ⁻¹]	[mm.ot ⁻¹]	[m.min ⁻¹]	[-]
1.	Navrtání	Středící vrták HSS COBALT 5 $\Phi 5 \times 90^\circ$	(-)	35	1300	0,08	125	Ano vnější chlazení
2.	Vrtání	Vrták DIN 338 HSSCo $\Phi 10$ mm	10	35	1390	0,1	139	Ano vnější chlazení
3.	Zvětšování díry vrtáním	Vrták SK M44 $\Phi 17$ mm	17	35	700	0,15	110	Ano vnější chlazení
4.	Vyvrtání	Vyvrtávací tyč NGV 16,7-17,7mm	16,7 - 17,7	50	1100	0,05	110	Ano vnější chlazení
5.	Vystružování	Výstružník MT3 $\Phi 17,814$ mm	17,814	60	1100	0,42	462	Ano vnější chlazení



Obr. 6.5 Měřicí sonda upnutá ve stroji Tajmac MCV ZPS 1210.

Výpočet teoretické drsnosti povrchu po vyvrtávání:

Vyvrtávání pomocí jednobřité vyvrtávací tyče můžeme považovat za vnitřní soustružení pomocí vnitřního soustružnického nože. A tedy proto můžeme použít vztahy 6.1 a 6.2 pro určení teoretické hodnoty drsnosti povrchu.

$$R_{zt} = r_n - \sqrt{\left(r_n - \frac{f^2}{4}\right)} \cong \frac{f^2}{8 \cdot r_\varepsilon} \quad [7] \quad (6.1)$$

$$R_{at} = 0,26 \cdot R_{zt} \quad [7] \quad (6.2)$$

Pro vyvrtávání byly nastaveny tyto řezné podmínky:

$$v_c = 50 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$f = 0,05 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$$

r_n – pro vyměnitelnou břitovou destičku, použitou ve vyvrtávací tyči bylo 0,4 mm.

Potom hodnota teoretické drsnosti povrchu po vyvrtávání byla:

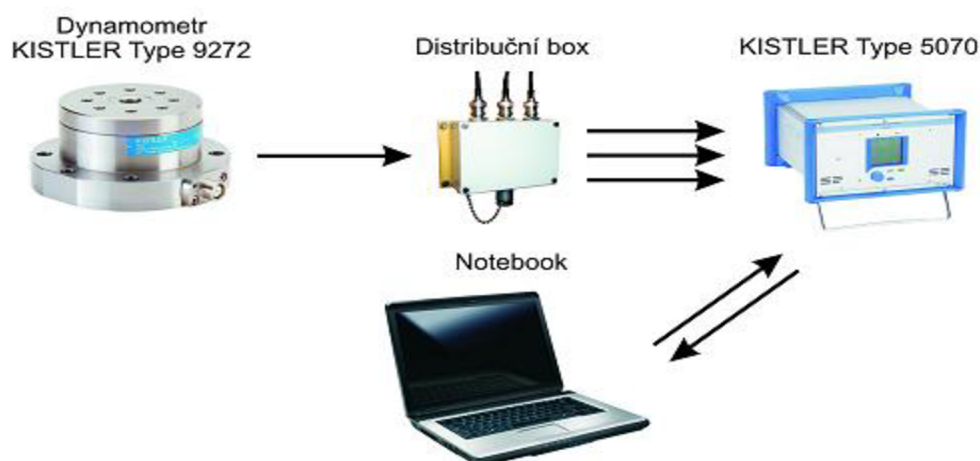
$$R_{zt} = \frac{f^2}{8 \cdot r_\varepsilon} = \frac{0,05^2}{8 \cdot 0,4} = \underline{\underline{7,8125 \cdot 10^{-4} \mu\text{m}}}$$

$$R_{at} = 0,26 \cdot R_{zt} = 0,26 \cdot 7,8125 \cdot 10^{-4} = \underline{\underline{2,03 \cdot 10^{-4} \mu\text{m}}}$$

Teoretická hodnota R_a byla stanovena pomocí výpočtu a to na rozměr $2,03^{-4}$ μm . Pomocí měřicího přístroje, Form Talysurf Intra 50, byla změřena skutečná hodnota R_a , která byla rovna hodnotě $0,42$ μm . Což by odpovídalo pravidlu, že skutečná hodnota R_a bývá větší než hodnota stanovená pomocí teoretického výpočtu.

6.7 Přístroje použité k měření posuvové síly F_f a řezného momentu M_c

K měření posuvové síly F_f a momentu M_c působících při vystružování, bylo využito měřicí aparatury od firmy Kistler s typovým označením 9274. Jedná se o piezoelektrický dynamometr připojený k osmikanálovému nábojovému zesilovači firmy Kistler s typovým označením 5070. Schéma zapojení měřicí aparatury je znázorněno na Obr. 6.6.



Obr. 6.6 Schéma zapojení měřicí aparatury [20].

6.8 Změny posuvové síly a řezného momentu v závislosti na čase pro měnící se hloubky třísky

Experiment probíhal za konstantních řezných podmínek pro všechny hodnocené vzorky. Jedinou veličinou, která byla v průběhu experimentu měněna, byla velikost odebíraného materiálu vyvrtávací tyčí. Tedy velikost přídatku před operaci vystružování.

Snahou bylo stupňovat velikost přídatku před vystružováním od nejmenší hodnoty nahoru, aby se zaznamenalo a zachytilo, kdy bude nástroj zabírat do materiálu a při jaké velikosti přídatku dojde k nárůstu posuvové síly a řezného momentu. Vycházelo se z předpokladu, že otvor odebíraný vystružovací hlavicí bude obroben na rozměr $17,814$ mm, ale nástroj má danou toleranci a je vyroben v toleranci na větší průměr. Aby se zajistilo, že se vlivem opotřebení velikost obrobené díry nedostane pod hodnotu dolní tolerance. Tím se zvýší i trvanlivost. Proto byla pomocí sondy (obr. 6.5) změřena hodnota průměru vystruženého otvoru a od toho se vycházelo při nastavování přídatku. Měření průměru otvoru proběhlo ve vzdálenosti $7,5$ mm od čela vzorku.

Postup stanovení minimální hloubky třísky pomocí součinitele pýchování třísky (viz kapitola 1):

Součinitel pýchování třísky je poměr tloušťky odebrané třísky $h_{DC}=0,03\text{mm}$, která byla naměřena pomocí mikrometru a neodebrané třísky h_D .

$$\Lambda = \frac{h_{DC}}{h_D} = \frac{0,03}{0,072} = \underline{\underline{0,4167}}$$

Ortogonální úhel řezu se určí z úhlu čela v ortogonální rovině:

$$\delta_0 = \alpha_0 + \beta_0 = 90^\circ - \gamma_0 = 90^\circ - 6^\circ = \underline{\underline{84^\circ}}$$

Výpočet ϕ pomocí goniometrických funkcí:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{\sin \delta_0}{\Lambda - \cos \delta_0} = \frac{\sin 84^\circ}{0,4167 - \cos 84^\circ} = \underline{\underline{3^\circ 11'}}$$

$$\phi = \operatorname{arctg} 3^\circ 11' = \underline{\underline{72^\circ 34'}}$$

Z úhlu střížné roviny a velikosti zaoblení ostří $r_n=0,005 \mu\text{m}$ se vypočítá velikost minimální hloubky třísky.

$$h_{D\min} = (1 - \cos \phi) \cdot r_n = (1 - \cos 72^\circ 34') \cdot 0,005 = 0,0036\text{mm} = \underline{\underline{3,6 \mu\text{m}}}$$

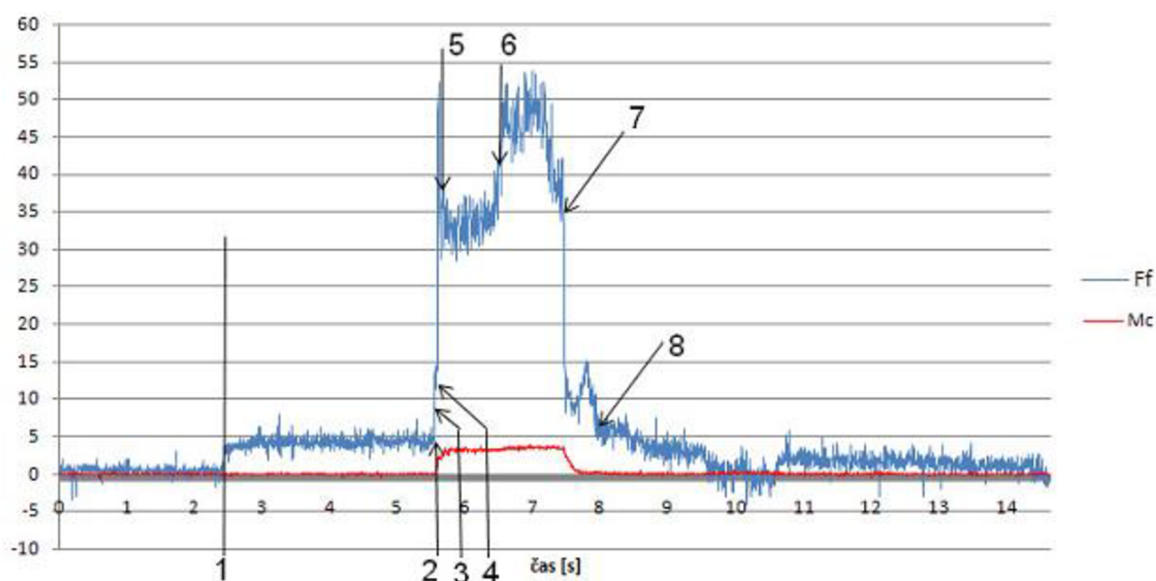
Při nastavování nejmenších hodnot přídavku se postupovalo po menších krocích v řádu mikrometrů, ale se stupňující se velikostí odebíraného materiálu bylo přidáváno postupně po větších krocích, jelikož nástroj zabíral celým ostřím a v takovém případě by neměl být vliv rozměrového účinku tak markantní. Ten by měl být největší s minimálními hodnotami šířky záběru ostří.

Jak probíhalo postupné nastavování přídavků před vystružováním, můžeme vidět v tabulce 6.3.

Tab. 6.3 Postup nastavování přídavků před vystružováním

Číslo vzorku	Φ vyvrtané díry	Velikost přídavku na Φ	Šířka záběru ostří
	[mm]	[mm]	[mm]
1.	17,83	0	0
2.	17,817	0,007	0,0035
3.	17,807	0,017	0,0085
4.	17,794	0,03	0,015
5.	17,785	0,039	0,0195
6.	17,783	0,041	0,0205
7.	17,774	0,05	0,025
8.	17,772	0,052	0,026
9.	17,769	0,055	0,0275
10.	17,761	0,063	0,0315
11.	17,751	0,073	0,0365
12.	17,747	0,077	0,0385
13.	17,739	0,085	0,0425
14.	17,724	0,1	0,05
15.	17,714	0,11	0,055
16.	17,704	0,12	0,06
17.	17,687	0,137	0,0685
18.	17,67	0,154	0,077
19.	17,649	0,175	0,0875
20.	17,63	0,194	0,097
21.	17,614	0,21	0,105
22.	17,608	0,216	0,108
23.	17,588	0,236	0,118
24.	17,568	0,256	0,128

Typický průběh síly a momentu v závislosti na čase při vystružování můžeme vidět na obr. 6.7. Popis jednotlivých úseků je v tabulce 6.4.



Obr. 6.7 Průběh posuvové síly F_f a řezného momentu M_c v závislosti na čase

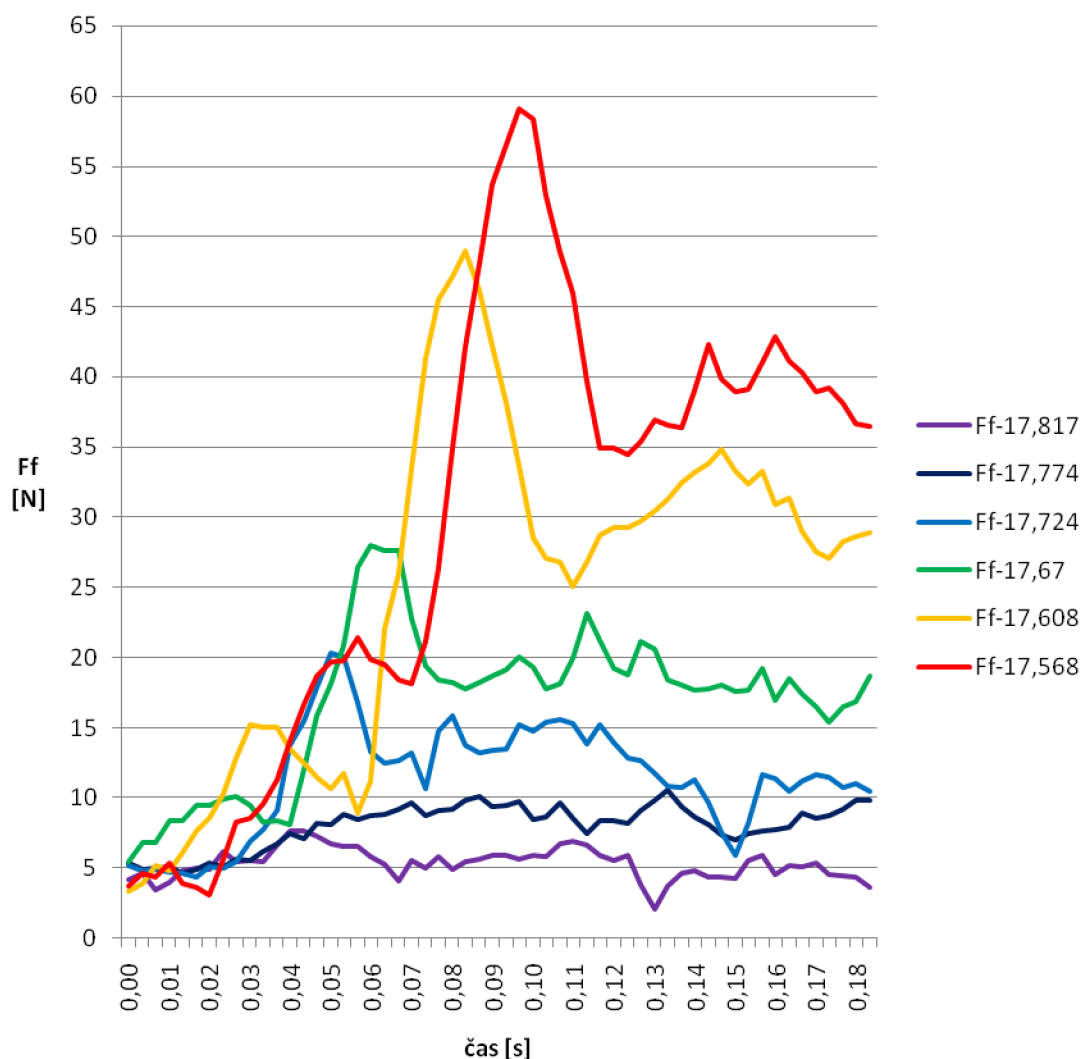
Tab. 6.4 Popis obrázku 6.7.

Pozice	Děj
1.	Start chlazení, otáček
2.	Zub Z1 začíná obrábět
3.	Zub Z2 začíná obrábět
4.	Zub Z3 začíná obrábět
5.	V tomto bodě jsou v záběru již všechny zuby i vodítka
6.	Všechny břity a vodítka jsou v záběru celým svým objemem
7.	Nástroj začíná vyjíždět z otvoru
8.	Nástroj prošel zkrz otvorem a v otvoru už je jen odlehčovací část výstružníku

Řezné podmínky pro vystružování, při kterých byly měřeny hodnoty posuvové síly F_f [N] a řezného momentu M_c [Nm]:

- Průměr vystružované díry $\Phi 17,824$ mm
- Otáčky stroje $1100 \text{ ot. min}^{-1}$
- Řezná rychlost 60 m. min^{-1}
- Posuvová rychlost 462 m. min^{-1}
- Posuv na otáčku $0,42 \text{ mm. ot}^{-1}$
- Chlazení Venkovní (emulze).

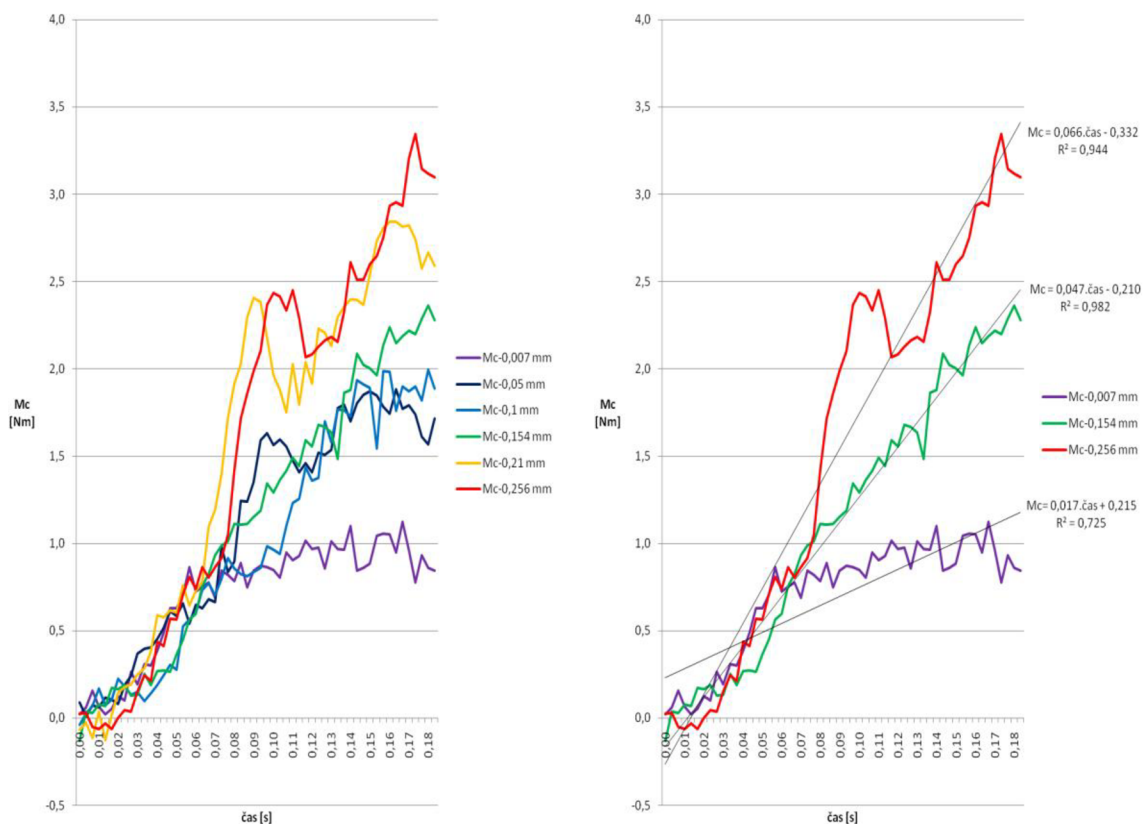
Průběh posuvové síly F_f v oblasti, kdy postupně zabírají do materiálu všechny zuby i vodítka (oblast 2 až 5 viz obrázek 6.7), v závislosti na čase. Pro vybrané velikosti přídavku před vystružovací operací je znázorněno v obrázku 6.8. Průběh je znázorněn v časovém intervalu 0 až 0,18 s. Během tohoto časového úseku, dochází k nárůstu velikosti posuvové síly vlivem najetí nástroje do řezu a k ustálení posuvové síly v době kdy nástroj pracuje všemi zuby i vodítky.



Obr. 6.8 Náběhy posuvových sil F_f v závislosti na čase, pro vybrané velikosti přídavků

Jak je z obr. 6.8 vidět, posuvová síla F_f se zvyšující se velikostí přídavku logicky narůstala. Důvodem byla nutnost nástroje vyvinout větší sílu, aby došlo k odstranění nechaného přídavku.

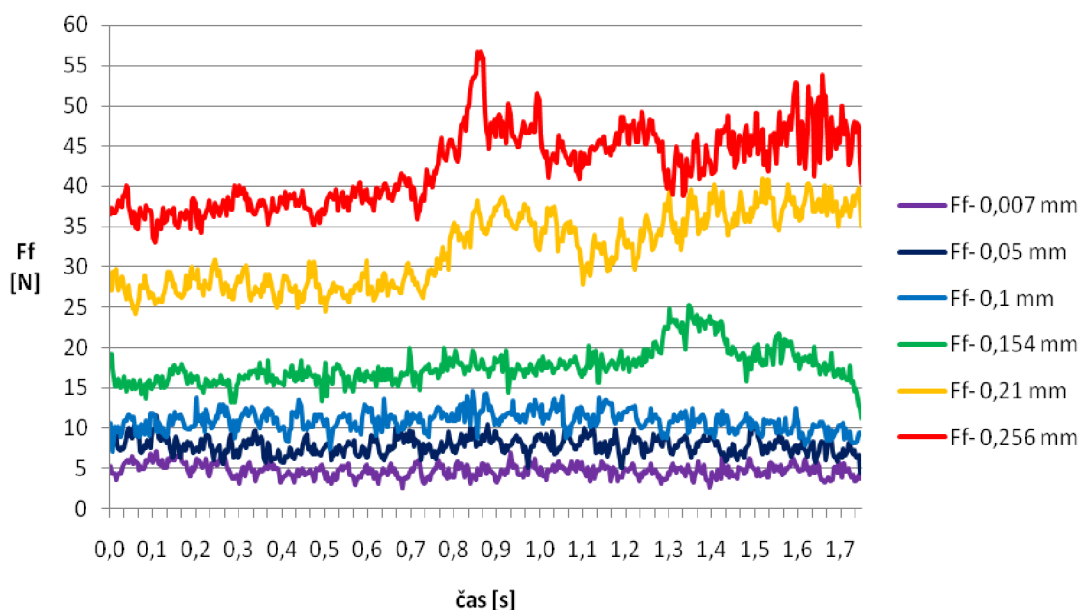
Průběhy rezného momentu M_c v oblasti, kdy postupně zabírají do materiálu všechny zuby i vodítka (oblast 2 až 5 viz obrázek 6.7), v závislosti na čase. Pro vybrané velikosti přídavku před vystružovací operací je znázorněno v obr. 6.9a) a 6.9b).



Obr. 6.9a) a 6.9b) Závislost řezného momentu M_c na čase, pro vybrané velikosti přídávků

Z obr. 6.9 je vidět, jak postupně, se zvětšující se velikostí přídávku, rostl řezný moment M_c v závislosti na čase. Důvodem je větší velikost odřezávané vrstvy materiálu vystružovací hlavicí. Ideální nárůst řezného momentu byl pro vystružování u otvoru s připravenou dírou po vyvrtávací tyči na Φ 17,67 mm (zelený průběh). Tedy v tomto případě byl přídavek před vystružovací operací 0,154 mm na Φ . Průběh naměřeného náběhu řezného momentu, při vystružování této hodnoty, je v obr. 6.9 zaznamenán zelenou barvou. Na Obr. 6.9b) můžeme vidět průběh M_c pro hodnoty přídávku 0,007 mm, 0,154 mm a 0,256 mm na vystružovaný průměr. Průběhy jsou proloženy lineární spojnící trendu s rovnicí regrese a hodnotou spolehlivosti R .

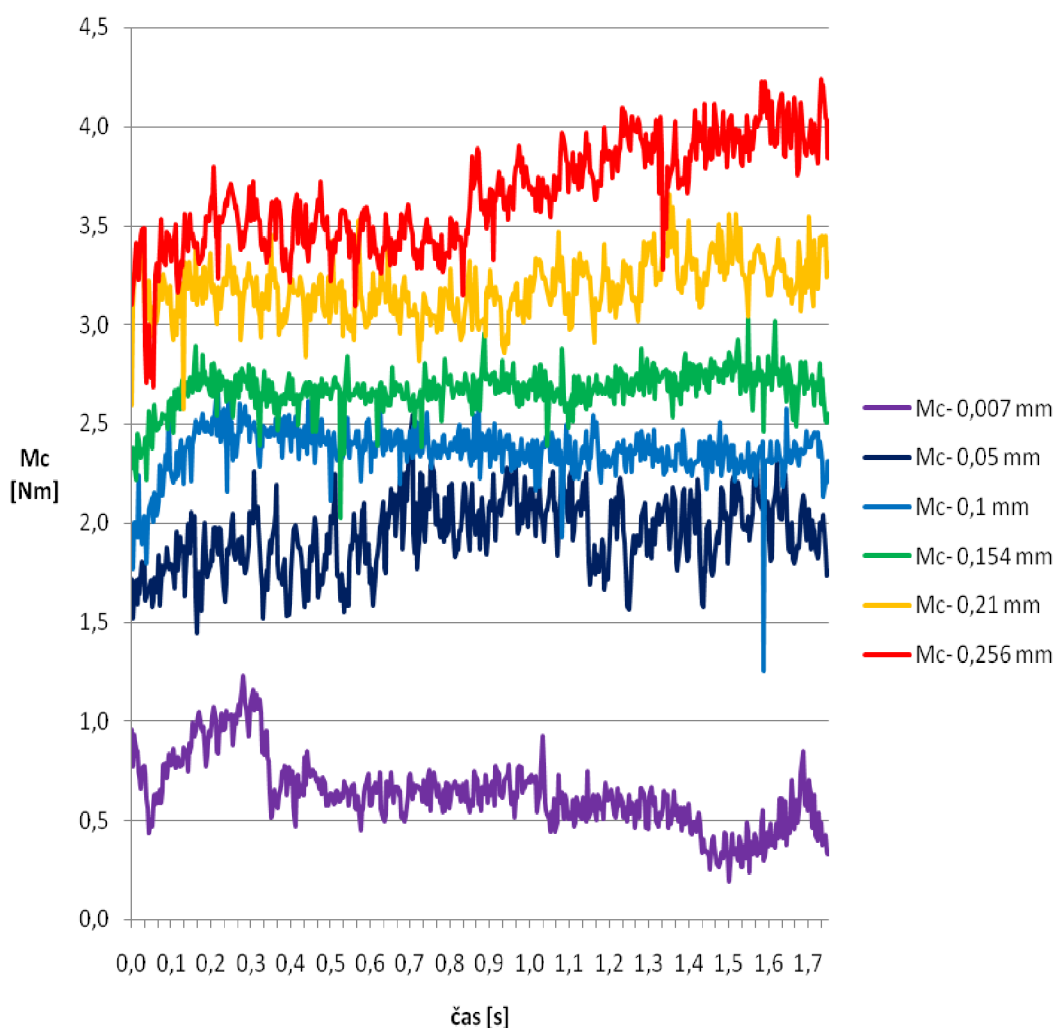
Po tzv. náběhové části, kdy se postupně dostávají do řezu zuby Z1, Z2 a Z3 a obě vodítka, dojde k ustálení řezného procesu, kdy je nástroj všemi svými částmi v otvoru a dochází k obrábění zbytku otvoru (oblast 5 až 7 viz obrázek 6.7). Chování posuvových sil F_f a řezného momentu M_c , v tomto ustáleném stavu, můžeme sledovat na obrázcích 6.10 a 6.11. Kde je možno vidět změnu velikostí těchto měřených veličin v závislosti na čase, pro různé vybrané velikosti přídávku pro vystružování. V časovém úseku o velikosti 1,7s (tato hodnota je orientační, bez náběhové části a části při které nástroj vyjíždí z řezu). V tomto čase je nástroj v plném záběru.



Obr. 6.10 Závislost posuvové síly F_f na čase, pro vybrané velikosti přídaveků

Vzhledem k manuálnímu a tedy ne úplně přesnému nastavování přídávku pro vystružovací operaci, jsme nebyli schopni, v čase určeném pro experiment, nastavovat hodnoty přídávků s přesností na tisíciny. I tak je z obr. 6.10 patrné, jak síly, se zvětšující se velikostí přidaného materiálu, rostly.

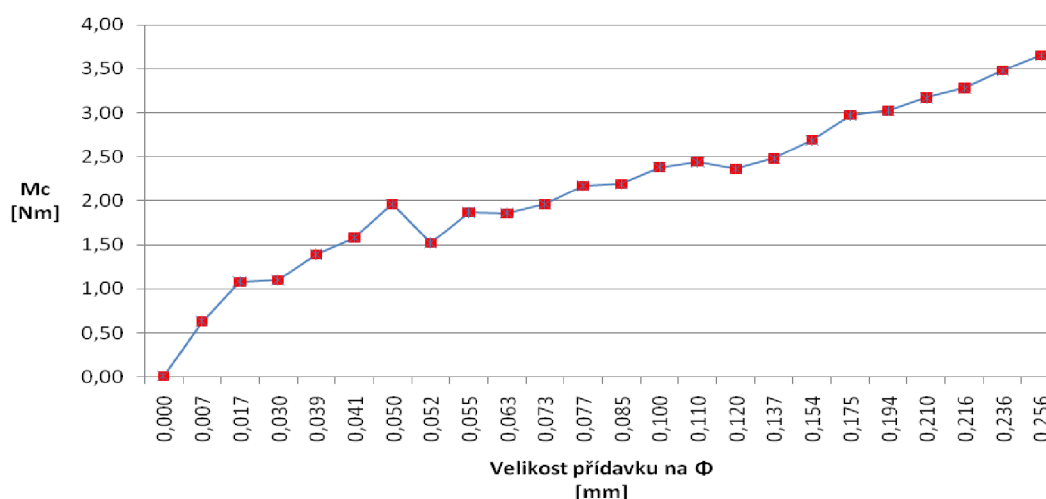
Nejmarkantnější skoky ve velikosti posuvové síly byly od hodnoty vyvrtané díry na $\Phi 17,67$ tedy přídavek $0,154$ mm. Do této hodnoty posuvová síla F_f narůstala s pomalejší tendencí pro dané přídávky. Z čeho lze usoudit, že hodnota $0,154$ mm přídávku je jakousi hraniční hodnotou. Od této hodnoty přídávku výše dochází k větším nárůstům posuvové síly F_f .



Obr. 6.11 Závislost řezného momentu M_c na čase, pro vybrané velikosti přídavků

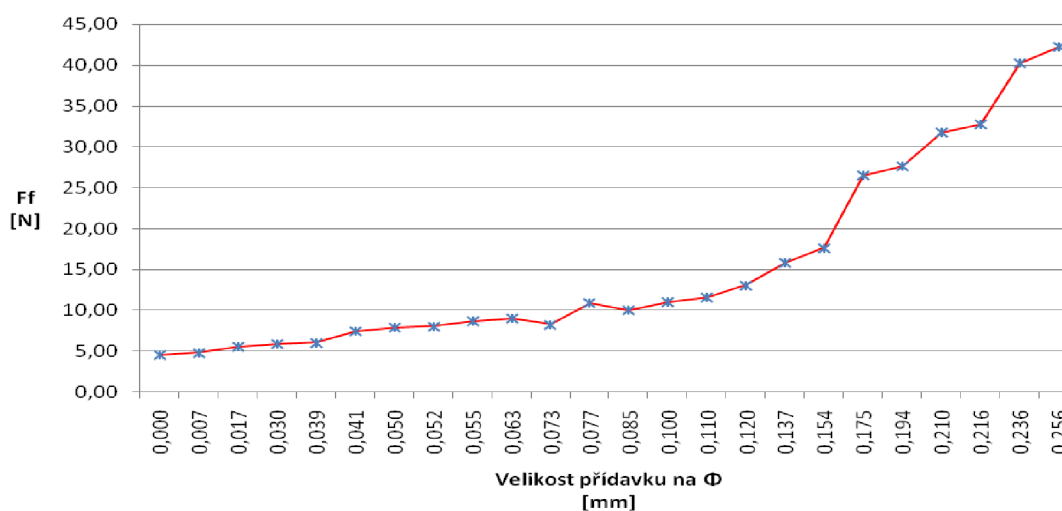
Z obrázku 6.11 je vidět, že u hodnoty připravené díry na $\Phi 17,817$ mm před vystružováním, docházelo k minimálnímu úběru materiálu. Vzhledem k náběhu momentu M_c , který je viditelný v obr. 6.9a), můžeme říci, že došlo k úběru materiálu. Mezi touto hodnotou a ostatními hodnotami je patrný skok ve velikosti momentu M_c . Jako nejstabilnější hodnota přídavku z hlediska průběhu momentu v ustáleném stavu se jeví velikost přídavku 0,154 mm (zelená křivka). Z obr. 6.11 je vidět, že při velikosti přídavku 0,154 mm nedocházelo k velkému kolísání hodnot řezného momentu.

Při měření pomocí dynamometru Kistler s typovým označením 9274, byly do protokolu zaznamenávány průměrné hodnoty řezného momentu M_c a posuvové síly F_f z oblasti (oblast 5 až 7 viz obrázek 6.7), kdy nástroj pracoval v otvoru a v oblasti kdy nástroj projížděl otvorem zpět do výchozího bodu. Jak se měnila velikost průměrných hodnot posuvové síly a řezného momentu můžeme vidět na obrázcích 6.12 a 6.13. Maximální a minimální hodnoty v těchto úsecích jsou vidět v příloze č. 2.



Obr. 6.12 Závislost průměrných hodnot řezného momentu M_c na velikosti přídavku v ustálené oblasti kdy nástroj pracoval v otvoru.

Z obrázku 6.12 je vidět jak průměrná hodnota řezného momentu narůstá s přibývajícím velikostí odebíraného materiálu. Takřka lineární průběh narušují pouze hodnoty u přídavku 0,05 mm na obráběném průměru. 5 až 7 viz obrázek 6. Nárůst řezného momentu u hodnoty přídavku 0,05 mm na obráběný průměr, může být způsobeno například vlivem nečistoty v obráběném materiálu nebo vlivem nedokonalého odplavování třísek, které se dostaly do řezu. Nebo také chybným odečtením hodnoty z dynamometru, tedy chybou lidského faktoru.

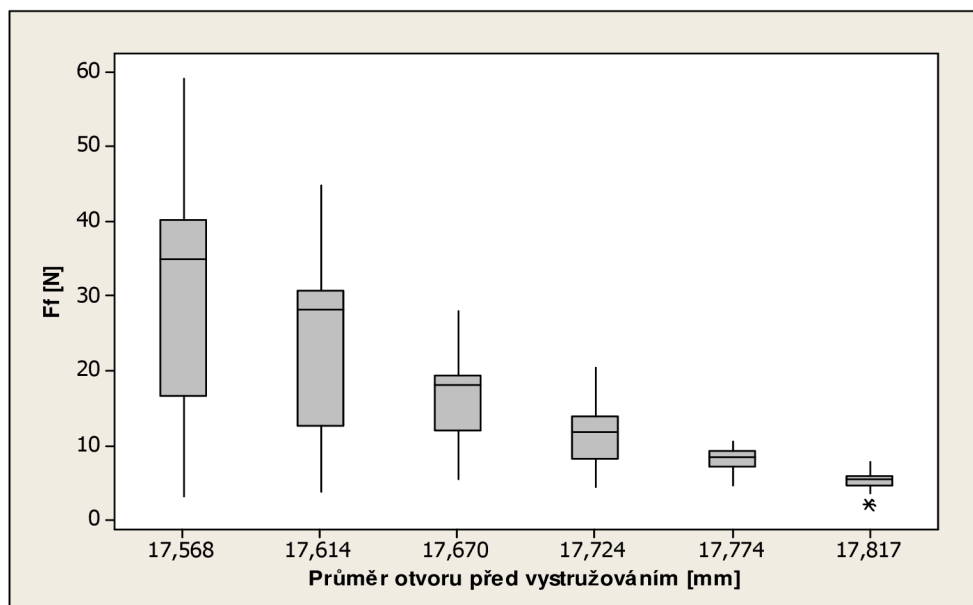


Obr. 6.13 Závislost průměrných hodnot posuvové síly F_f na velikosti přídavku v ustálené oblasti kdy nástroj pracoval v otvoru.

U znázornění závislosti průměrných hodnot posuvových sil F_f na velikosti přídavku v ustálené oblasti, které znázorňuje obrázek 6.13. Můžeme říci, že do velikosti přídavku 0,154 mm na obráběný průměr, hodnoty F_f rostly lineárně s pozvolnou tendencí. Zatím co od hodnoty přídavku 0,154 mm docházelo k většímu nárůstu posuvové síly. Tedy, materiál kladl větší odpor proti vnikání nástroje, než do hodnoty přídavku 0,154 mm.

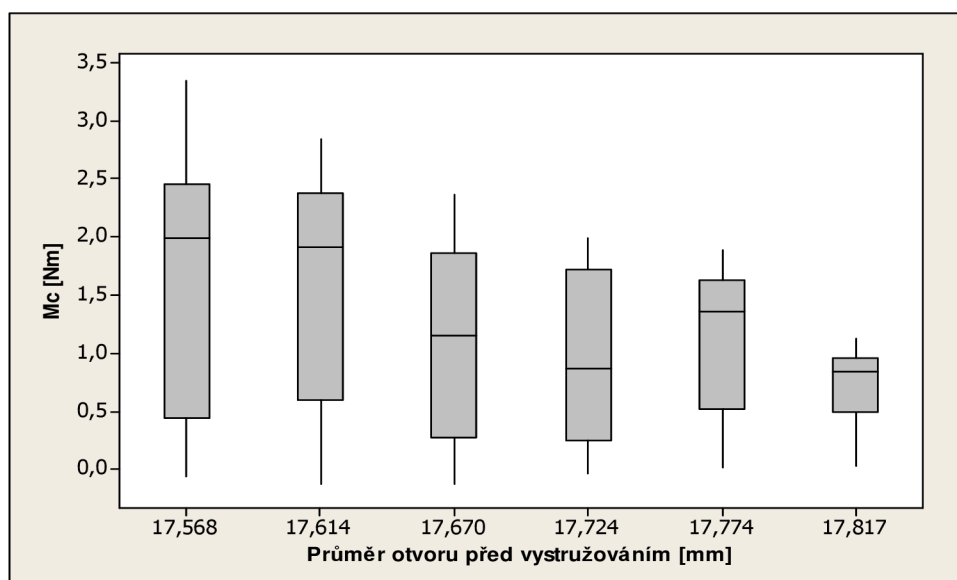
Statistické zpracování závislosti velikosti posuvové síly F_f a řezného momentu M_c na velikosti hloubky třísky:

Pomocí programu Minitab 15 bylo provedeno následující statistické zpracování pomocí boxových diagramů.



Obr. 6.14 Boxový diagram závislosti F_z na velikosti přídavku

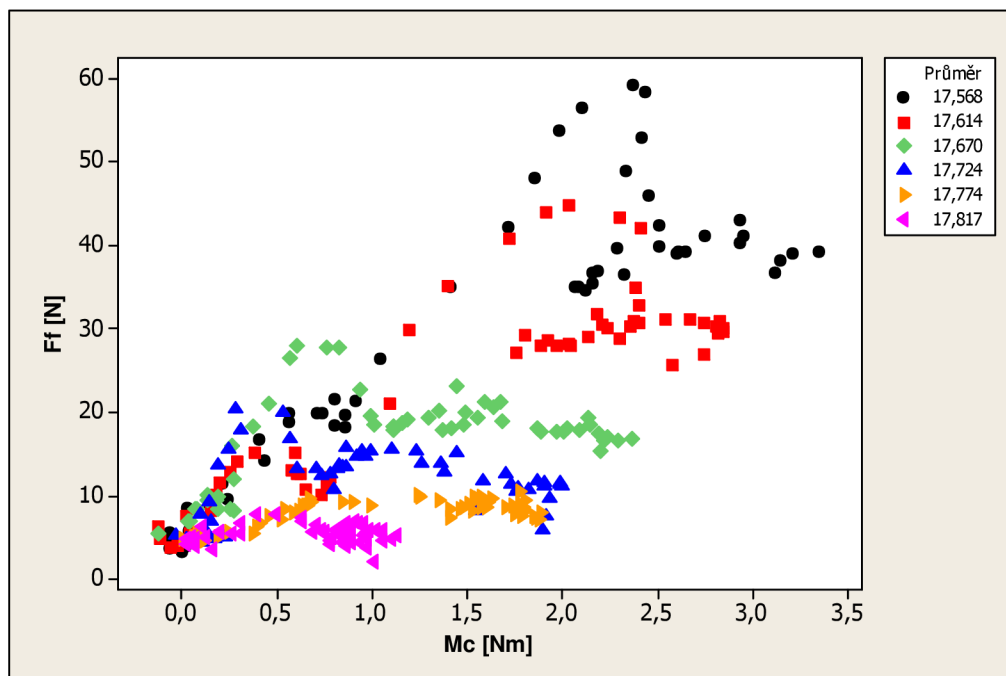
Z boxového diagramu 6.14 je patrné, že posuvová síla F_f v závislosti na velikosti odebíraného přídavku (velikosti průměru otvoru před vystružovací operací) klesá a současně klesá i variabilita.



Obr. 6.15 Boxový diagram závislosti M_c na velikosti přídavku

Z boxového diagramu 6.15 závislosti řezného momentu M_c na velikosti odebíraného přídavku je vidět klesající tendence, která však není tak markantní jako u závislosti posuvové síly.

Pomocí statistického zpracování programem minitab 15 jsme se pokusili zjistit, jestli existuje závislost mezi nárůstem posuvové síly a nárůstem řezného momentu pro vybrané reprezentanty velikosti odebíraného přídavku obr. 6.16.



Obr. 6.16 Závislost F_f na M_c pro různé velikosti přídavků.

Z grafického (obr. 6.16) zpracování se jeví, že mezi F_f a M_c existuje vzájemná závislost, pro různé velikosti odebíraných přídavků. Avšak v tomto případě se jedná o klamnou závislost, protože můžeme vidět, že hodnoty, jsou namíchané dohromady mezi sebou. Z tohoto závěru můžeme říci, že v tomto případě, je závislost mezi F_f a M_c , pro různé velikosti přídavků, statisticky nevýznamná.

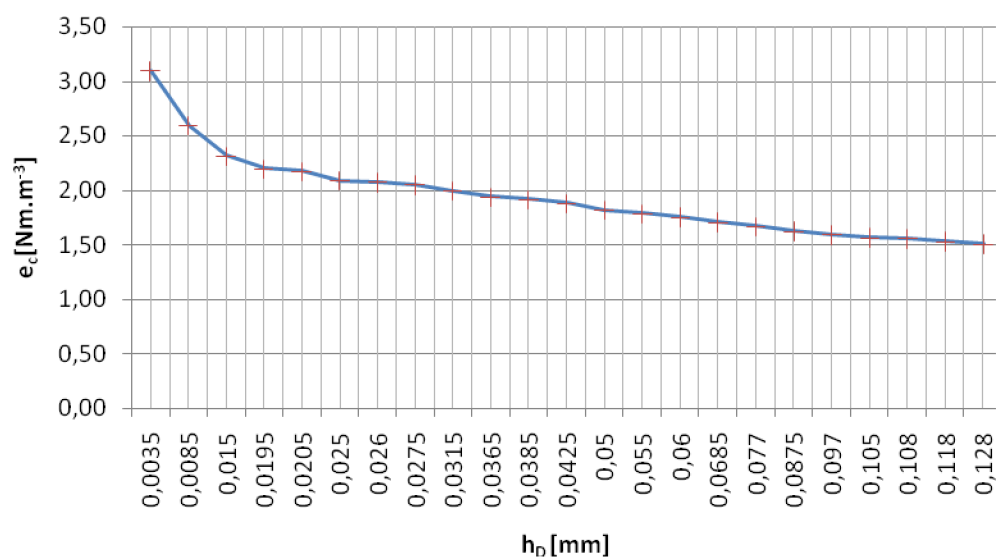
6.9 Změna velikosti měrné energie v závislosti na změně hloubky třísky.

Jak už bylo zmíněno v teoretické části této práce, měrná energie se mění s hloubkou odebíraného materiálu. Změnu měrné energie pro přídavky volené v experimentu můžeme vidět v tabulce 6.5. Hodnoty jsou znázorněny v obrázku 6.17. Pro vypracování této závislosti bylo použito vzorce č. 1.7, viz kapitola 1.

Ze zobrazení v obr. 6.17 je dobře viditelné, jak se zmenšující se velikostí odebíraného materiálu roztla velikost měrné energie.

Tab. 6.5. Změna měrné energie v závislosti na hloubce třísky.

Č. vzorku	h_D	e_c	Č. vzorku	h_D	e_c
	[mm]	[Nm.m ⁻³]		[mm]	[Nm.m ⁻³]
1.	0	0,00	13.	0,0425	1,88
2.	0,0035	3,10	14.	0,05	1,82
3.	0,0085	2,59	15.	0,055	1,79
4.	0,015	2,32	16.	0,06	1,76
5.	0,0195	2,20	17.	0,0685	1,71
6.	0,0205	2,18	18.	0,077	1,67
7.	0,025	2,09	19.	0,0875	1,63
8.	0,026	2,07	20.	0,097	1,59
9.	0,0275	2,05	21.	0,105	1,57
10.	0,0315	2,00	22.	0,108	1,56
11.	0,0365	1,94	23.	0,118	1,53
12.	0,0385	1,92	24.	0,128	1,51



Obr. 6.17 Změna měrné energie v závislosti na hloubce třísky.

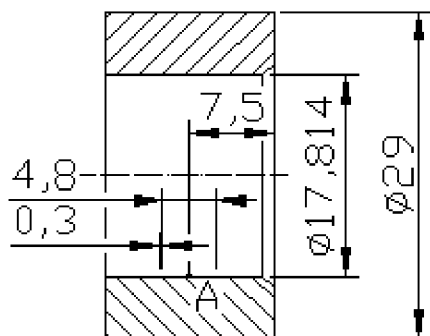
6.10 Závislosti hodnot struktury povrchu na velikosti přídavku materiálu.

Měření drsnosti povrchu, bylo prováděno pomocí Taylor-Hopson testu na měřicím přístroji Form Talysurf Intra 50. Ilustrační foto přístroje můžeme vidět v obr. 6.18. Měřicí rozsah přístroje je 50 mm, základní délka měření $l_r = 0,8$ mm, vyhodnocovaná délka $l_n = 4$ mm, byl použit Gausův filtr a délka rozběhu 0,3 mm, při rychlosti měření $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

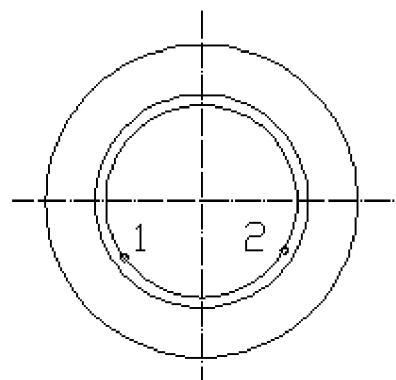


Obr. 6.18 Form Talysurf Intra 50 [28].

Měření provedeno ve střední části vzorku a ve dvou sektorech. Schematicky zakreslené oblasti, kde měření proběhlo, můžeme vidět na obrázcích 6.19 a 6.20. Naměřené výsledky byly zaznamenávány pomocí PDF souborů (v příloze č. 4) a následně z nich byla vytvořena tabulka (Tab. 6.6 a 6.7) v závislosti na velikosti odebíraného materiálu. Měřeno bylo prvních 10 vzorků od nejmenšího přídávku postupně nahoru, aby bylo zjištěno, jestli se s malou odebíranou vrstvou materiálu měnily hodnoty drsnosti povrchu. Od vzorku číslo 10 a více, se měřily kusy 13, 15, 17, 20, 22 a 24.



Obr. 6.19 Znárodnění oblasti měření A



Obr. 6.20 Sektory, ve kterých proběhlo měření.

Tab. 6.6 Závislost Ra, Rz a Rq na velikosti přídavku.

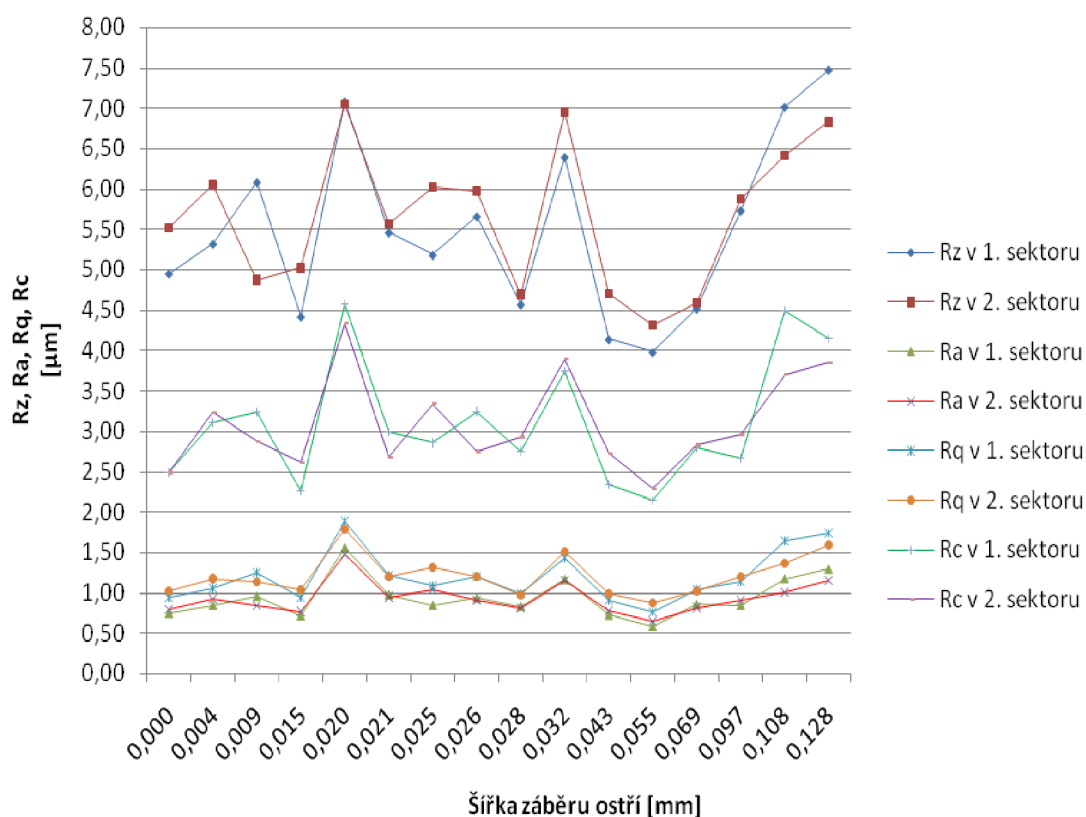
Číslo vzorku	Velikost přídavku před vystružovací operací		Hodnota Ra [μm]		Hodnota Rz [μm]		Hodnota Rq [μm]	
	Na Φ	Na úběr	1. sektor	2. sektor	1. sektor	2. sektor	1. sektor	2. sektor
1.	0	0	0,75	0,79	4,95	5,52	0,94	1,01
2.	0,007	0,0035	0,85	0,93	5,32	6,05	1,06	1,17
3.	0,017	0,0085	0,96	0,85	6,08	4,87	1,25	1,13
4.	0,03	0,015	0,72	0,77	4,42	5,02	0,94	1,03
5.	0,039	0,0195	1,56	1,48	7,08	7,05	1,89	1,78
6.	0,041	0,0205	0,98	0,95	5,46	5,57	1,22	1,19
7.	0,05	0,025	0,85	1,04	5,18	6,02	1,08	1,31
8.	0,052	0,026	0,94	0,91	5,66	5,98	1,2	1,2
9.	0,055	0,0275	0,84	0,81	4,57	4,69	0,99	0,97
10.	0,063	0,0315	1,17	1,16	6,39	6,96	1,43	1,5
13.	0,085	0,0425	0,73	0,78	4,14	4,7	0,9	0,98
15.	0,11	0,055	0,59	0,65	3,98	4,31	0,76	0,87
17.	0,137	0,0685	0,86	0,82	4,52	4,59	1,04	1,01
20.	0,194	0,097	0,85	0,91	5,73	5,87	1,13	1,19
22.	0,216	0,108	1,18	1,01	7,01	6,42	1,65	1,36
24.	0,256	0,128	1,3	1,15	7,47	6,83	1,75	1,58

Tab. 6.7 Závislost Rmr(c), RSm a Rc na velikosti přídavku.

Číslo vzorku	Velikost přídavku před vystružovací operací		Hodnota Rmr(c) [%]		Hodnota RSm [μm]		Hodnota Rc [μm]	
	Na Φ	Na úběr	1. sektor	2. sektor	1. sektor	2. sektor	1. sektor	2. sektor
1.	0	0	48,27	48,06	93,02	82	2,48	2,49
2.	0,007	0,0035	54,63	55,76	150,48	135,55	3,1	3,23
3.	0,017	0,0085	51,79	52,65	127,21	108,11	3,23	2,87
4.	0,03	0,015	58,66	55,55	111,56	123,2	2,26	2,61
5.	0,039	0,0195	60,69	58,25	166,31	142,46	4,57	4,33
6.	0,041	0,0205	55,61	52,19	113,39	91,84	2,99	2,68
7.	0,05	0,025	55,63	57,58	123,06	132,53	2,85	3,34
8.	0,052	0,026	56,3	57,67	115,84	86,96	3,24	2,75
9.	0,055	0,0275	50,28	47,91	148,42	144,11	2,75	2,93
10.	0,063	0,0315	53,65	57,49	114,29	106,96	3,74	3,89
13.	0,085	0,0425	51,07	53,33	96,93	117,65	2,33	2,73
15.	0,11	0,055	51,01	53,3	88,62	98,94	2,14	2,29
17.	0,137	0,0685	57,46	55,46	117,65	127,37	2,79	2,83
20.	0,194	0,097	57,08	56,79	99,69	96,38	2,66	2,96
22.	0,216	0,108	55,36	56,59	178,59	159,66	4,49	3,7
24.	0,256	0,128	58,69	56,64	142,04	129,25	4,15	3,85

Na hodnoty drsnosti povrchu má vliv celá řada faktorů, počínaje třískou a konče intenzitou chlazení. Naměřené hodnoty drsnosti povrchu by mohly být lepší, například při použití jiného chlazení.

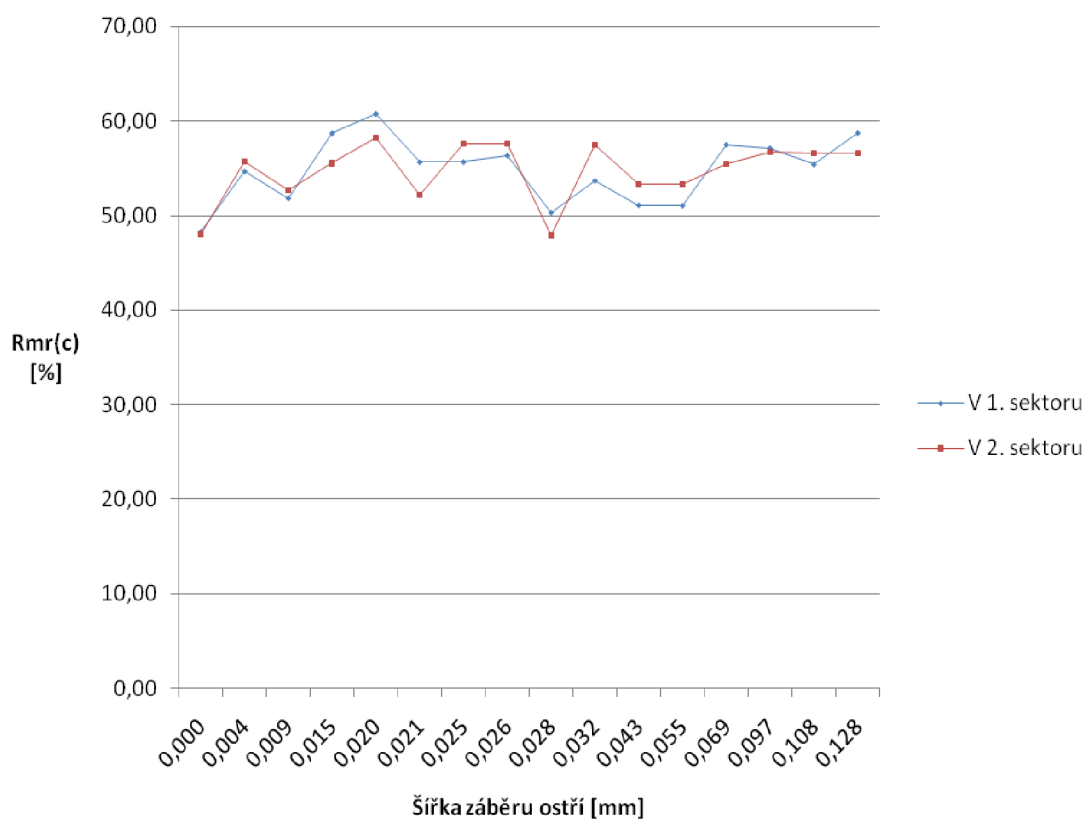
Změny vybraných parametrů drsnosti povrchu v závislosti s měnící se šířkou záběru ostří při vystružování vysoce produktivní vystružovací hlavicí MT3 jsou dobře viditelné v obrázcích 6.21 a 6.22.



Obr. 6.21 Závislost hodnot Ra, Rz, Rq a Rc na změně hloubky třísky při vystružování pomocí vystružovací hlavy MT3.

Z obr. 6.21 a tabulek 6.6 a 6.7, je patrné, že u vzorku číslo 5 a číslo 10 byly naměřeny větší hodnoty drsnosti povrchu. To může být způsobeno vznikem rýhy od třísky, která zůstala při obrábění mezi obráběným materiálem a vodítky nástroje. K dalšímu nárůstu charakteristik drsnosti docházelo od hodnot šířky záběru ostří kolem 0,1 mm. Od této hodnoty šířky záběru ostří rostly hodnoty Ra, Rz, Rq a Rc po relativně pravidelných intervalech.

Naměřené hodnoty Ra, Rz, Rq a Rc pro jednotlivé přídavky se pro oba měřené sektory pohybovaly ve stejných hodnotách a nedocházelo k velkým rozdílům v měření mezi sektorem 1 a 2. Z čehož můžeme říct, že měření bylo prováděno správně.

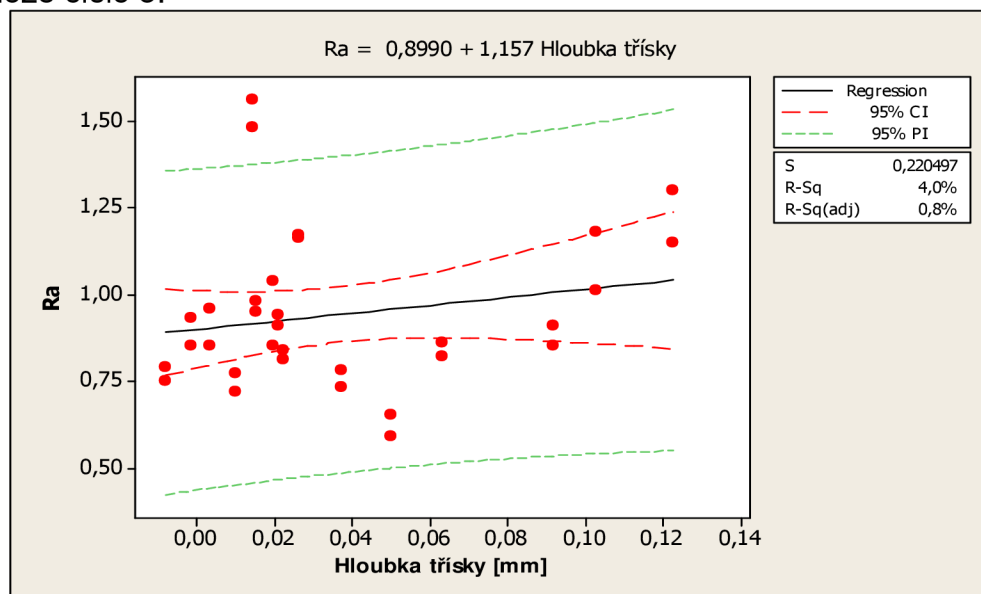


Obr. 6.22 Závislost materiálového podílu drsnosti povrchu Rmr(c) na změně hloubky třísky při vystružování pomocí vystružovací hlavice MT3.

V závislosti na velikosti odebírané třísky, se materiálový podíl Rmr(c) pohyboval, v rozmezí hodnot 50 až 60 %. Z průběhu nemůžeme říct, že by docházelo k nárůstu či poklesu vlivem velikosti přídatku.

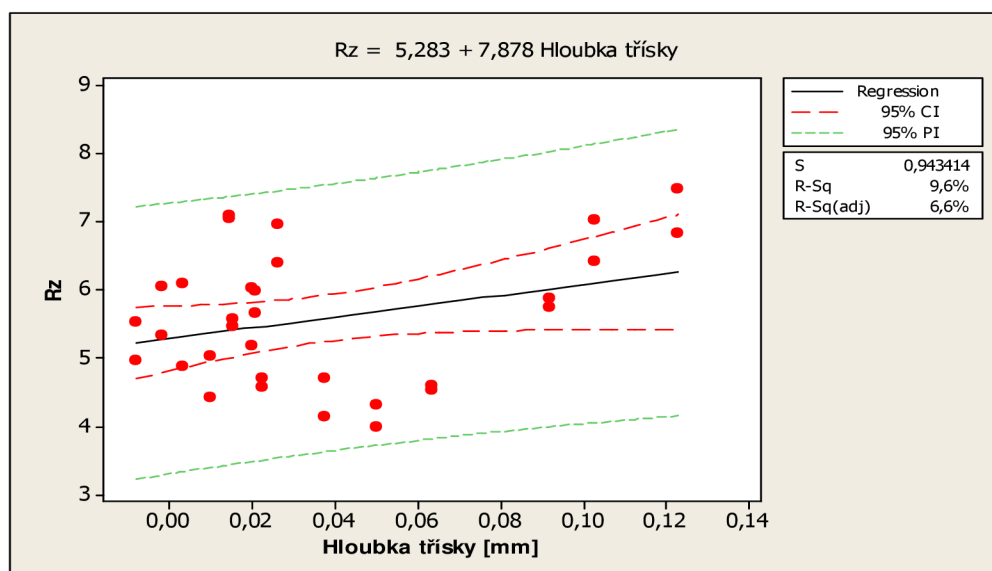
Statistické zpracování závislosti hodnot drsnosti povrchu na velikosti hloubky třísky:

Pomocí statistického programu Minitab 15, byly pomocí regresní analýzy vyhodnoceny závislosti charakteristik drsnosti povrchu na velikosti přídavku pro vystružování obr. 6.23 až 6.28. Záznam regresní analýzy z programu je uveden v příloze číslo 3.



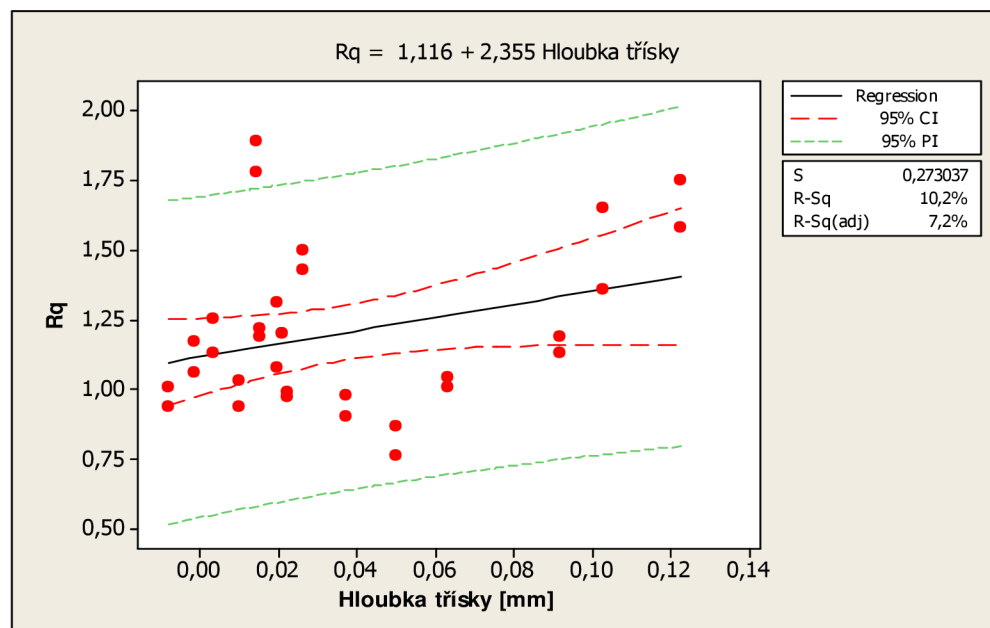
Obr. 6.23 Závislost Ra na hloubce třísky.

Z analýzy závislosti hodnoty Ra na hloubce třísky, vyšla P-hodnota 0,271. Což znamená, že model je statisticky nevýznamný. S 95% pravděpodobností můžeme říci, že hodnota Ra není závislá na velikosti přídavku pro vystružování.

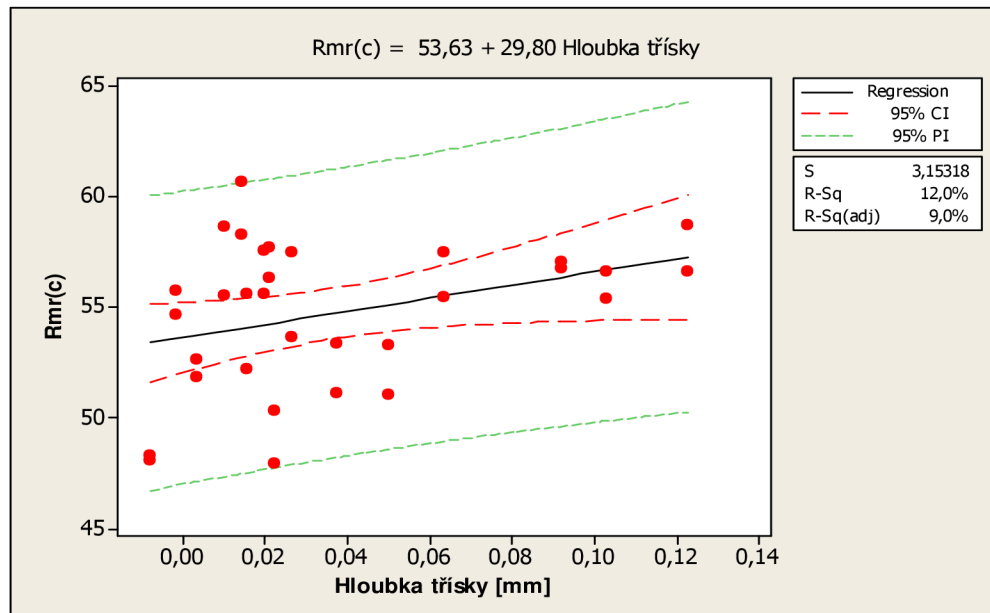


Obr. 6.24 Závislost Rz na hloubce třísky.

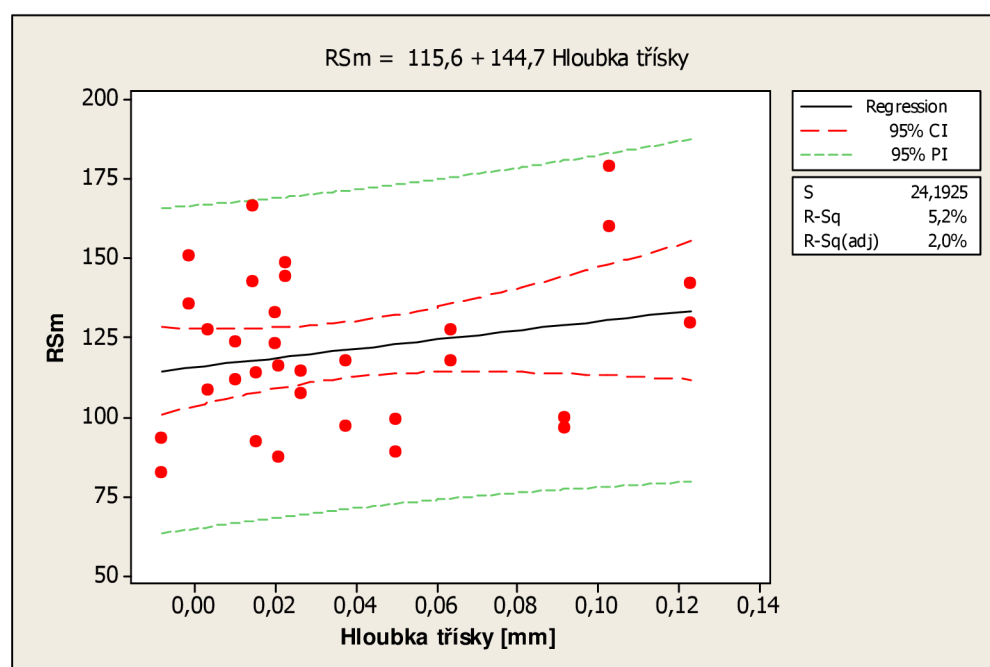
Pro tuto závislost hodnoty Rz na hloubce třísky vyšla, P-hodnota 0,084. Model je tedy statisticky nevýznamný. A s 95% pravděpodobností můžeme říci, že hodnota Rz není závislá na velikosti přídavku pro vystružování.

Obr. 6.25 Závislost R_q na hloubce třísky.

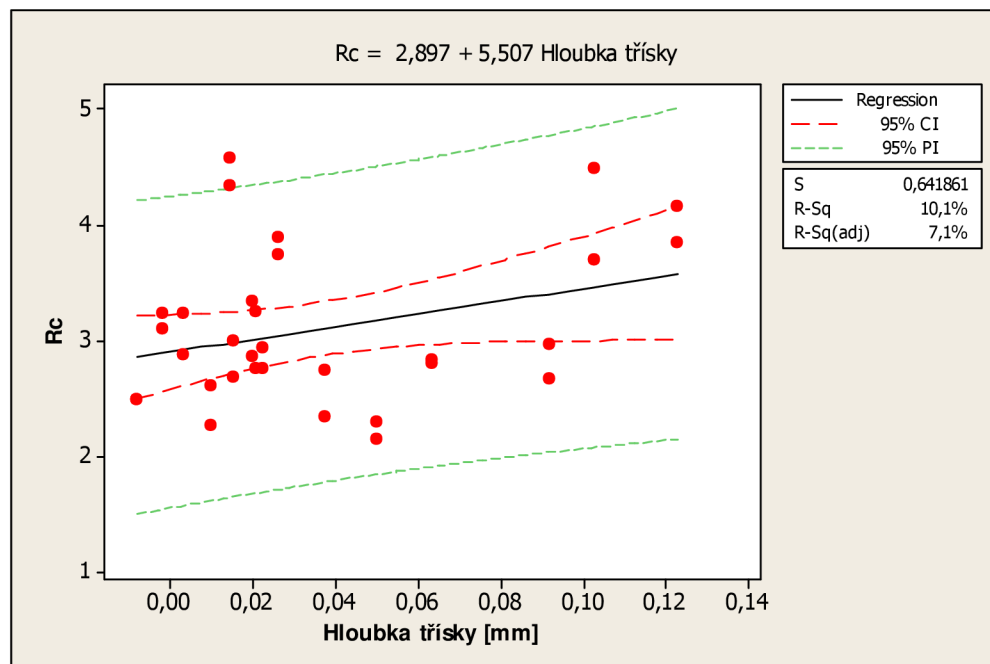
Z analýzy závislosti hodnoty R_q na hloubce třísky, vyšla P-hodnota 0,075. To znamená, že model je statisticky nevýznamný a s 95% pravděpodobností můžeme říci, že hodnota R_q není závislá na velikosti přídavku pro vystružování.

Obr. 6.26 Závislost $R_{mr}(c)$ na hloubce třísky.

Z analýzy závislosti hodnoty materiálového podílu $R_{mr}(c)$ na hloubce třísky, vyšla P-hodnota 0,052. Můžeme tedy říci, že model je statisticky nevýznamný a s 95% pravděpodobností není $R_{mr}(c)$ závislá na velikosti přídavku pro vystružování. Abychom mohli s 95% pravděpodobností říci, že je hodnota $R_{mr}(c)$ závislá na velikosti odebíraného materiálu. Musela by P-hodnota být rovna nebo menší 0,05.

Obr. 6.27 Závislost R_{Sm} na hloubce třísky.

P-hodnota pro závislost R_{Sm} na velikosti přídavku byla 0,211. Model je tedy statisticky nevýznamný a s 95% pravděpodobností můžeme konstatovat, že hodnota R_{Sm} není závislá na velikosti odebíraného materiálu.

Obr. 6.28 Závislost R_c na hloubce třísky.

P-hodnota pro tuto závislost je rovna 0,077. Model je tedy statisticky nevýznamný a touto závislostí se nemá cenu dále zabývat. S 95% pravděpodobností můžeme říci, že R_c není závislá na velikosti přídavku.

6.11 Měření kruhovitosti a válcovitosti pro různé velikosti přídavků

Měření geometrických tolerancí tvaru vystružené (kruhovitosti a válcovitosti) byly prováděny na 3D měřícím stroji LK Integra (1500 x 1000 x 800 mm), který je vybaven softwarem Camino a pravítkem Renishaw s rozlišením 0,5 μ pro přesné určení souřadnic X, Y a Z [38].

Měření bylo provedeno ve třech hladinách a to ve 3 mm, 6 mm a 12 mm od čela měřeného kusu. Byl změřen aktuální průměr vzorku a hodnoty kruhovitosti a válcovitosti. Pro měření byly vybrány 3 reprezentativní vzorky. Hodnoty přídavků jednotlivých vzorků a změřené hodnoty jsou vidět v tabulkách 6.8 a 6.9.

Tab. 6.8 Naměřené hodnoty kruhovitosti.

č. vzorku	Φ vyvrtané díry [mm]	Velikost přídavku na Φ [mm]	Šířka záběru ostří [mm]	Měření kruhovitosti					
				Ve 3 mm hloubky		V 6 mm hloubky		Ve 12 mm hloubky	
				Průměr	Kruh.	Průměr	Kruh.	Průměr	Kruh.
0.-po vyvrtávání	-	-	-	18,177	0,011	18,158	0,079	18,174	0,031
5.	17,785	0,039	0,0195	17,819	0,005	17,823	0,006	17,828	0,007
12.	17,747	0,077	0,0385	17,816	0,02	17,822	0,009	17,825	0,009
23.	17,588	0,236	0,118	17,821	0,006	17,823	0,005	17,822	0,008

Tab. 6.9 Naměřené hodnoty válcovitosti.

č. vzorku	Φ vyvrtané díry	Velikost přídavku na Φ	Šířka záběru ostří	Válcovitost
	[mm]	[mm]	[mm]	
0.-po vyvrtávání	-	-	-	0,082
5.	17,785	0,039	0,0195	0,011
12.	17,747	0,077	0,0385	0,024
23.	17,588	0,236	0,118	0,008

6.12 Pozorování změn mikrostruktury zrna v závislosti na velikosti přídavku

Vlivem procesu obrábění, dochází k působení sil na zrna obráběného materiálu a díky tomuto i k deformaci těchto zrn v již obrobeném povrchu. Pozorováním u vybraných vzorků s danými přídavky, jsme chtěli zjistit, jestli došlo k deformaci zrn oproti nedeformovaným zrnům v závislosti na velikosti odebíraného materiálu vystružovací operací. Hodnocení probíhalo pomocí mikroskopu OLYMPUS GX 71 (obr. 6.29) a kamery OLYMPUS DP 11 (obr. 6.30).



Obr. 6.29 Mikroskop OLYMPUS GX 71 [34].



Obr. 6.30 Kamera OLYMPUS DP 11 [30].

Pro měření mikrostruktury zrna byly vybrány reprezentativní vzorky. První vzorkem byl vzorek, u kterého došlo jen k vyvrtávání. Ze záznamu dynamometru bylo možné vidět, že vystružovací hlavice MT3 nebrala třísku. U ostatních vzorků už došlo k procesu řezání, což byly patrné ze záznamu dynamometru.

Jako reprezentanti k měření, byly voleny první čtyři vzorky, s prvními přídávky na vystružování. Poté jeden vzorek s přídávkem, který se používá v praxi a poslední vzorek byl kus z konce experimentu, kde měl přírůstek hodnotu téměř 0,2 mm na obráběný průměr. To je hodnota, která odpovídá vzorci (4.1) pro stanovování přírůstku pro vystružování strojními výstružníky v praxi.

Tab. 6.10 Tabulka měřených vzorků.

Číslo vzorku	Φ vyvrtané díry	Velikost přírůstku na Φ
	[mm]	[mm]
1.	17,83	0
2.	17,817	0,007
3.	17,807	0,017
4.	17,794	0,03
18.	17,67	0,154
20.	17,63	0,194



Obr. 6.31 Vzorek připravený k měření mikrostruktury.

K samotnému pozorování změn ve struktuře bylo potřeba připravené, vyleštěné vzorky (obr. 6.31) naleptat pomocí leptadla, aby se zvýraznily hranice zrn. K leptání bylo použito leptadlo Marbl (CuSO_4 , voda a kyselina chlorovodíková), které si s tímto odolným povrchem dokázalo poradit.

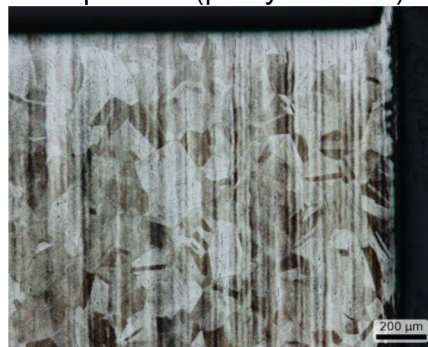
Na fotografiích viz níže, můžeme vidět sledované struktury. Vertikální pruhy, které jsou viditelné na těchto fotografiích, nebylo možné odstranit ani dalším přeleštěním povrchu. Z čehož jsme usoudili, že jsou projevem operace přípravy tyčového materiálu, ze kterého byly testované vzorky vyrobeny. Nebyly tedy způsobeny přípravou vzorků pro sledování mikrostruktury.

Fotografie vybraných vzorků z mikroskopu OLYMPUS GX 71 při zvětšení 50x:

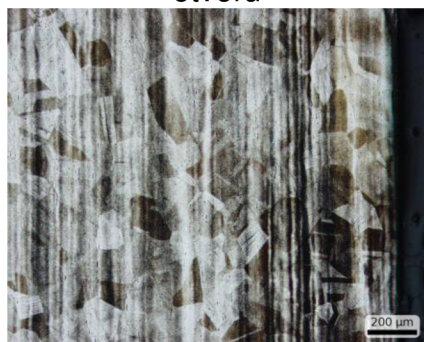
Vzorek č 1. Pro velikost přídavku 0 mm na průměr (po vyvrtávání).



Obr. 6.32 Oblast na začátku otvoru



Obr. 6.33 Oblast na konci otvoru

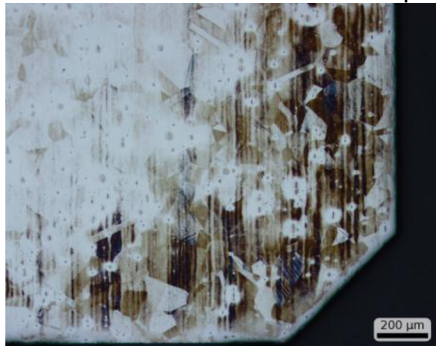


Obr. 6.34 Oblast ve středu otvoru

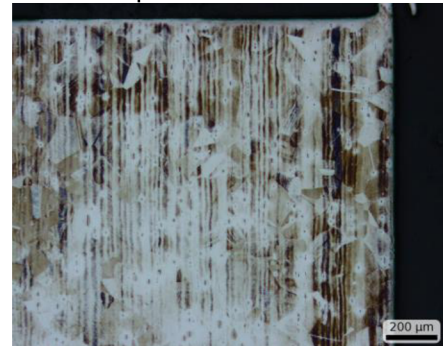


Obr. 6.35 Nedeformovaná oblast

Vzorek č 4. Pro velikost přídavku 0,03 mm na průměr.



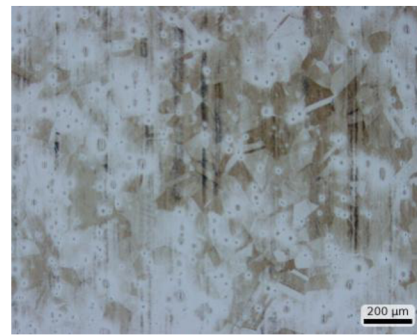
Obr. 6.36 Oblast na začátku otvoru



Obr. 6.37 Oblast na konci otvoru



Obr. 6.38 Oblast ve středu otvoru

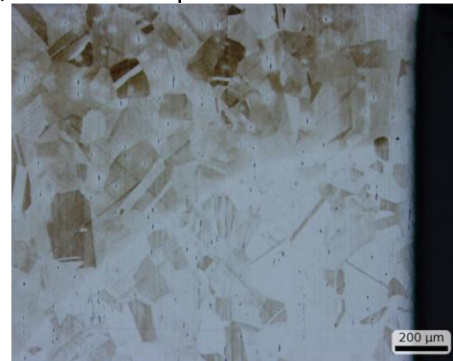


Obr. 6.39 Nedeformovaná oblast

Vzorek č 20. Pro velikost přídavku 0,194 mm na průměr.



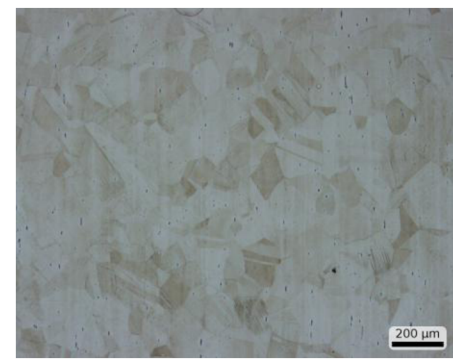
Obr. 6.40 Oblast na začátku otvoru



Obr. 6.41 Oblast na konci otvoru



Obr. 6.42 Oblast ve středu otvoru



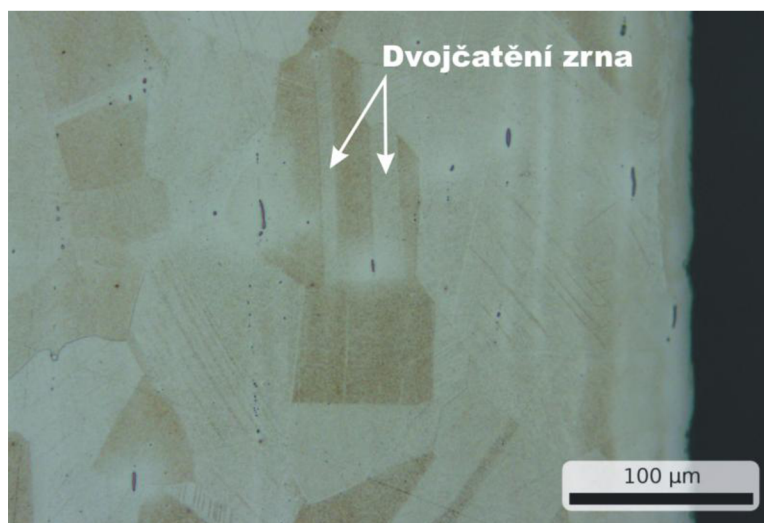
Obr. 6.43 Nedeformovaná oblast

Zhodnocení pozorování mikrostruktury po operaci vystružování:

Vzhledem ke konstrukci nástroje MT3, jsme předpokládali, že vlivem působení vodících elementů, bude docházet u větších přídavků na obrábění k napěchování prvních vrstev zrn. To se ovšem nepotvrdilo a mikrostruktura byla srovnatelná s mikrostrukturou oblasti, kde jsme předpokládali, že deformace vlivem obrábění není možná. To znamená, že při obrábění nástroj významně netvářel a docházelo k hladkému odřezávání materiálu. Příčinou je pravděpodobně vysoká odolnost a houževnatost materiálu vzorku. Ale také by mohla být malá hodnota zaoblení ostří, která se u MT3 pohybuje okolo hodnoty 5 μm . Což je hodnota, která je mnohem menší než velikosti zrn austenitu.

Dalším předpokladem bylo, že v oblasti obrábění bude vlivem deformace docházet k většímu výskytu dvojčatění zrna austenitu. Což je deformace zrna, která vzniká působením sil na zrno při obrábění. To se také nepotvrdilo. To by mohlo znamenat, že nástroj prakticky netvářel, protože nebyl zpozorován nárůst deformace dvojčatění v oblasti řezu, oproti oblasti, kde se předpokládala nedeformovaná struktura.

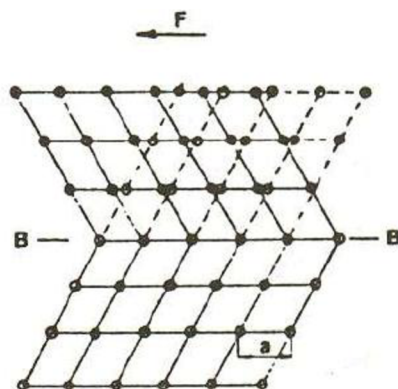
Deformace dvojčatění a austenitické korozivzdorné ocelí. Krásný příklad dvojčatění zrna, můžeme vidět na obr. 6.44.



Obr. 6.44 Dvojčatění zrna při zvětšení 200x.

Dvojčatění je projevem plastické deformace. Je to mechanismus, který probíhá za nízkých teplot a vysokých deformací. Při deformaci dvojčatění se část krystalové mřížky posune vlivem síly tak, že vytváří posunutý obraz neposunuté části mřížky [22].

Schéma deformace dvojčatěním je vidět na obr. 6.45, kde můžeme vidět, jak jsou obě části mřížky zrcadlově symetrické k rovině dvojčatění B-B. Z obr. 6.45 je zřejmé jak se atomy přemísťují pouze o zlomky mezi atomové vzdálenosti [22].



Obr. 6.45 Schéma deformace dvojčatěním [22].

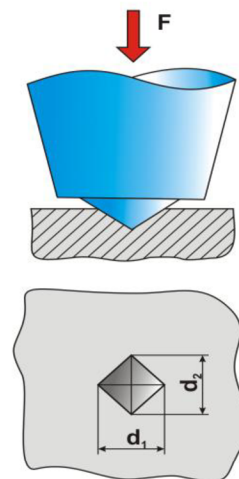
6.13 Měření tvrdosti

Měření tvrdosti vzorků bylo provedeno metodou podle Vickerse, která je založena, na vtláčování diamantového pravidelného čtyřbokého jehlanu o daném vrcholovém úhlu, do testovaného materiálu. Zkušební zatěžující síla bývá od 10 do 1000 N. Doba zatížení, je volena od 10 do 180 s. Vzdálenost od okraje a mezi vtisky by neměla být menší než hodnota rovnající se 2,5 x střední hodnota úhlopříčky. Z toho důvodu nebylo možné změřit tvrdost v oblasti těsně pod obráběným povrchem. Jako měřicí zařízení posloužil tvrdoměr ZWICK 3212 (viz obr. 6.46). Schéma měření tvrdosti je na obr. 6.47.

Měření proběhlo při zatížení 10 kilogramy. Bylo provedeno na pěti místech ve vzdálenosti 1 mm od obráběného okraje, mezi vtisky byla vzdálenost 2 mm. Změřená tvrdost materiálu byla: $HV_{10} = 218$. U ostatních měření se tvrdost pohybovala mezi hodnotami 218 až 238.



Obr. 6.46 Tvrdoměr ZWICK 3212



Obr. 6.47 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [37]

Tvrdost dle Vickerse se vyjadřuje bezrozměrně a je určena poměrem vtláčovací síly F a povrchu vtisku.

$$HV = 0,189 \cdot \left(\frac{F}{d^2} \right) \quad [36] \quad (6.1)$$

7 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Vysoce produktivní vystružovací hlavice MT3 jsou používány převážně pro sériové výroby. Jedním z hlavních důvodů, využití MT3 v podnicích vyrábějících ve velkých dávkách, je snížení nákladů na výrobu úsporou časů nutných k seřizování a výměnu nástrojů.

MT3 je nástroj, který je navržen jako tří-břítý se dvěma vodičky a jedním opěrným měřícím členem (viz obr. 5.1). Optimální rozložení zubů a vodiček po obvodu nástroje zaručuje plynulé vedení nástroje otvorem a zamezuje vibracím. To zvyšuje trvanlivost nástroje a má to i podstatný vliv na výsledek obrábění z hlediska drsnosti povrchu a geometrických tolerancí [16].

Nástroj je vyráběn jako monolitní cermetový nebo jako cermetová řezná část pájená k upínací části ze slinutého karbidu s povlaky nanášenými metodou PVD. Povlaky zlepšují jeho vlastnosti (tepelnou vodivost, odolnost proti otěru, atd.) a zvyšují tak životnost nástroje. Důsledkem toho je vyšší pořizovací cena nástroje oproti klasickým strojním výstružníkům.

Díky vysoké trvanlivosti nástroje, i při vysokých řezných podmínkách ($v_c=200 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $f=0,42 \text{ mm}\cdot\text{ot}^{-1}$), klesají náklady na výměnu, která není nutná tak často jako u nástrojů s VBD. Tím se sníží doba prostojů stroje a vytíženost pracovníka, zvýší se efektivnost výroby a sníží se počet nástrojů nutných k obrobení výrobní dávky.

Mezi další výhody MT3 patří možnost tepelného upínání do tělesa nástroje, které je snadné, rychlé, zajišťuje spolehlivé upnutí nástroje v ose soustavy bez nutnosti dalšího seřízení. Vypuštěním nutnosti seřizování nástroje po upnutí do stroje se zkracuje čas na výměnu, eliminuje se chyba vzniklá obsluhou vlivem nesprávného upnutí a klesá počet zmetků, které by se při seřizování nástroje vyrobily.

V celkovém zhodnocení mají vysoce produktivní vystružovací hlavice MT3 vyšší pořizovací náklady, které kompenzují svými vlastnostmi, mezi které patří vysoká trvanlivost i při vysokých řezných podmínkách, upínání bez nutnosti seřizování a chod bez vibrací. Z těchto výhod vyplývá značná úspora strojních časů a tedy i nákladů na obrobení otvoru.

Jako příklad bych uvedl srovnání jednobřitého výstružníku osazeného vyměnitelnou břitovou destičkou a nástroje MT3 pro obrábění děr $\Phi 15,22 \text{ mm}$ v litinách. V tabulce 6.11 je srovnání řezných podmínek a nákladů na obrobení jednoho otvoru pro tyto dva nástroje.

Tab. 6.11 Porovnání MT3 s jednobřítým vystružovacím nástrojem [16].

Nástroj	MT3	Jednobřítý výstružník
v_c [m.min ⁻¹]	60	118
f [m.min ⁻¹]	0,536	0,25
trvanlivost [ks]	232	106
Strojní čas [s]	8	17
Náklady na obrobení otvoru [Kč]	12,4	19,1

8 ZÁVĚR

Hodnocení integrity povrchu bylo v diplomové práci provedeno z hlediska charakteristik drsnosti povrchu, geometrických tolerancí kruhovitosti a válcovitosti, a změny mikrostruktury. Dále byl vliv velikosti přídávku pro vystružování hodnocen z hlediska změny posuvové síly, řezného momentu a změny měrné energie řezání e_c .

Z grafických zobrazení je dobře patrné, jak posuvová síla F_f i řezný moment M_c narůstaly s množstvím odebíraného materiálu. Ze sledovaných závislostí posuvové síly na velikosti přídávku (obr. 6.8 a 6.10) můžeme vidět, že síla do velikosti přídávku 0,154 mm na průměr otvoru narůstala rovnoměrně. Od hodnoty 0,154 mm velikost posuvové síly narůstala s větší tendencí. V obr. 6.13 je dobře viditelné, jak posuvová síla, od velikosti přídávku 0,154 mm, narůstala rychlejším trendem.

U sledovaných závislostí řezného momentu na velikosti přídávku (obr. 6.9 a 6.11) se u hodnoty 0,154 mm jeví průběh řezného momentu za nejstabilnější. Náběh řezného momentu pro hodnotu 0,154 mm je plynulý a v ustálené části, kdy je nástroj všemi zuby i vodítky v záběru, je průběh nejstabilnější, oproti ostatním přídávům. Pokud by z obr. 6.9 a 6.11 vyplývalo, že řezný moment výrazně narůstal, bylo by možné konstatovat, že se nástroj opotřeboval a díky tomu docházelo ke zvýšenému tření na vodítkách. To by znamenalo, že se zvýšila i pasivní řezná síla.

Opotřebování nástroje bylo sledováno pomocí mikroskopu po ukončení obrábění a nebylo pozorováno opotřebování řezných elementů ani vodítek.

Závislost změny měrné energie na velikosti šířky záběru ostří byla vypočítána pomocí vzorce 1.7. Obrázek 6.17 nám ukazuje, jak přibližně narůstala měrná energie vlivem zmenšování velikosti odebírané třísky.

Z obrázků 6.21 a 6.22 jsou vidět změny charakteristik drsnosti povrchu na šířce záběru ostří. Na těchto grafických znázorněních, je viditelné, jak přibližně od šířky záběru ostří 0,1 mm, plynule narůstaly hodnoty drsnosti povrchu. Díky statistickému zhodnocení však můžeme říci, že s 95% pravděpodobností nejsou hodnoty drsnosti povrchu závislé na velikosti odebírané třísky.

Z vyrobených vzorků byli vybráni 3 reprezentanti, u kterých byly změřeny geometrické tolerance kruhovitosti a válcovitosti. U těchto reprezentantů se neprokázalo, že by došlo ke změně kruhovitosti či válcovitosti v závislosti na velikosti odebíraného materiálu. Hodnoty kruhovitosti byly pro všechny měřené vzorky srovnatelné.

Další hodnocení vystružovaných vzorků bylo z hlediska změn mikrostruktury v oblasti pod obráběným povrchem. Při sledování změn mikrostruktury se vzhledem ke konstrukci nástroje předpokládalo, že vlivem působení vodících elementů, bude docházet u větších velikostí odebíraného materiálu k napěchování vrstev zrn, která jsou v oblasti řezu. To se však nepotvrdilo. Příčinou je pravděpodobně vysoká pevnost a houževnatost materiálu, který byl zvolen pro experiment.

Dále se předpokládalo, že v oblasti obrábění bude docházet k většímu výskytu dvojčatění zrna austenitu. Nárůst dvojčatění v blízké oblasti řezu, v porovnání s oblastí, kde se předpokládala nedeformovaná struktura, nebyl zpozorován. Dá se z toho předpokládat, a vyplývá to i z hodnocení velikosti řezného momentu, že nedocházelo k tváření povrchu, ale jen k řezání. Což by mohlo mít za následek vznik nárůstků na vodítkách.

Doporučení pro další testování MT3:

Z hlediska hodnocení nárůstu posuvové síly F_f a řezného momentu M_c , by bylo vhodné se zaměřit na testování a vyhodnocování průběhu silového zatížení pro šířku záběru ostří 0,077 mm. Tato hodnota se při testování jevila jako hraniční a mohlo by být zajímavé sledovat, jak se v průběhu trvanlivosti mění F_f a M_c a jaká je trvanlivost nástroje pro tuto hodnotu přídatku.

Hodnocení mikrostruktury zrna by se mohlo provést u materiálů, které jsou používané zákazníky, aby se posoudila deformace zrn při obrábění těchto materiálů.

Dále by bylo vhodné, provést měření zbytkových napětí na nově vzniklém povrchu. Jestli docházelo vlivem obrábění ke zpevňování, nebo odpevňování materiálu, po případě, v které oblasti vystružované díry jsou největší napětí.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ, s.r.o. *Příručka obrábění: Kniha pro praktiky*. Přel. Miroslav Kundera. 1. české vyd. Praha: Scientia, 1997. 857 s. ISBN 91-972299-4-6.
- [2] BUMBÁLEK, Bohumil; ODVODY, Vladimír; OŠŤÁDAL, Bohuslav. *Drsnost povrchu*. Praha: SNTL, 1989. 340 s.
- [3] BUMBÁLEK, Bohumil. *Fyzikální podstata řezání* [online]. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005 [cit. 2011-04-12], 125 s. Dostupný z www: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/fyz_pods_rez/Opora05_Fyzikalni_podstata_rezani.pdf>.
- [4] BUMBÁLEK, Bohumil.; Bumbálek, Leoš., *Rozměrový účinek a jeho význam při vysoce přesném obrábění*. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, [cit. 2011-04-12], 10 s.
- [5] BUMBÁLEK, Bohumil. *Vysoce přesné metody obrábění a jejich fyzikální podstata* [online]. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2004 [cit. 2011-03-10], 63 s. Dostupný z WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/fyz_pods_rez/Opory04.pdf>.
- [6] ČMIEL, Milan. *Vývoj nástrojů s PKD, CVD vrstvou a CVD povlakem pro dokončování děr*. Brno, 2009. 80 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [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] HLUCHÝ, Miroslav.; HANĚK, Václav. *Strojírenská technologie 2 : 2. díl: Koroze, základy obrábění, výrobní postupy*. Praha: Scienta, spol. s.r.o., 2001. 176 s. ISBN 80-7183-245-6.
- [9] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha : MM publishing, s.r.o., 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [10] HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění - 2. část* [online]. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2004 [cit. 2009-03-03], 95 s. Dostupný z WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-2cast.pdf>.
- [11] KOČMAN, Karel. *Speciální technologie obrábění*. Vysoké učení technické v Brně: Akademické nakladatelství CERM,s.r.o. Brno, 2004. 227 s. ISBN 80-214-2562-8.

- [12] KOČMAN, Karel; PROKOP, Jaroslav. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM,s.r.o., 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
- [13] KOČMAN, Karel; PROKOP, Jaroslav. *Výrobní technologie II: Obrábění*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2002. 83 s. ISBN 80-214- 2189-4.
- [14] KOUŘIL, Karel. Dokončovací operace vystružování. *Trendy* [online]. 14. června 2006, 2006, 6, [cit. 2011-02-20]. Dostupný z [www](http://www.mmspektrum.com/clanek/dokoncovaci-operace-vystruzovani): <<http://www.mmspektrum.com/clanek/dokoncovaci-operace-vystruzovani>>.
- [15] KOUŘIL, Karel; FIALA, Stanislav. Moderní nástroje pro dokončování dř. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007, 4, [cit. 2011-05-19]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-nastroje-pro-dokoncovani-der>>.
- [16] KOUŘIL, Karel; VANĚK, Vladimír. Obrábění přesných dř v litinách. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2009, 4, [cit. 2011-05-19]. Dostupný z WWW:<<http://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-presnych-der-v-litinach>>.
- [17] KRÍŽ, Antonín. *Tenké vrstvy*. [online]. [cit.2011-04-04]. Dostupné z [www](http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf):<http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf>.
- [18] MÁDL, Jan; HOLEŠOVSKÝ, František. *Integrita obrobených povrchů z hlediska funkčních vlastností*. Universita J. E. Purkyně, FVTM, Ústí nad Labem: FKK Company v.o.s., Ústí nad Labem, 2008. 230 s. ISBN 978-80-7414-095-2.
- [19] PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Vysoké učení technické v Brně: Akademické nakladatelství CERM,s.r.o. Brno, 2009. 247 s. Učební texty vysokých škol. Vysoké učení technické v Brně. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [20] 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.
- [21] GARANT. *Příručka obrábění*. Vydání katalogu. 34. Obj.č.:11 0950.
- [22] PTÁČEK, Luděk, et al. *Nauka o materiálu I*. Brno : Akademické nakladatelství CERM,s.r.o., 2002. 515 s. ISBN 80-7204-283-1.
- [23] SEDLÁČEK, Vladimír. *Povrchy a povlaky kovů*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1992. 176 s.

- [24] SHAW, MILTON C. *Metal Cutting Principles*. New York, Oxford: OXFORD UNIVERSITY PRESS, 2005.
- [25] SVOBODA, Pavel, et al. *Základy konstruování*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2008. 200 s. ISBN 978-80-7204-584-6.
- [26] TECHNOLOGIE STROJNÍHO OBRÁBĚNÍ: Výrobní technologie II. [online]. [cit.2011-04-12]. Dostupné z www: <http://www.sniper.webzdarma.cz/download/others/tech_str_obr.pdf>.
- [27] ZETEK, Miroslav.; KŘÍŽ, Antonín.; ŠKARDA, Josef. *Řezné síly při vrtání těžkoobrobitelných materiálů o vysoké pevnosti a tvrdosti*. [online]. [cit.2011-05-05]. Dostupné z www: <http://www.benjamin.ic.cz/Rezne_sily_text.pdf>.
- [28] FORM TALYSURF INTRA. [online]. [cit.2011-05-18]. Dostupné z www:<<http://www.taylor-hobson.com/shop-floor-intra.html>>.
- [29] HOMMEL CS. [online]. [cit.2011-03-06]. Dostupné z www:<http://www.hommel-etamic.cz/cz/techinfo_02.htm>.
- [30] KAMERA OLYMPUS DP 11. [online]. [cit.2011-05-18]. Dostupné z www:< <http://www.scopeshop.com/Infopage.asp?ACS24>>.
- [31] KATALOG NÁSTROJŮ PRO OBRÁBĚNÍ DĚR. [online]. [cit. 2011-03-30]. Dostupné z www: <http://www.narexcon.cz/content/file/NC_obrazeni.pdf>.
- [32] KATALOG VÝROBKŮ. HAM-FINAL, s.r.o., Česká republika 2007. [cit.2011-03-15].
- [33] KOUŘIL, Karel. *Vývoj a inovace nástrojů a technologií pro dokončování přesných děr*. Brno, 2006. 48 s. Prezentace. HAM-FINAL, s.r.o.
- [34] MIKROSKOP OLYMPUS GX 71. [online]. [cit.2011-05-18]. Dostupné z www:<http://industrial-microscope.olympus-global.com/en/ga/product/gx71_51/gx71.cfm>.
- [35] POVLAK HYPERLOX. [online]. [cit. 2011-03-17]. Dostupné z www: <http://www.cemecon.de/information/news/precision_in_gearwheel_production/index_eng.html>.
- [36] STROJ TAJMAC ZPS MCV 1210. [online]. [cit. 2011-04-05]. Dostupné z www:<http://www.tajmac-zps.cz/pdf/MCV1210_GZ.pdf>.
- [37] Zkouška tvrdosti podle Vickerse. [online]. [cit.2011-05-06]. Dostupné z www:<<http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-vickers.htm>>.
- [38] 3D LK Integra (1500 x 1000 x 800 mm). [online]. [cit.2011-05-16]. Dostupné z www:< <http://www.hanakov.cz/3d-merici-stroj.php>>.

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

A		Místo měření drsnosti otvoru, Bifurkační bod nástroje
a_p	[mm]	Šířka záběru ostří
b_D	[mm]	Hloubka třísky
CBN		Kubický nitrid boru
CNC		Computer numeric control
D	[mm]	Průměr díry
d	[mm]	Úhlopříčka vtisku
E		Emulze
e_c	[Nm.m ⁻³ .min ⁻¹]	Celková měrná energie potřebovaná na jednotku času
E_c	[Nm.min ⁻¹]	Celková energie spotřebovaná na jednotku času
e_f	[Nm.m ⁻³]	Měrná třecí energie
e_s	[Nm.m ⁻³]	Měrná smyková energie
f	[mm]	Posuv
F	[N]	Síla
F_c	[N]	Řezná síla
F_f	[N]	Posuvová síla
F_p	[N]	Pasivní síla
F_z	[N]	Posuvová síla v ose Z
h_D	[mm]	Šířka třísky
h_{Dmin}	[mm]	Minimální hloubka třísky
HSC		High speed cutting
HV		Tvrdost podle Vickerse
IT		Stupeň přesnosti
L		Vzduch
ln	[mm]	Vyhodnocovaná délka měření
lr	[mm]	Základní délka profilu
Marbl		Leptadlo
M_c	[Nm]	Řezný moment
MI(c)		Součet materiálových přímek
MT3		Vystružovací hlavice firmy HAM-FINAL
n	[ot.min ⁻¹]	Otáčky za minutu
NGV		Typ nastavitelné vyvrtávací tyče
O		Olej
p	[mm]	Přídavek
PKD		Polykrystalický diamant

PVD		Physical Vapour Deposition (Fyzikální metoda nanášení povlaku)
R	[N]	Odpor materiálu proti vnikání nástroje
Ra	[μm]	Střední aritmetická úchylka profilu
Rat	[μm]	Teoretická aritmetická střední úchylka profilu
Rc	[μm]	Střední vzdálenost výšek elementů profilu
Rmr(c)	[%]	Materiálový podíl drsnosti povrchu
Rp	[μm]	Výška největšího výstupku profilu
Rq	[μm]	Střední kvadratická hodnota
RSm	[μm]	Střední hodnota roztečí nerovností profilu
Rv	[μm]	Hloubka nejnižší rýhy profilu
Rz	[μm]	Maximální výška profilu
Rzt	[μm]	Teoretická maximální výška profilu
r_ϵ	[mm]	Poloměr zaoblení ostří
S	[mm^2]	Plocha třísky
t1		Technologická základna
v1, v2		Vodítko 1 a 2
v_c	[$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	Řezná rychlost
v_f	[$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	Posuvová rychlost
v_s	[$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	Rychlost pohybu materiálu v rovině max. smykových napětí
v_t	[$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	Rychlost odcházející třísky
z1, z2, z3		Zuby 1, 2 a 3
Zt	[μm]	Výšky elementů drsnosti profilu
γ_0	[$^\circ$]	Ortogonální úhel čela
γ_{eff}	[$^\circ$]	Úhel určující směr odchodu třísky
δ_0	[$^\circ$]	Ortogonální úhel řezu
K_r	[$^\circ$]	Úhel nastavení hlavního ostří
K_r'	[$^\circ$]	Úhel nastavení vedlejšího ostří
Λ		Součinitel přechování třísky
τ	[Mpa]	Smykové napětí
Φ	[$^\circ$]	Úhel roviny max. smykových napětí (úhel deformace)
φ	[$^\circ$]	Úhel tření

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha č. 1** **Technická data stroje Tajmac ZPS MCV 1210**
- Příloha č. 2** **Minimální, maximální a průměrné hodnoty řezného momentu M_c a posuvové síly F_z , odečtené při měření pomocí dynamometru Kistler s typovým označením 9274.**
- Příloha č. 3** **Záznam regresní analýzy z programu Minitab 15**
- Příloha č. 4** **Záznam vybraných měření drsnosti povrchu z přístroje Form Talysurf Intra 50**

Příloha č. 1.

Technická data stroje Tajmac ZPS MCV 1210

Pracovní pojezd

Osa X – křížový suport 1 000 mm

Osa Y – příčnick 800 mm

Osa Z – smykadlo 600 mm

Pracovní stůl

Pracovní plocha 1 200 × 1 000 mm

Počet T-drážek 10

Rozměr drážek – druhá drážka zprava 18H7 mm
– ostatní drážky 18H8 mm

Rozteč drážek 100 mm

Maximální zatížení 3 000 kg

Max. rozměry obrobku 1 000 × 800 × 700 mm

Vzdálenosti

Čelo vřetena od stolu 150 – 750 mm

Pracovní stůl od podlahy 750 mm

Posuvy v osách X , Y , Z

Max. pracovní posuv 20 m/min

Rychloposuv 40 m/min

Maximální zrychlení os 5 m/s²

Přesnost

Odměrovací systém v ose X, Y, Z přímý

Přesnost polohování – VDI/DGQ 3441 v ose X, Y, Z 0,008 mm

Opakovaná přesnost – VDI/DGQ 3441 v ose X, Y, Z 0,005 mm

Vřetenová jednotka

Typ Weiss Kessler Kessler

Maximální otáčky 18 000 min⁻¹ 15 000 min⁻¹ 18 000 min⁻¹

Upínací kužel HSK-A63 ISO 40 HSK-A 63

Polohování elektrické elektrické elektrické

Jmenovité otáčky 4 390 min⁻¹ 1 000 min⁻¹ 1 500 min⁻¹

Výkon S1/S4 – 60 % 30/32 kW 25/31 kW 25/31 kW

Krouticí moment S1/S4 – 60 % 80/90 Nm 159/197 Nm 159/197 Nm

Automatický zásobník nástrojů

Počet zásobníků nástrojů 1

Počet nástrojů v zásobníku 30

Čas výměny nástroje (nástroj – nástroj) 3,5 s

Maximální průměr nástroje

– při obsazených sousedních místech v zásobníku 80 mm

– při neobsazených sousedních místech v zásobníku 115 mm

Maximální délka nástroje 250 mm

Maximální hmotnost nástroje včetně držáku 6,5 kg

Pohony

Posuvové motory	– jmenovitý moment	v ose X a Y 38 Nm v ose Z 18,5 Nm
	– jmenovité otáčky	v ose X a Y 2 000 min-1 v ose Z 3 000 min-1
	– axiální síla	v ose X a Z 13 kN v ose Y 16 kN

Pneumatický agregát

Tlak vzduchu na vstupu 0,6 – 0,8 MPa

Spotřeba vzduchu přibližně 6 m³/ hod

Provozní tlak 0,55 MPa

Požadavky na elektrickou energii

Připojovací napětí 3 × 400 V/50 Hz 3 × 480 V/60 Hz

Příkon provozní 45 kVA

Proud při plném zatížení stroje 125 A

Nádrž chladicí kapaliny

Čerpadlo vnějšího chlazení nástroje 50 l/min

Čerpadlo oplachu pracovního prostoru

(volitelné vybavení) 100 l/min

Čerpadlo přečerpávání chladicí kapaliny

do filtrační stanice (volitelné vybavení) 35 l/min

Čerpadlo chlazení nástroje osou vřetena 20 l/min

s průtokovým filtrem (volitelné vybavení) – varianta A 5,5 MPa

– varianta B 2,5 MPa

Hmotnosti

Stroj (včetně zásobníku nástrojů) 11 500 kg

Dopravník třísek článkový včetně nádrže chladicí kapaliny s čerpadly

(bez kapaliny) 800 kg

Samostatný zásobník nástrojů GIFU 350 kg

Filtrační stanice (bez chladicí kapaliny) 270 kg

Doplňkové údaje

Půdorysná plocha stroje

– bez dopravníku třísek a panelu ŘS 3 140 × 2 850 mm

– s dopravníkem třísek, bez panelu ŘS 3 140 × 3 600 mm

Půdorysná plocha stroje při otevřených dveřích

(včetně panelu řídicího systému) 4 500 × 3 600 mm

Šířka otvoru v krytech při otevřených dveřích 1 300 mm

Vzdálenost mezi pevnou překážkou a základnou,

nutná pro zasunutí dopravníku třísek 3 600 mm

Nejvyšší pracovní výška stroje (včetně stavěcích klínů) 3 830 mm

Transportní rozměry stroje s demontovanou konzolou

Z (d × š × v) 3 000 × 2 200 × 3 000 mm

Řídicí systém

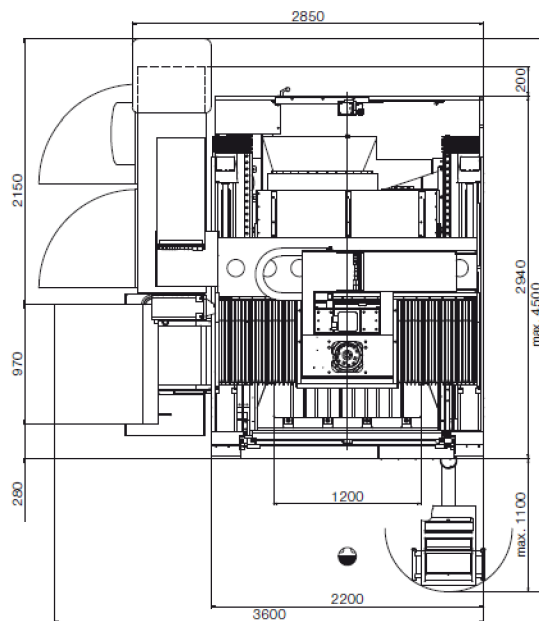
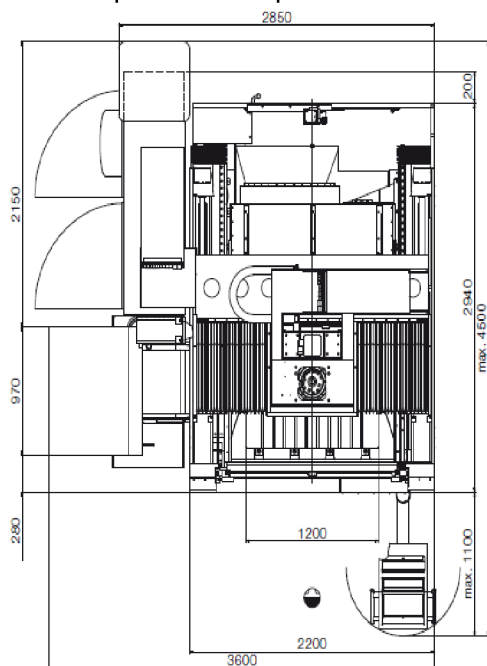
SINUMERIK 840D, HEIDENHAIN iTNC 530

STANDARDNÍ VYBAVENÍ

- Digitální pohony SIEMENS
- Přímé lineární odměřování HEIDENHAIN
- Tepelná stabilizace vřetena
- Automatické ofukování držáku nástroje
- Vnější chlazení nástroje
- Kompletně zakrytý pracovní prostor
- Dopravník třísek s integr. nádrží chlad. kapaliny
- Signalizace ukončení pracovního cyklu

VOLITELNÉ VYBAVENÍ

- Chlazení středem vřetena
- Chlazení min. množstvím maziva
- Měřicí sonda nástroje
- Měřicí sonda obrobku
- Otočný dvouosý stůl
- Rotační čistič skla
- Ruční oplachovací pistole



Příloha č. 2.

Minimální, maximální a průměrné hodnoty rezného momentu M_c a posuvové síly F_z , odečtené při měření pomocí dynamometru Kistler s typovým označením 9274.

Číslo vzorku	Φ vyvrtané díry [mm]	Velikost přídávku na Φ [mm]	Řezný moment M_z					
			Najíždění nástroje			Vyjíždění nástroje		
			Min. [Nm]	Max. [Nm]	Průměr [Nm]	Min. [Nm]	Max. [Nm]	Průměr [Nm]
1.	17,83	-0,016	-0,28	0,22	1,00E-02	-0,2	0,27	0,04
2.	17,817	-0,003	0,13	1,25	0,63	0,17	0,3	0,05
3.	17,807	0,007	0,64	1,58	1,08	-0,15	0,21	0,04
4.	17,794	0,02	0,78	1,46	1,1	-0,14	0,41	0,04
5.	17,785	0,029	1	1,83	1,39	-0,21	0,29	0,05
6.	17,783	0,031	1,15	2,09	1,58	-0,18	0,35	0,05
7.	17,774	0,04	1,36	2,62	1,96	-0,18	0,36	0,08
8.	17,772	0,042	1,18	1,96	1,52	-0,15	0,34	0,05
9.	17,769	0,045	1,3	2,52	1,87	-0,85	0,8	0,02
10.	17,761	0,053	1,29	2,41	1,86	-0,53	0,61	0,01
11.	17,751	0,063	1,22	2,88	1,96	-0,78	0,89	0,03
12.	17,747	0,067	1,47	3,21	2,17	-0,17	0,76	0,05
13.	17,739	0,075	1,32	2,73	2,19	-0,79	0,86	0,01
14.	17,724	0,09	1,25	3,13	2,38	-0,66	0,84	0,03
15.	17,714	0,1	1,9	2,98	2,44	-0,63	0,8	0,02
16.	17,704	0,11	1,8	3,04	2,36	-0,56	0,78	0,00
17.	17,687	0,127	2	2,93	2,48	-0,59	0,52	0,01
18.	17,67	0,144	1,91	3,26	2,69	-0,56	0,69	0,01
19.	17,649	0,165	2,42	3,56	2,97	-0,84	0,93	0,00
20.	17,63	0,184	2,17	3,8	3,02	-0,92	0,72	0,01
21.	17,614	0,2	2,57	3,67	3,17	-0,67	0,51	0,00
22.	17,608	0,206	2,46	3,89	3,28	-0,61	0,81	0,09
23.	17,588	0,226	2,42	4,22	3,48	-0,58	0,7	0,07
24.	17,568	0,246	2,95	4,37	3,65	-0,42	2,38	1,05

Číslo vzorku	Φ vyvrtané díry [mm]	Velikost přídavku na Φ [mm]	Posuvová síla Fz					
			Najíždění nástroje			Vyjíždění nástroje		
			Min. [N]	Max. [N]	Průměr [N]	Min. [N]	Max. [N]	Průměr [N]
1.	17,83	-0,016	2,66	7,14	4,52	1,98	6,32	4,45
2.	17,817	-0,003	2,11	7,81	4,83	1,22	6,621	4,35
3.	17,807	0,007	1,65	9,16	5,57	0,27	6,53	4,41
4.	17,794	0,02	2,44	8,61	5,87	2,01	6,59	3,93
5.	17,785	0,029	3,14	8,79	6,04	0,52	6,1	3,76
6.	17,783	0,031	2,5	13,18	7,4	0,92	0,72	3,97
7.	17,774	0,04	4,27	11,51	7,9	0,98	6,47	3,71
8.	17,772	0,042	4,82	13,81	8,05	-0,46	6,1	3,70
9.	17,769	0,045	2,62	13,64	8,69	-0,73	11,38	5,66
10.	17,761	0,053	3,27	14,01	8,97	-0,5	8,51	3,62
11.	17,751	0,063	2,87	14,01	8,28	-1,19	8,53	3,47
12.	17,747	0,067	5,89	15,93	10,91	1,19	10,96	5,49
13.	17,739	0,075	4,46	15,17	10	-2,26	8,18	3,35
14.	17,724	0,09	5,1	16,11	11	-0,76	8,73	3,90
15.	17,714	0,1	6,5	15,54	11,55	-1,65	9,09	2,22
16.	17,704	0,11	8,82	18,98	13,05	0,52	8,88	5,17
17.	17,687	0,127	10,38	20,63	15,8	-0,85	8,85	4,06
18.	17,67	0,144	11,84	25,73	17,65	-3,54	9,36	2,87
19.	17,649	0,165	17,91	37,35	26,52	-2,01	10,62	3,60
20.	17,63	0,184	19,56	42,43	27,62	-3,78	8,48	2,66
21.	17,614	0,2	23,01	41,41	31,75	-2,01	6,13	1,93
22.	17,608	0,206	23,56	43,3	32,72	-9,12	6,26	-0,02
23.	17,588	0,226	25,36	54,93	40,17	-6,01	6,04	1,19
24.	17,568	0,246	32,99	57,19	42,19	-14,92	8,3	-3,06

Příloha č. 3.

Záznam regresní analýzy z programu Minitab 15

Regression Analysis: Ra versus Hloubka třísky

The regression equation is

$$Ra = 0,8990 + 1,157 \text{ Hloubka třísky}$$

$$S = 0,220497 \quad R\text{-Sq} = 4,0\% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 0,8\%$$

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	0,06112	0,0611227	1,26	0,271
Error	30	1,45856	0,0486188		
Total	31	1,51969			

Regression Analysis: Rz versus Hloubka třísky

The regression equation is

$$Rz = 5,283 + 7,878 \text{ Hloubka třísky}$$

$$S = 0,943414 \quad R\text{-Sq} = 9,6\% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 6,6\%$$

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	2,8351	2,83511	3,19	0,084
Error	30	26,7009	0,89003		
Total	31	29,5360			

Regression Analysis: Rq versus Hloubka třísky

The regression equation is

$$Rq = 1,116 + 2,355 \text{ Hloubka třísky}$$

$$S = 0,273037 \quad R\text{-Sq} = 10,2\% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 7,2\%$$

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	0,25325	0,253246	3,40	0,075
Error	30	2,23648	0,074549		
Total	31	2,48972			

Regression Analysis: Rmr(c) versus Hloubka třísky

The regression equation is

$$Rmr(c) = 53,63 + 29,80 \text{ Hloubka třísky}$$

$$S = 3,15318 \quad R\text{-Sq} = 12,0\% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 9,0\%$$

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	40,556	40,5565	4,08	0,052
Error	30	298,277	9,9426		
Total	31	338,834			

Regression Analysis: RSm versus Hloubka třísky

The regression equation is

$$RSm = 115,6 + 144,7 \text{ Hloubka třísky}$$

$$S = 24,1925 \quad R\text{-Sq} = 5,2\% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 2,0\%$$

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	957,0	956,965	1,64	0,211
Error	30	17558,3	585,277		
Total	31	18515,3			

Regression Analysis: Rc versus Hloubka třísky

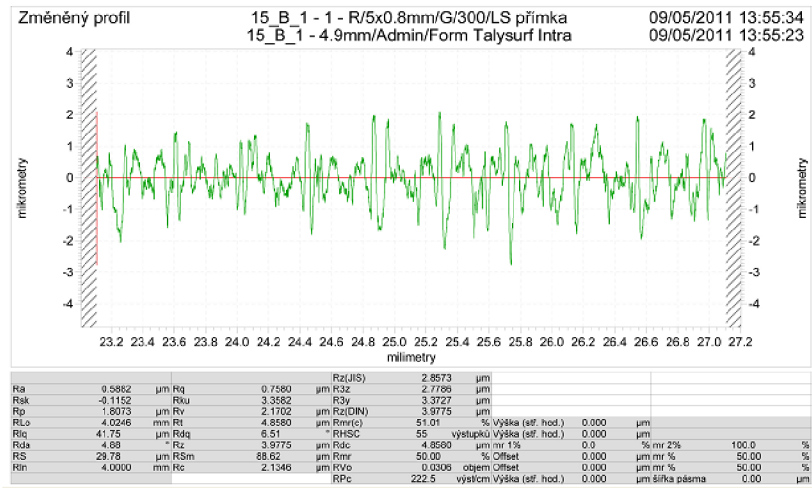
The regression equation is

$$Rc = 2,897 + 5,507 \text{ Hloubka třísky}$$

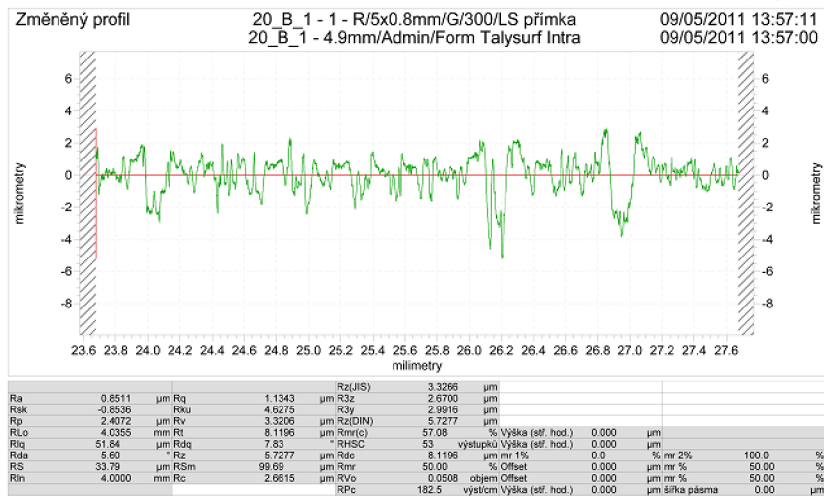
$$S = 0,641861 \quad R\text{-Sq} = 10,1\% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 7,1\%$$

Analysis of Variance

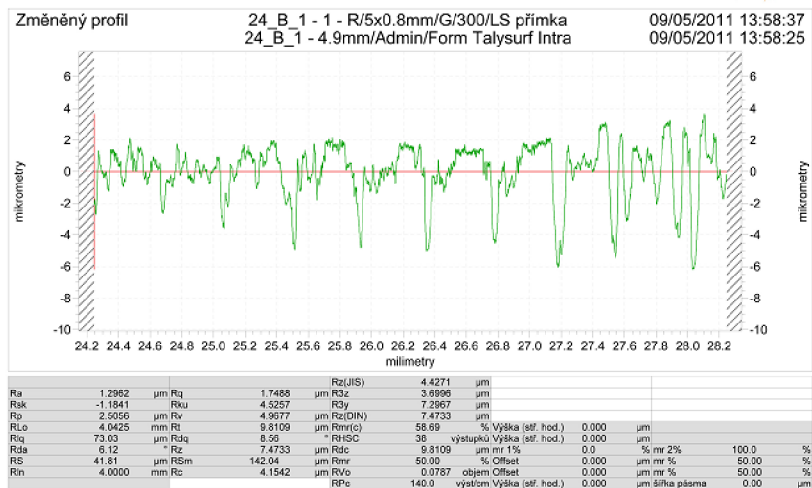
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	1,3856	1,38564	3,36	0,077
Error	30	12,3596	0,41199		
Total	31	13,7452			



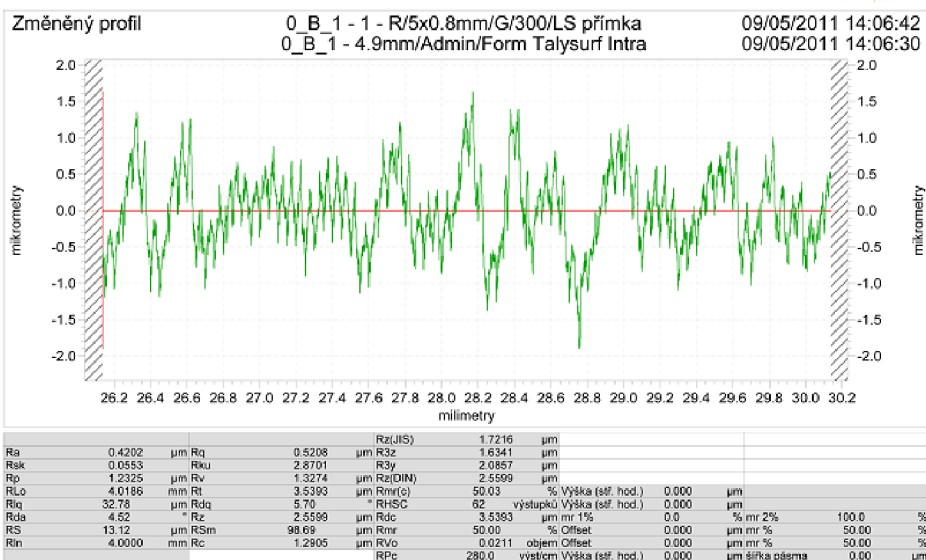
Záznam měření vzorku č. 15, místě B v sektoru 1



Záznam měření vzorku č. 20, místě B v sektoru 1



Záznam měření vzorku č. 24, místě B v sektoru 1



Záznam měření vzorku po vystružování, místě B v sektoru 1