

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2303T004 Strojírenská technologie – technologie obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vliv tlaku procesní kapaliny a přídavku na rozměrové a kvalitativní parametry vystružené díry ve vazbě na opotřebení nástroje

Autor: **Bc. Jana ČIPEROVÁ**

Vedoucí práce: **Ing. Jaroslava FULEMOVÁ, Ph.D.**

Akademický rok 2017/2018

ZADÁNÍ

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Ráda bych poděkovala všem, kteří mi byli nápomocni při vypracování mé diplomové práce. V první řadě bych ráda poděkovala vedoucí mé diplomové práce Ing. Jaroslavě Fulemové, PhD. za poskytnuté rady a odborné vedení při řešení diplomové práce, za pomoc při organizování experimentu a za poskytnutý čas při konzultacích. Také bych chtěla poděkovat Doc. Ing. Janu Řehořovi, Ph.D. za cenné rady při zpracování diplomové práce. Dále mé poděkování patří všem pracovníkům Západočeské univerzity, kteří mi byli nápomocni při realizování a vyhodnocení experimentu.

Velké poděkování patří především mé rodině, která mě po celou dobu studia plně podporovala.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

| | | | |
|----------------------|---|---------------------------|---------------------------------|
| AUTOR | Příjmení Čiperová | Jméno Jana | |
| STUDIJNÍ OBOR | 2303T004 „Strojírenská technologie – technologie obrábění“ | | |
| VEDOUCÍ PRÁCE | Příjmení (včetně titulů) Ing. Fulemová, Ph.D. | Jméno Jaroslava | |
| PRACOVIŠTĚ | ZČU - FST - KTO | | |
| DRUH PRÁCE | DIPLOMOVÁ | BAKALÁŘSKÁ | Nehodící se škrtněte |
| NÁZEV PRÁCE | Vliv tlaku procesní kapaliny a přídavku na rozměrové a kvalitativní parametry vystružené díry ve vazbě na opotřebení nástroje | | |

| | | | | | |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|
| FAKULTA | strojní | KATEDRA | KTO | ROK ODEVZD. | 2018 |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

| | | | | | |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|----|
| CELKEM | 91 | TEXTOVÁ ČÁST | 63 | GRAFICKÁ ČÁST | 28 |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|----|

| | |
|---|---|
| <p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p> | <p>Tato diplomová práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části je popis technologie vystružování, rozdělení vystružovacích nástrojů a je zde zmapován současný stav. V praktické části je navržen experiment zkoumající vliv tlaku procesní kapaliny a přídavku na kvalitu vystružené díry a na opotřebení nástroje.</p> |
| <p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p> | <p style="text-align: center;">vystružování, cermet, tlak procesní kapaliny, přídavek na obrábění, opotřebení nástroje, kvalita povrchu, válcovitost</p> |

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

| | | | |
|--------------------------|---|-------------------|-----------------------------------|
| AUTHOR | Surname Čiperová | Name Jana | |
| FIELD OF STUDY | 2303T004 “ Manufacturing processes – Technology of metal cutting“ | | |
| SUPERVISOR | Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Fulemová, Ph.D. | Name Jaroslava | |
| INSTITUTION | ZČU - FST - KTO | | |
| TYPE OF WORK | DIPLOMA | BACHELOR | Delete when not applicable |
| TITLE OF THE WORK | Influence of cooling liquid pressure and machining allowance on dimension and quality of reamed hole in relation to tool wear | | |

| | | | | | |
|----------------|------------------------|-------------------|--------------------|---------------------|------|
| FACULTY | Mechanical Engineering | DEPARTMENT | Cutting technology | SUBMITTED IN | 2018 |
|----------------|------------------------|-------------------|--------------------|---------------------|------|

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

| | | | | | |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|----|
| TOTALLY | 91 | TEXT PART | 63 | GRAPHICAL PART | 28 |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|----|

| | |
|---|---|
| BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS | <p>This diploma thesis is divided into the theoretical and practical part. In the theoretical part is a description of the technology of reaming, distribution of reaming tools and the current state of the art. In the practical part is designed an experiment examining the influence of process fluid pressure and the addition on the quality of the rebated hole and the wear of the tool.</p> |
| KEY WORDS | <p>reaming, cermet, cutting fluid pressure, allowance for machining, tool wear, surface integrity, cylindricity</p> |

Obsah

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Úvod do problematiky výroby děr vystružováním, cíle řešení..... | 13 |
| 1.1 | Cíle řešení | 13 |
| 1.2 | Výstružníky | 13 |
| 1.2.1 | Rozdělení výstružníků..... | 14 |
| 1.2.2 | Konstrukce výstružníků..... | 16 |
| 2 | Rešerše zaměřená na vliv tlaku procesní kapaliny a přídavku na rozměrové a kvalitativní parametry vystružené díry | 19 |
| 2.1 | Práce na ZČU..... | 19 |
| 2.1.1 | Martin Neprášek - Technologie výroby vysoce přesných otvorů vystružováním - 2012/2013..... | 19 |
| 2.1.2 | Luboš Kroft - Produktivní vystružování moderními výstružníky I - 2013/2014..... | 21 |
| 2.1.3 | Martin Šmejkal - Produktivní vystružování moderními výstružníky II - 2013/2014..... | 22 |
| | Jarmila Halaburdová – Zefektivnění vystružování díry 8D v IT H6 - 2014/2015 | 22 |
| 2.1.4 | David Petřů - Produktivní vystružování ve firmě GTW BEARINGS s.r.o. - 2014/2015..... | 24 |
| 2.1.5 | Jan Roub - Vliv vybraných technologických faktorů obrábění na integritu povrchu přesných děr - řezné podmínky při vystružování – 2016/2017..... | 25 |
| 2.2 | Práce mimo ZČU | 26 |
| 2.2.1 | Aleš Lučaník – Aplikace vystružovacích nástrojů s břity z cermetu a PVD povlakem – 2010/2011 | 26 |
| 2.2.2 | De Chiffre, Leonardo; Tosello, Guido; Piska, Miroslav; Müller, Pavel - Investigation on Capability of Reaming Process using Minimal Quantity Lubrication - 2008 | 27 |
| 2.2.3 | P. Müller, G. Genta, G. Barbato, L. De Chiffre, R. Levi - Reaming process improvement and control: an application of statistical engineering - 2012 | 28 |
| 2.2.4 | Miroslav Pecháček - Vliv řezných kapalin na výsledky obrábění – 2008/2009..... | 30 |
| 2.2.5 | Martin Hort - Technologické, ekonomické a ekologické aspekty obrábění s vysoce výkonným chlazením – 2008/2009 | 30 |
| 3 | Analýza a zhodnocení rešeršních poznatků | 31 |
| 4 | Návrh a realizace experimentálního studia, vyhodnocení naměřených výsledků | 34 |
| 4.1 | Obráběcí stroj | 35 |
| 4.2 | Vystružovací nástroj..... | 35 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.3 | Obrobek | 36 |
| 4.4 | Průběh experimentu | 36 |
| 4.5 | Použité nástroje..... | 37 |
| 4.5.1 | Vrtací nástroj | 37 |
| 4.5.2 | Vyvrtávací nástroj | 37 |
| 4.5.3 | Nástroj na sražení hran | 37 |
| 4.5.4 | Vystružovací nástroj..... | 38 |
| 4.6 | Technologický postup..... | 38 |
| 4.7 | Měření opotřebení břitů | 40 |
| 4.8 | Měření vzorků..... | 40 |
| 4.9 | Vyhodnocení experimentu..... | 42 |
| 4.9.1 | Opotřebení řezného břitu..... | 43 |
| 4.9.2 | Drsnost Rz | 49 |
| 4.9.3 | Skutečný průměr díry na vstupu a výstupu | 52 |
| 4.9.4 | Válcovitost | 56 |
| 5 | Technicko-ekonomické zhodnocení | 59 |
| 6 | Závěr | 60 |
| 7 | Použitá literatura | 62 |
| | PŘÍLOHY K DIPLOMOVÉ PRÁCI | I |

Seznam použitých zkratk a symbolů

| | |
|-----|-----------------------------------|
| CBN | Kubický nitrid boru |
| PKD | Polykrystalický diamant |
| VRV | Vysokorychlostní výstružník |
| VBD | Výměnná břitová destička |
| IT | Stupeň přesnosti |
| RTI | Regionální technologický institut |
| KTO | Katedra technologie obrábění |
| SK | Slinutý karbid |

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tabulka 1. Rozdělení výstružníků..... | 14 |
| Tabulka 2. Počet břitů podle průměru nástroje | 15 |
| Tabulka 3. Přehled použitých nástrojů | 21 |
| Tabulka 4. Technologické varianty | 24 |
| Tabulka 5. Technologie výroby | 26 |
| Tabulka 6. Porovnání trvanlivostí a životnosti nástrojů..... | 27 |
| Tabulka 7. Plán experimentu..... | 27 |
| Tabulka 8. Plán experimentu..... | 29 |
| Tabulka 9. Přehled hodnocených parametrů | 32 |
| Tabulka 10. Přehled měněných faktorů..... | 33 |
| Tabulka 11. Podmínky první části experimentu..... | 34 |
| Tabulka 12. Chemické složení oceli 42CrMo4..... | 36 |
| Tabulka 13. Vrtací nástroj..... | 37 |
| Tabulka 14. Vyvrtávací nástroj | 37 |
| Tabulka 15. Srážecí hran | 37 |
| Tabulka 16. Vystružovací nástroj..... | 38 |
| Tabulka 17. Technologický postup | 38 |
| Tabulka 18. Plán experimentu..... | 39 |
| Tabulka 19. Kódované proměnné | 42 |
| Tabulka 20. Výsledné hodnoty po 240 a po 480 dírách..... | 59 |
| Tabulka 21. Výsledné hodnoty experimentu..... | 61 |

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obrázek 1. Hlavní pohyby při vystružování | 13 |
| Obrázek 2. a) ruční výstružník, b) strojní výstružník..... | 15 |
| Obrázek 3. Stavitelný výstružník - ruční a strojní..... | 16 |
| Obrázek 4. Rozpínací výstružník | 16 |
| Obrázek 5. Části výstružníku | 17 |
| Obrázek 6. a) výstružník s přímými zuby, b) se zuby ve šroubovici – levá, pravá..... | 17 |
| Obrázek 7. Geometrie výstružníku..... | 18 |
| Obrázek 8. Opotřebení na čele nástroje | 19 |
| Obrázek 9. Opotřebení na hřbetě nástroje..... | 20 |
| Obrázek 10. Závislost průměru na počtu vystružených děr – zkušební vzorek č. 1 | 20 |
| Obrázek 11. Závislost průměru na počtu vystružených děr – zkušební vzorek č. 4 | 20 |
| Obrázek 12. Opotřebení břitu na čele nástroje..... | 22 |
| Obrázek 13. Vliv řezné rychlosti na drsnost Ra..... | 22 |
| Obrázek 14. Nástrojový systém HAM-FINAL RC..... | 23 |
| Obrázek 15. Závislost Fz na posuvu | 25 |
| Obrázek 16. Zhodnocení průměru díry | 27 |
| Obrázek 17. Zhodnocení válcovitosti díry | 28 |
| Obrázek 18. Zhodnocení kruhovitosti díry | 27 |
| Obrázek 19. Zhodnocení drsnosti povrchu | 28 |
| Obrázek 20. Vyhodnocení drsnosti vystružené díry | 29 |
| Obrázek 21. Vyhodnocení průměru vystružené díry | 30 |
| Obrázek 22. Opotřebení břitu při a) nízkotlakém chlazení, b) vysokotlakém chlazení..... | 31 |
| Obrázek 23. CTX beta 1250 TC 4A..... | 35 |
| Obrázek 24. Vysokorychlostní výstružník od firmy FINAL Tools s.r.o | 35 |
| Obrázek 25. Upnutí polotovaru | 36 |
| Obrázek 26. Rozložení děr | 39 |
| Obrázek 27. Dílenský mikroskop BLICKLE..... | 40 |
| Obrázek 28. Drsnoměr Hommel Etamic T8000..... | 40 |
| Obrázek 29. Vzduchový měřicí přístroj Millimar S1840..... | 41 |
| Obrázek 30. CMM Carl Zeiss Prismo 7 Navigator | 41 |
| Obrázek 31. Opotřebení břitu – nástroj 1..... | 42 |
| Obrázek 32. Opotřebení břitu – nástroj 2..... | 43 |
| Obrázek 33. Opotřebení břitu – nástroj 3..... | 43 |
| Obrázek 34. Opotřebení břitu – nástroj 4..... | 43 |
| Obrázek 35. Opotřebení hlavního hřbetu nástroje č. 1..... | 44 |
| Obrázek 36. Opotřebení hlavního hřbetu nástroje č. 2..... | 44 |
| Obrázek 37. Opotřebení hlavního hřbetu nástroje č. 3..... | 44 |
| Obrázek 38. Opotřebení hlavního hřbetu nástroje č. 4..... | 44 |
| Obrázek 39. Opotřebení hlavního hřbetu nástroje č. 5..... | 45 |
| Obrázek 40. Efekt faktoru velikosti předvrtané díry na opotřebení nástroje..... | 44 |
| Obrázek 41. Efekt faktoru tlaku na opotřebení nástroje..... | 45 |
| Obrázek 42. Drsnost Ra děr vystružených nástrojem č. 1 | 46 |
| Obrázek 43. Drsnost Ra děr vystružených nástrojem č. 2 | 46 |
| Obrázek 44. Drsnost Ra děr vystružených nástrojem č. 3 | 47 |

| | |
|--|----|
| Obrázek 45. Drsnost Ra děr vystružených nástrojem č. 4 | 47 |
| Obrázek 46. Drsnost Ra děr vystružených nástrojem č. 5 | 48 |
| Obrázek 47. Efekt faktoru velikosti předvrtané díry na drsnost Ra..... | 47 |
| Obrázek 48. Efekt faktoru tlaku na drsnost Ra..... | 48 |
| Obrázek 49. Drsnost Rz děr vystružených nástrojem č. 1 | 49 |
| Obrázek 50. Drsnost Rz děr vystružených nástrojem č. 2 | 49 |
| Obrázek 51. Drsnost Rz děr vystružených nástrojem č. 3 | 50 |
| Obrázek 52. Drsnost Rz děr vystružených nástrojem č. 4 | 50 |
| Obrázek 53. Drsnost Rz děr vystružených nástrojem č. 5 | 51 |
| Obrázek 54. Efekt faktoru velikosti předvrtané díry na drsnost Rz..... | 50 |
| Obrázek 55. Efekt faktoru tlaku na drsnost Rz na drsnost Rz..... | 51 |
| Obrázek 56. Hodnoty skutečného průměru díry na vstupu a výstupu – nástroj č. 1 | 52 |
| Obrázek 57. Hodnoty skutečného průměru díry na vstupu a výstupu – nástroj č. 2..... | 52 |
| Obrázek 58. Hodnoty skutečného průměru díry na vstupu a výstupu – nástroj č. 3..... | 53 |
| Obrázek 59. Hodnoty skutečného průměru díry na vstupu a výstupu – nástroj č. 4..... | 53 |
| Obrázek 60. Hodnoty skutečného průměru díry na vstupu a výstupu – nástroj č. 5..... | 54 |
| Obrázek 61. Efekt faktoru velikosti předvrtané díry na průměr díry na vstupu..... | 54 |
| Obrázek 62. Efekt faktoru tlaku na průměr na průměr díry na vstupu..... | 55 |
| Obrázek 63. Efekt faktoru velikosti předvrtané díry na průměr díry na výstupu..... | 54 |
| Obrázek 64. Efekt faktoru tlaku na průměr díry na průměr díry na výstupu..... | 55 |
| Obrázek 65. Válcovitost díry – nástroj č. 1 | 56 |
| Obrázek 66. Válcovitost díry – nástroj č. 2..... | 56 |
| Obrázek 67. Válcovitost díry – nástroj č. 3..... | 57 |
| Obrázek 68. Válcovitost díry – nástroj č. 4..... | 57 |
| Obrázek 69. Válcovitost díry – nástroj č. 5..... | 58 |
| Obrázek 70. Efekt faktoru velikosti předvrtané díry na válcovitost | 57 |
| Obrázek 71. Efekt faktoru velikosti předvrtané díry na válcovitost | 58 |

1 Úvod do problematiky výroby děr vystružováním, cíle řešení

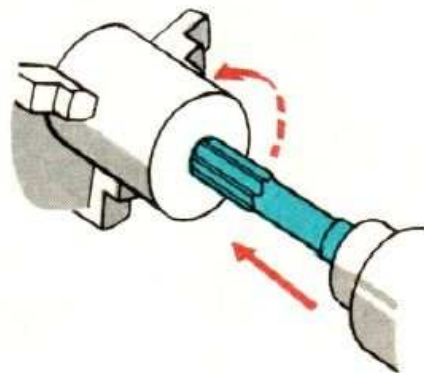
Vystružování je dokončovací operace při výrobě válcových, kuželových nebo tvarových otvorů. Touto technologií lze dosáhnout požadované kvality povrchu a rozměrové i tvarové přesnosti. Bývá dosaženo tolerančního stupně IT5 až IT7 a drsnosti až $Ra\ 0,4\ \mu\text{m}$. Pokud je požadována lepší drsnost, může být za technologii vystružování zařazena ještě další dokončovací operace. Například lapování, válečkování apod. Před vystružováním bývá většinou zařazeno vrtání a vyvrtávání. Tyto operace výrazně ovlivňují přesnost vystružené díry, a proto je třeba klást důraz i na tyto operace.

1.1 Cíle řešení

Hlavním cílem této diplomové práce je metodou plánovaných experimentů stanovit vliv tlaku procesní kapaliny a přísadky na rozměrové a kvalitativní parametry vystružené díry, a to ve vazbě na opotřebení nástroje.

1.2 Výstružníky

Výstružník je jedno nebo vícebřítý nástroj sloužící k výrobě velmi přesných děr. Jedná se o výrobu válcových, kuželových ale i tvarových otvorů. Tento nástroj bývá vyroben z rychlořezné oceli a slinutého karbidu. U některých nástrojů bývají na břity nástroje využity jiné vysoce tvrdé materiály jako je CBN, cermet nebo PKD. Odebírání přísadky probíhá rotací kolem osy nástroje a posuvem nástroje ve směru osy směrem k obráběnému materiálu (obr. 1). Výstružníky se vyrábějí v mnoha konstrukčních provedeních.



Obrázek 1. Hlavní pohyby při vystružování [1]

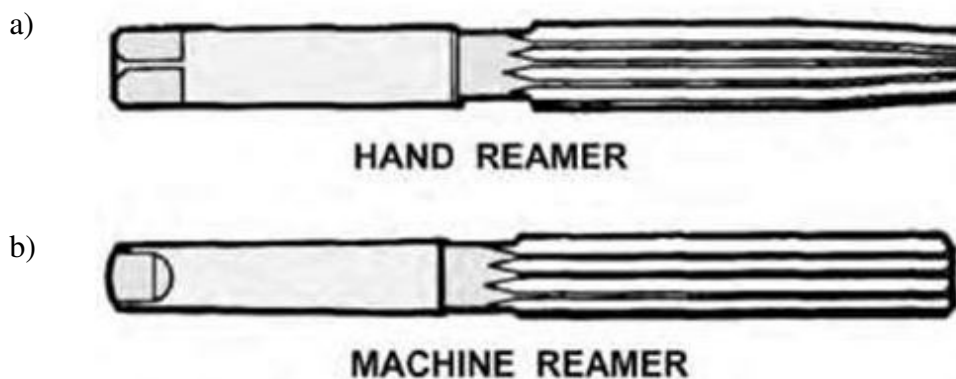
1.2.1 Rozdělení výstružníků

Výstružníky lze rozdělit například dle použití, tzn. dle stupně mechanizace. Další dělení vychází z konstrukce nástroje, tvaru obráběné plochy nebo ze způsobu upnutí nástroje. V následující tabulce je uvedeno základní dělení.

| | |
|----------------------------|---|
| Podle mechanizace | Ruční Strojní |
| Podle tvaru | Válcové Kuželové |
| Podle konstrukce | Monolitní Nástrčné |
| Podle břitů | Pevné Stavitelné |
| Podle typu chlazení | Bez chlazení Středem nástroje Zubovou mezerou |
| Podle typu upnutí | Kleština Tepelně Hydro |
| Podle tvaru stopky | Válcová stopka Kuželová stopka |

Tabulka 1. Rozdělení výstružníků [2]

Dle použití dělíme výstružníky na dvě základní skupiny. Ruční a strojní (obr. 2). Ruční vystružovací nástroje jsou oproti strojním poměrně dlouhé. Řezná část má tvar kužele, který pozvolna přechází ve válcový tvar, který již jen vede nástroj a uhlazuje otvor. Čelní hrana je sražena z důvodu lehčího zavádění nástroje do díry a na konci stopky je čtyřhran pro vratidlo. Řezná část strojních výstružníků je výrazně kratší. Za řezným kuželem je válcová část, která vede nástroj a kalibruje díru. [2]



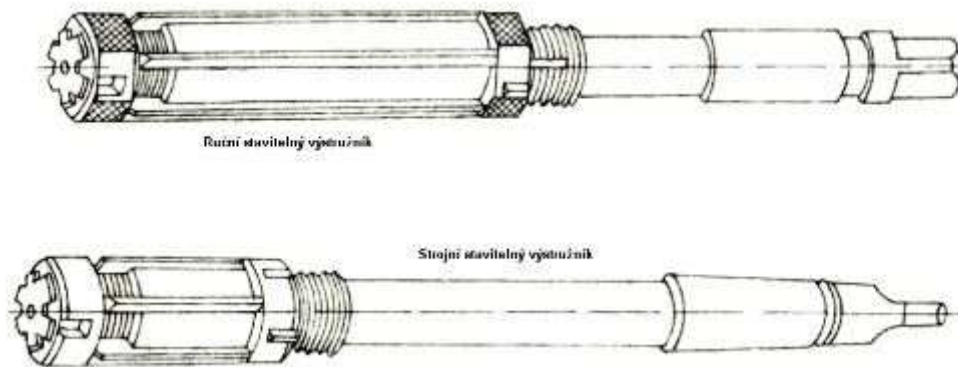
Obrázek 2. a) ruční výstružník, b) strojní výstružník [3]

Z konstrukčního hlediska lze výstružníky rozdělit na jednobřité a vícebřité vystružovací nástroje. Jednobřité výstružníky mají dvě až tři vodící lišty pohlcující řezný odpor a pouze jednu mechanicky upevněnou břitovou destičku z vysoce tvrdého materiálu. Vícebřité vystružovací nástroje mohou mít v závislosti na průměru minimálně 3 břity a maximálně 10–12 břitů. Výstružníky s lichým počtem břitů vytváří díru s menším počtem chyb. V tabulce 2 jsou zobrazeny počty břitů v závislosti na průměru nástroje.

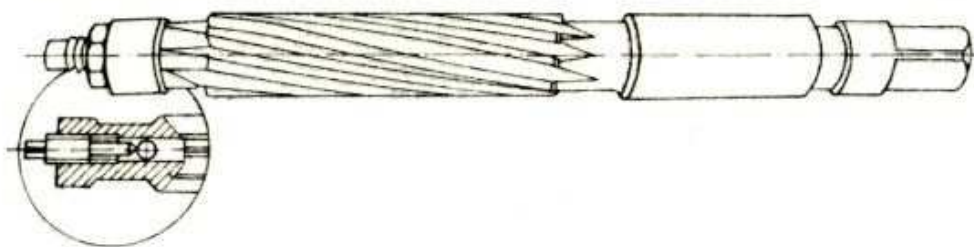
| Průměr nástroje | Počet břitů |
|-----------------|-------------|
| do 5 | 3 |
| 5–10 | 4 |
| 10–18 | 6 |
| 18 - 35 | 8 |
| 35 a více | 10 a více |

Tabulka 2. Počet břitů podle průměru nástroje [4]

Vyrábějí se ve třech variantách – pevné, stavitelné a rozpínací. Jako pevné jsou brány monolitní výstružníky s VBD nebo pájenými břitovými destičkami. [5] Stavitelné výstružníky (obr. 3) mají břity nastavitelné pomocí kalibrovaných kroužků nebo mikrometru. Rozpínací výstružníky (obr. 4) mají uvnitř těla dutinu. Do té se vtlačuje kužel nebo kulička, která výstružník rozpíná a tím mění průměr.



Obrázek 3. Stavitelný výstružník – ruční a strojní [6]



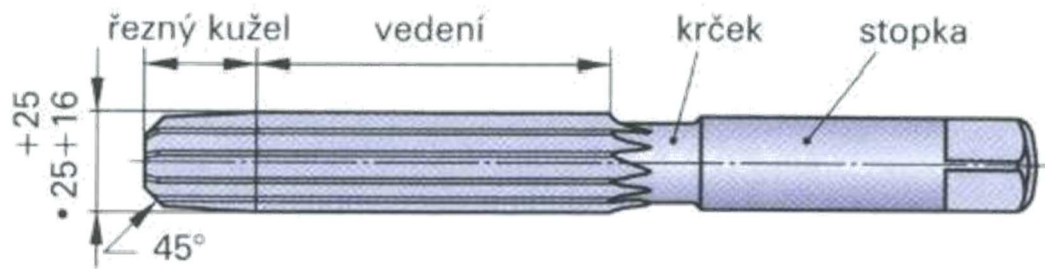
Obrázek 4. Rozpínací výstružník [6]

Podle způsobu upnutí je možné rozdělení na stopkové a nástrčné výstružníky. Stopka může mít buď válcový, nebo kuželový tvar, za který se výstružník upne do držáku nástrojů. Nástrčné výstružníky se upínají pomocí upínacích trnů nebo speciálních upínačů.

Výstružníky lze také rozdělit podle obráběné plochy. A to na válcové, kuželové a tvarové. Tvarové výstružníky jsou vyráběné na zakázku dle požadované plochy. Na zakázku lze vyrobit i speciální výstružníky, které současně vrtají a vystružují.

1.2.2 Konstrukce výstružníků

Hlavními částmi vystružovacího nástroje jsou řezná část, krček a upínací část. Různé výstružníky mohou mít jednu, dvě nebo všechny tři části.



Obrázek 5. Části výstružníku [7]

Nejdůležitější částí vystružovacího nástroje je řezná část. Jde o řezné hrany, které jsou tvořeny buď rovnou na výstružníku, nebo jsou na tělo připevněny pájené břity nebo VBD. Výstružník může mít buď břity přímé, nebo ve šroubovici. Výstružník s přímými zuby je náchylnější na vibrace, které způsobují poškozený povrch. Výstružníky se zuby ve šroubovici jsou rozděleny na dva základní typy. S levou nebo pravou šroubovicí. Výstružník s pravou šroubovicí způsobuje odvádění třísky v opačném směru, než je posuv. Proto je vhodná pro obrábění slepých otvorů. Levá šroubovice tlačí třísky ve směru posuvu, a proto je vhodná spíše pro průchozí díry. To neznamená, že nelze využít pro dokončení slepých děr, u kterých není potřeba celá délka díry. Je však nutné zajistit dostatečný prostor pro nahromaděné třísky. Úhel stoupání u břitů se u obou typů běžně pohybuje mezi 5° a 10°. Vyšší úhly šroubovice se využívají u velmi hlubokých děr nebo tam, kde je potřeba nízká hodnota Ra. Dalším důležitým prvkem na řezné části výstružníku je vstupní zkosení. Jde o část, která odděluje třísku, a proto je nejvíce namáhána na opotřebení. Toto zkosení by mělo být vždy symetrické podle osy nástroje. Dokonce i malá excentricita může způsobit nepravidelnost průměru a rychlé opotřebení nástroje. Pro slepé díry je vhodné zkosení 45°, zatímco pro průchozí díry je vhodnější dělené zkosení, nejprve 45° a poté 15°. V praxi jsou využívány i výstružníky bez vstupního zkosení. Tento nástroj je podobný čelní válčové fréze a bývá využíván především v CNC obráběcích centrech. [4]

a)



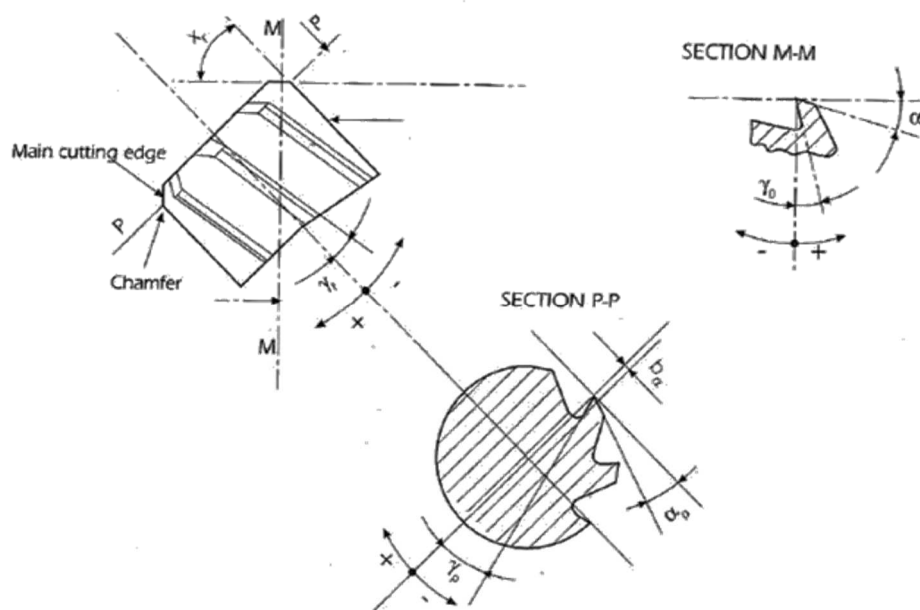
b)



Obrázek 6. a) výstružník s přímými zuby, b) se zuby ve šroubovici – levá, pravá [4]

Velmi důležitá je také geometrie nástroje. Vhodná geometrie šetří čas, chladicí kapaliny, nástroj, vytváří kvalitnější povrchy apod.

- ~ Úhel čela – se zvětšujícím se úhlem čela, se snižuje tření mezi čelem nástroje a třískou. Díky tomu nevznikají v oblasti řezu tak vysoké teploty a nástroj má delší životnost. Naopak při vysokých hodnotách úhlu čela může docházet k vylovení řezné hrany.
- ~ Úhel hřbetu – se zvětšujícím se úhlem hřbetu se opět snižuje tření mezi třískou a nástrojem. Nevýhodou je velké zvětšení úhlu hřbetu, kdy dojde ke zmenšení bříty a může docházet k jeho poškození. [8]



Obrázek 7. Geometrie výstružníku [4]

Z bezpečnostních důvodů může být na výstružníku vytvořen krček. Jde o nejužší místo výstružníku. V případě přetížení nástroje dojde k poškození právě v této části, a tím se předejde poškození řezné části. Nástroj je poté možné opravit.

Upínací část může mít dvě konstrukční varianty. Stopkové výstružníky mají na nástroji vytvořenou válcovou nebo kuželovou stopku. V případě válcové stopky se nástroj upne do držáku nástroje nebo do vřetena stroje. Kuželová stopka může mít ISO nebo Morse kužel. Nástrčné výstružníky se do stroje upínají pomocí upínacího trnu nebo speciálních upínačů.

2 Rešerše zaměřená na vliv tlaku procesní kapaliny a přídavku na rozměrové a kvalitativní parametry vystružené díry

Problematikou velmi přesných děr se zabývá mnoho firem i výzkumných institutů po celém světě. Již existuje řada odborných článků, ze kterých byla zpracována rešeršní část této diplomové práce.

2.1 Práce na ZČU

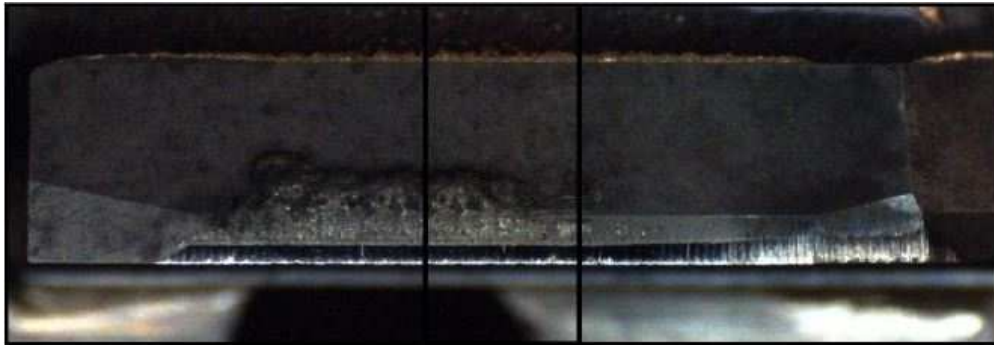
Problematika vystružování je řešena i na katedře obrábění již od roku 2012.

2.1.1 Martin Neprášek - Technologie výroby vysoce přesných otvorů vystružováním - 2012/2013

Neprášek [8] během svého experimentu zjišťoval závislost trvanlivosti nástroje na přesnosti rozměrů, kvalitě povrchu a produktivitě nástroje. Použitým nástrojem byl jednobřítý výstružník z rychlořezné oceli s pájenou cermetovou destičkou a s deponovanou vrstvou TiAlSiN. Obráběným materiálem byla konstrukční ocel 11 373 dle ČSN v žíhaném stavu. Byly obrobena čtyři zkušební vzorky s 96 otvory (2,4 m). Měření opotřebení břitu probíhalo po vystružení všech vzorků, tedy délky 9,6 m. Opotřebení bylo patrné jak na čele výstružníku (obr. 8), tak i na hřbetě (obr. 9). Vzhledem k tomu, že pro experiment byl dodán pouze jeden výstružník, nelze zhodnotit vliv jednotlivých faktorů na kvalitu díry, ani na opotřebení nástroje. [8]



Obrázek 8. Opotřebení na čele nástroje [8]



Obrázek 9. Opotřebení na hřbetě nástroje [8]

Dále byl vyhodnocován průměr vystružené díry. Z vytvořených grafů je vidět, že u prvního zkušební vzorku byly hodnoty průměru v dané toleranci, $6+0,012$ mm (obr. 10). S postupným opotřebením bříty se hodnoty průměru díry vychylovaly častěji (obr. 11). [8]



Obrázek 10. Závislost průměru na počtu vystružených děr – zkušební vzorek č. 1 [8]



Obrázek 11. Závislost průměru na počtu vystružených děr – zkušební vzorek č. 4 [8]

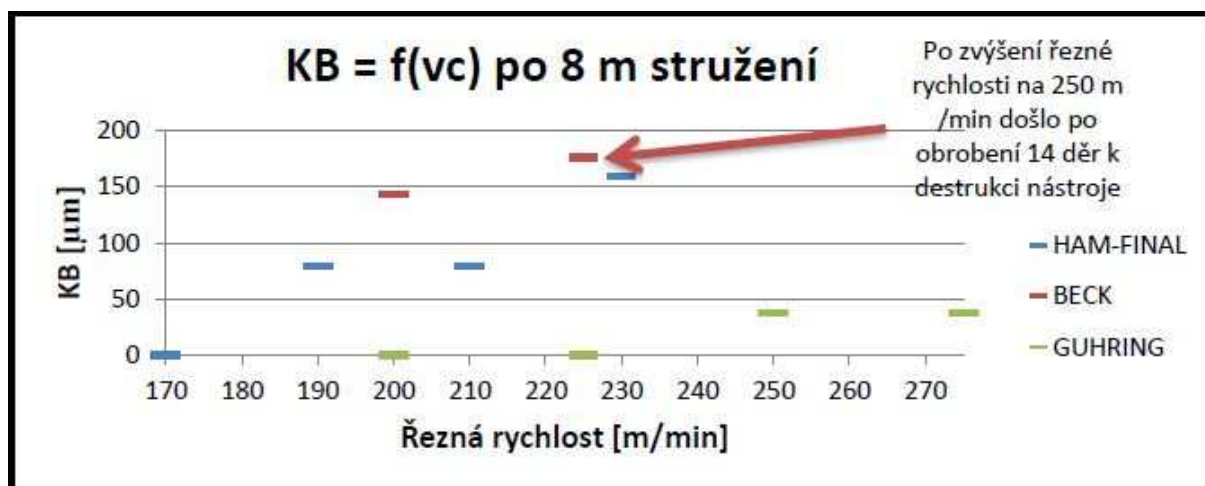
2.1.2 Luboš Kroft - Produktivní vystružování moderními výstružníky I - 2013/2014

Kroft [5] při své práci zjišťoval závislost trvanlivosti nástroje na kvalitě obrobeného povrchu. Pro testování byly použity 3 vystružovací nástroje různého konstrukčního provedení (viz. tabulka 3). Obráběným materiálem byla ocel dle ČSN 12 050.1. [5]

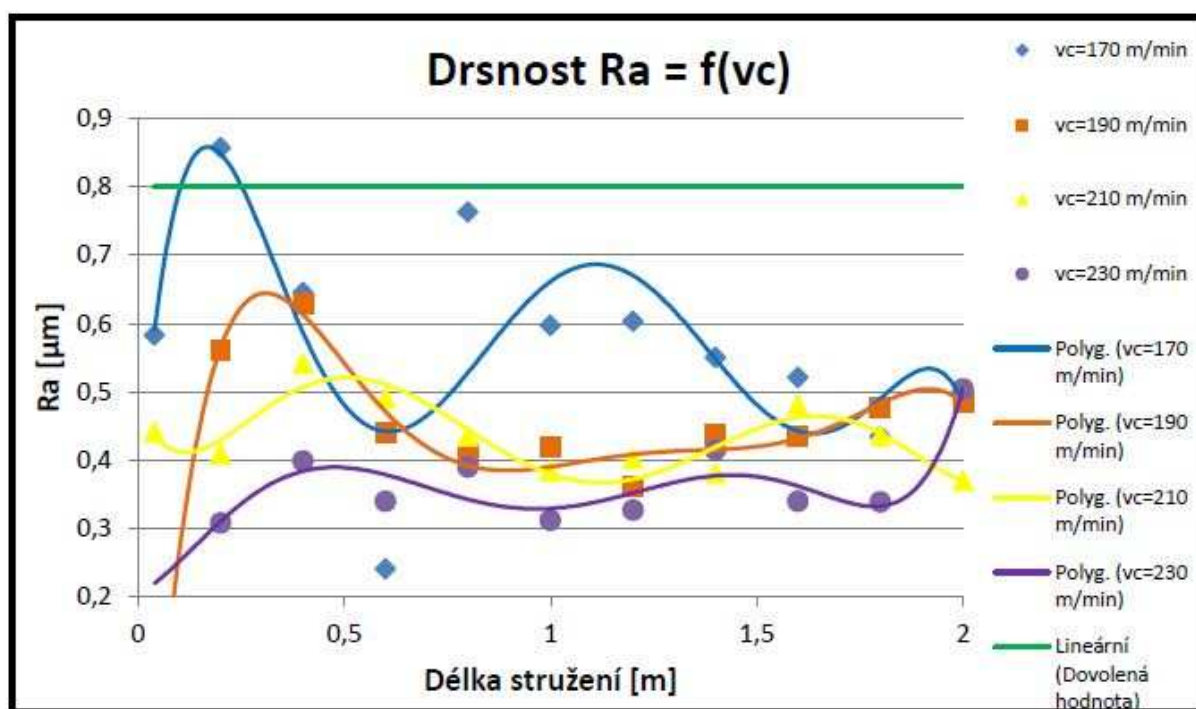
| Výrobce | Parametry | |
|------------------|----------------------------|----------------------|
| BECK | Materiál | SK+ povlak TiAlN |
| | Počet řezných břitů | 6 |
| | Vnitřní chlazení | ANO |
| GÜHRING | Materiál | SK+ povlak TiAlN |
| | Počet řezných břitů | 4 |
| | Vnitřní chlazení | NE |
| HAM-FINAL | Materiál | SK + břity z cermetu |
| | Počet řezných břitů | 6 |
| | Vnitřní chlazení | ANO |

Tabulka 3. Přehled použitých nástrojů [5]

Byly hodnoceny 4 základní parametry. A to válcovitost díry, opotřebení břitu nástroje, drsnost a průměr obrobené díry. Z experimentu vyplývá, že bez rozdílů konstrukce, výstružníky splňují požadavky na kvalitu vystružené díry. Ovšem u výstružníku od firmy BECK došlo, při zvýšení řezné rychlosti, k odštípnutí řezného břitu. Výstružníky ze SK s cermetovými břity, od firmy HAM-FINAL, i nástroj ze slinutého karbidu s povlakem TiAlN, od firmy GÜHRING, dosahovaly požadovaných hodnot přesnosti a dokázali vystružit požadovanou dráhu. Avšak menšího opotřebení a i lepších hodnot kvality vystružené díry dosahoval výstružník ze slinutého karbidu s povlakem TiAlN. Dále bylo dokázáno, že se při zvyšování řezné rychlosti zvyšuje opotřebení čela břitu (viz. obr. 12), hlavního i vedlejšího hřbetu. Z hlediska drsnosti lze konstatovat, že čím vyšší řezná rychlost, tím lze dosáhnout nižších hodnot Ra (viz. obr. 13) i Rz. Výsledky průměru díry a válcovitosti díry nebyly z experimentu jednoznačné. [5]



Obrázek 12. Opořebení břitů na čele nástroje [5]



Obrázek 13. Vliv řezné rychlosti na drsnost Ra [5]

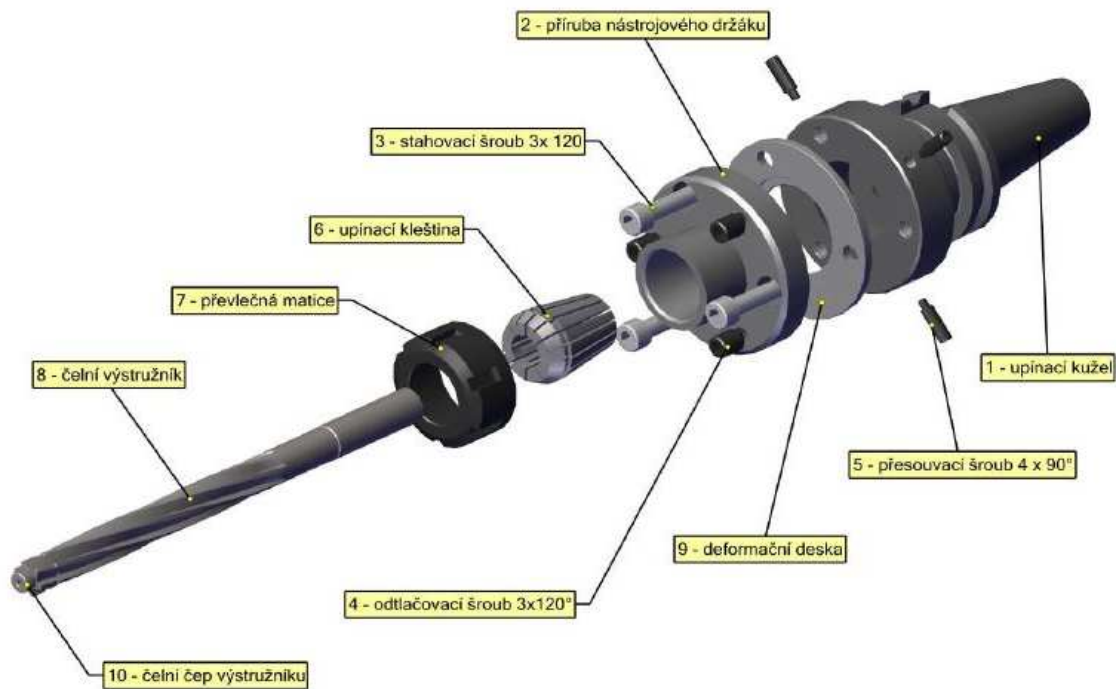
2.1.3 Martin Šmejkal - Produktivní vystružování moderními výstružníky II - 2013/2014

Jarmila Halaburdová – Zefektivnění vystružování díry 8D v IT H6 - 2014/2015

Šmejkal [9], ve své práci řešil kolísavou trvanlivost životnosti výstružníků a také nedodržování požadované drsnosti. Jednalo se o výstružníky z firmy Hofmeister, vyráběné ze slinutého karbidu. Testy probíhaly se jmenovanými výstružníky přímo ve firmě HOFMEISTER. Poté byl experiment zopakován v RTI s výstružníky od firmy HAM-FINAL. Tyto výstružníky byly vyrobeny z cermetu a před operací vystružování byla zařazena ještě

technologie vyhrubování. Během testování dopadl nejlépe cermetový výstružník, použitý ihned po vyvrtání. Nevyhovující byla však válcovitost díry. [9]

Na toto téma navázala **Halaburdová** [10], která pro upnutí nástroje použila RC nástrojového systému od firmy HAM-FINAL (viz. obr. 14). Výhodou tohoto systému je, že snižuje radiální házení na špičce výstružníku a prodlužuje hlavně trvanlivost nástroje. Po porovnání naměřených hodnot bylo zjištěno, že cermetový výstružník dosahoval lepších hodnot drsnosti R_a , válcovitosti i průměru díry. Také jeho opotřebení bylo výrazně nižší. Během testování byl také u jednoho z výstružníků navýšen tlak ze 30 bar na 100 bar. To se projevilo zhoršením drsnosti a také zvýšením opotřebení výstružníku na hřbetě. [10]



Obrázek 14. Nástrojový systém HAM-FINAL RC [10]

2.1.4 David Petruš - Produktivní vystružování ve firmě GTW BEARINGS s.r.o. - 2014/2015

Petruš [10] se snažil najít co nejlepší kombinaci nástroje a upínače nástroje. Pro technologii výroby děr byly využity tyto operace: vrtání, sražení hran a vystružování. Pro svůj experiment zvolil následující nástroje: GTW vrták – monolitní tvrdokovový vrták ze SK
 ISCAR vrták – vrták s výměnnou hlavičkou
 SK frézu se čtyřmi břity
 GTW výstružník – šroubovitý výstružník z HSS ocele
 HAM-FINAL výstružník – výstružník s přímými zuby z cermetu

a následující upínače: upínač weldon
 ISCAR upínač – hydraulický upínač
 RC upínací systém od firmy HAM-FINAL

V následující tabulce je přehled technologických variant:

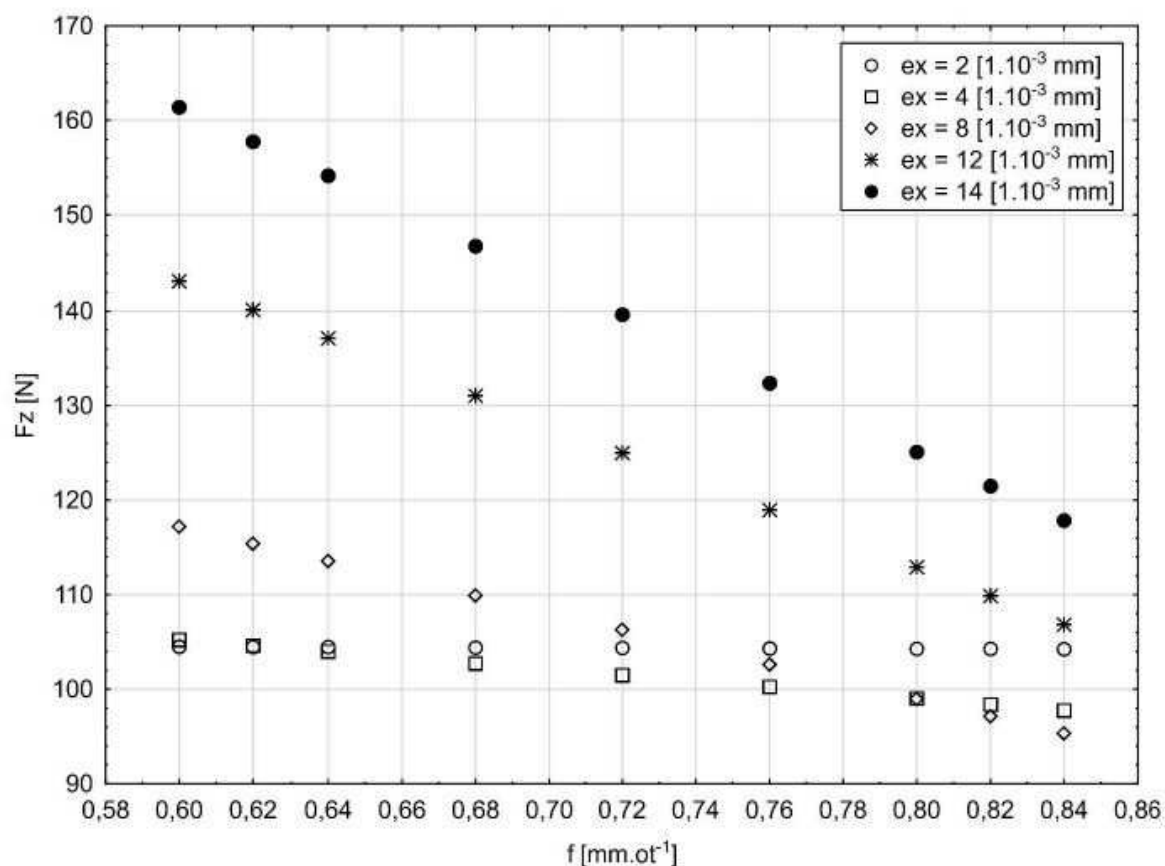
| | | Číslo varianty | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|-------------------|----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Upnutí výstružníku | Kuželová stopka | x | x | | | | | | | | | | |
| | Weldon | | | | | | | | | | x | x | x |
| | Hydro ISCAR | | | | | | | x | x | x | | | |
| | RC upínací systém | | | x | x | x | x | | | | | | |
| Upnutí vrtáku | Weldon | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| | Hydro ISCAR | | | | | | | | | | | | |
| Materiál výstružníku | HSS | x | x | | | | | | | | | | |
| | Cermet | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| Řezné podmínky | Vc | 3,14 | x | x | | | | | | | | | |
| | | 140 | | | x | x | x | | x | x | x | x | x |
| | | 180 | | | | | | x | | | | | |
| | Posuv | 0,3 | | | x | | | | x | | | x | |
| | | 0,45 | | | | x | | | | x | | | x |
| | | 0,6 | | | | | x | x | | | x | | x |
| | | 1,2 | x | x | | | | | | | | | |
| Přívod chladičí kapaliny | Vnější | x | x | | | | | | | | | | |
| | Vnitřní | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |

Tabulka 4. Technologické varianty [10]

Požadavkem byla předepsaná drsnost $0,8 \mu\text{m}$ po vystružení. Tato drsnost byla splněna jen u jedné varianty. Zde byl využit vrták ze slinutého karbidu od firmy ISCAR společně s upínačem weldon a HAM-FINAL výstružník společně s RC upínačem. Nejhůře dopadly varianty s hydraulickým upínačem od firmy ISCAR. Dále byla hodnocena válcovitost díry, kdy nejlépe dopadly varianty č. 3, 5 a 6. U těchto variant byl pro upnutí výstružníku použit RC upínací systém. Je tedy vidět, že výstružník s cermetovými břity v kombinaci s RC upínačem dokáže dosahovat předepsaných hodnot kvality vystružené díry. [10]

2.1.5 Jan Roub - Vliv vybraných technologických faktorů obrábění na integritu povrchu přesných děr - řezné podmínky při vystružování – 2016/2017

Roub [11] ve své práci zkoumal vliv řezné rychlosti, posuvu a zpětného posuvu na kvalitu vystružené díry. Pro svůj experiment použil výstružník s cermetovými břity a vnitřním přívodem řezné kapaliny. Měřenými parametry byly válcovitost, kruhovitost a drsnost vystružené díry. Během experimentu také měřil řezné síly. Drsnost povrchu vystružených děr se vždy pohybovala okolo $0,2 \mu\text{m}$, čímž bylo dokázáno, že cermetový výstružník pracoval, při takto nastavených podmínkách, velmi spolehlivě. Válcovitost děr se pohybovala ve stupni přesnosti IT7 a menší, přesto však nebylo objasněno 45% faktorů ovlivňujících právě tento parametr. Během měření řezných sil bylo zjištěno, že při zvyšování hodnoty posuvu se snižovala hodnota posuvové síly (viz. obrázek 15). To ovšem odporuje samotné teorii obrábění. [11]



Obrázek 15. Závislost F_z na posuvu [11]

Roub doporučil vytvořit nový experiment, kdy bude měněn vždy jen jeden faktor a odhalí se jeho vliv na kvalitu díry. [11]

2.2 Práce mimo ZČU

Další práce byly vyhledávány především z elektronických informačních zdrojů. Poměrně často se problematikou vystružování zabývá Vysoké učení technické v Brně, které spolupracuje s jedním z předních výrobců výstružníků, firmou FINAL Tools s.r.o. Za tuto firmu publikoval několik článků i pan Kouřil. Pro vyhledání zahraničních zdrojů byly využívány databáze Science Direct a Springer Link. Vyhledávanými slovy byly nejčastěji: reaming, cutting fluid pressure, tool wear.

2.2.1 Aleš Lučaník – Aplikace vystružovacích nástrojů s břity z cermetu a PVD povlakem – 2010/2011

V rámci své diplomové práce provedl **Lučaník** [12] experiment pro firmu HAM FINAL s.r.o (dnes již FINAL Tools s.r.o). Testoval trvanlivost a také životnost nového VRV výstružníku s cermetovými řeznými hranami. Při svém experimentu kontroloval také drsnost povrchu, průměr, tvar a polohu díry. Původním vystružovacím nástrojem byl monolitní cermetový výstružník $\varnothing 4,206_{-0,003}$. Technologie výroby byla zvolena dle tabulky 5. [12]

| Technologie výroby děr $\varnothing 4,2 H8$ | | | | |
|---|--------------------------|--------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|
| operace | otáčky $n [min^{-1}]$ | řezná rychlost $v_c [m.min^{-1}]$ | posuv $f [mm]$ | strojn ^í čas $t_s [s]$ |
| Navrtávání a zahloubení | 5200 | 65 | 0,1 | 1,04 |
| Vrtání $\varnothing 4$ | 5200 | 65 | 0,1 | 1,15 |
| Vystružování $\varnothing 4,2 H8$ | 5200 | 68 | 0,3 | 0,31 |
| Strojn ^í odjehlování | - | - | - | - |

Tabulka 5. Technologie výroby [12]

Požadavkem na nově navržený nástroj byla trvanlivost 4000 vystružených děr, při životnosti 7000 vystružených děr. Nový výstružník tato kritéria splnil (viz tabulka 6). Náklady na obrobení jedné díry klesly o 57,66 %. [12]

| Parametry | Doposud používaný nástroj | Nově navržený nástroj | Rozdíl |
|--|---------------------------|-----------------------|---------------------------|
| trvanlivost břitů nového výstružníku | 2600 děr | 5600 děr | 3000 děr = 115,4 % |
| trvanlivost břitů přeostřeného výstružníku | 2200 děr | 5500 děr | 3300 děr = 150 % |
| průměrná životnost nástroje | 4800 děr | 11100 děr | 6300 děr = 131,3 % |
| přímé náklady na obrobení jedné díry | - | - | 57,66 % |

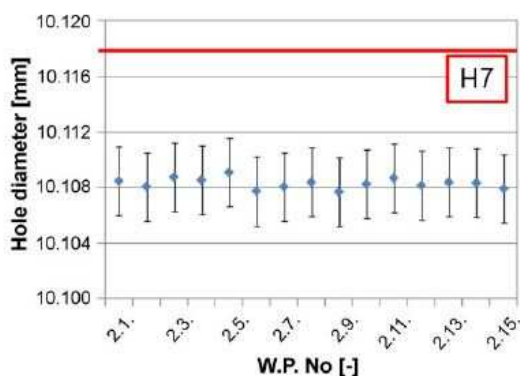
Tabulka 6. Porovnání trvanlivostí a životnosti nástrojů [12]

2.2.2 De Chiffre, Leonardo; Tosello, Guido; Piska, Miroslav; Müller, Pavel - Investigation on Capability of Reaming Process using Minimal Quantity Lubrication - 2008

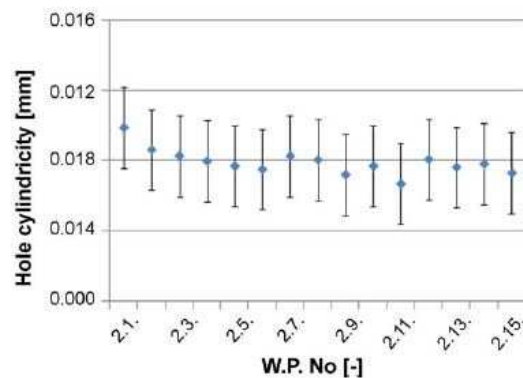
Experimentem pro **Dánskou univerzitu** bylo hodnocení využití MQL při vystružování. Byl hodnocen průměr díry, kruhovitost, válcovitost a drsnost povrchu. Jednalo se o výstružník z rychlořezné oceli HSS-E Cobalt se šesti řeznými hranami. Materiálem obrobku byla nízkouhlíková, chromniklová ocel 17 349 dle ČSN. Řezná kapalina byla přiváděna buď dvěma tryskami shora do místa řezu (TT) nebo jednou tryskou shora a druhou zesponu (TB). Plán experimentu je naznačený v tabulce 7. Pro každou variantu bylo připraveno 15 vzorků. [13]

| Parameter | Symbol | Unit | Reaming operation | | | | | |
|--------------------|--------|---------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | R6 |
| Reamer diameter | D_R | mm | 10.1 | 10.1 | 10.1 | 10.0 | 10.1 | 10.1 |
| Depth of cut | a_p | mm | 0.1 | 0.1 | 0.10 | 0.05 | 0.1 | 0.1 |
| Cutting speed | v_C | m/min | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 |
| Revolutions | N | rev/min | 158 | 158 | 158 | 159 | 158 | 189 |
| Feed | f | mm/rev | 0.315 | 0.315 | 0.21 | 0.21 | 0.21 | 0.21 |
| Feed rate | v_f | mm/min | 49.7 | 49.7 | 33.1 | 33.4 | 33.1 | 39.7 |
| Reverse feed rate | | | slow | rapid | rapid | rapid | rapid | rapid |
| Cutting time | t | sec | 18.1 | 18.1 | 27.2 | 26.9 | 27.2 | 22.7 |
| Oil temperature | T' | °C | 26 | 28 | 28 | 25 | 28.5 | 28 |
| Oil pressure | p | bar | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Oil flow rate | Q | ml/h | 50 | 60 | 55-60 | 50 | 55-60 | |
| Nozzle positioning | | | TB | TB | TB | TB | TT | TB |

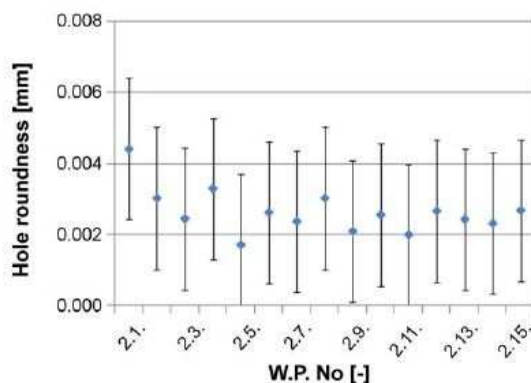
Tabulka 7. Plán experimentu [13]



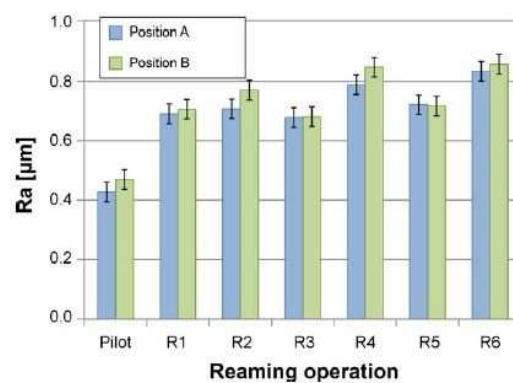
Obrázek 16. Zhodnocení průměru díry [13]



Obrázek 17. Zhodnocení válcovitosti díry [13]



Obrázek 18. Zhodnocení kruhovitosti díry [13]



Obrázek 19. Zhodnocení drsnosti povrchu [13]

Při všech podmínkách vystružování bylo dosaženo tolerance pod H7 (viz obr. 16). Odchyly válcovitosti a kruhovitosti byly rovnoměrně při všech podmínkách (viz obr. 17 a obr. 18). Z experimentu bylo také zjištěno, že při menší hloubce řezu nebo při vyšších řezných rychlostech bylo dosaženo vyšších hodnot Ra (viz obr. 19). Z výsledků lze říci, že nastavení dvou trysek shora, dosahuje podobných hodnot přesnosti jako nastavení jedné trysky shora a druhé zespodu [K]. Lze tedy říci, že při těchto vstupních podmínkách je možné využít metodu MQL, tedy redukci procesních kapalin, při dodržení přesnosti vystružených děr. [13]

2.2.3 P. Müller, G. Genta, G. Barbato, L. De Chiffre, R. Levi - Reaming process improvement and control: an application of statistical engineering - 2012

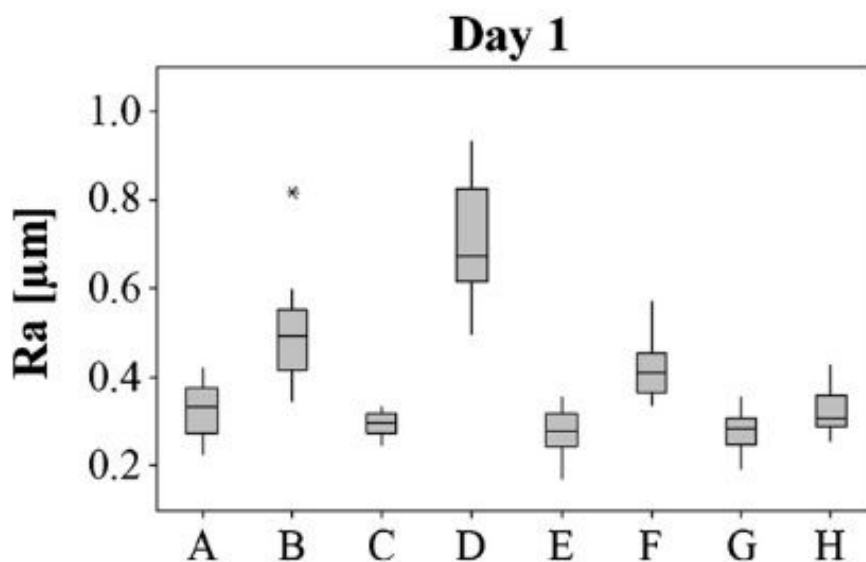
Pro **technickou univerzitu v Dánsku** byl proveden experiment zkoumající vliv řezných podmínek na kvalitu vystružené díry. Především byl hodnocen průměr díry a její drsnost. Obráběným materiálem byla austenitická nerezová ocel 17 349 dle ČSN. Použitý výstružník byl z rychlořezné oceli se šesti řeznými břity. Experiment byl rozdělen do čtyř pracovních dní. Každý den proběhlo vystružení 16 vzorků. Pro referenční účely byly každý den obrobena ještě dva vzorky, druhým výstružníkem, při nejnižších podmínkách. Měněnými

faktory byly řezná rychlost, posuv a procesní kapalina (M – minerální kapalina, W1 – syntetická kapalina). Plán experimentu je naznačený v tabulce níže. [14]

| | Vc [m/min] | Fot [mm] | Procesní kapalina |
|---|------------|----------|-------------------|
| A | 4,5 | 0,1 | W1 |
| B | 20,5 | 0,1 | W1 |
| C | 4,5 | 0,3 | W1 |
| D | 20,5 | 0,3 | W1 |
| E | 4,5 | 0,1 | M |
| F | 20,5 | 0,1 | M |
| G | 4,5 | 0,3 | M |
| H | 20,5 | 0,3 | M |

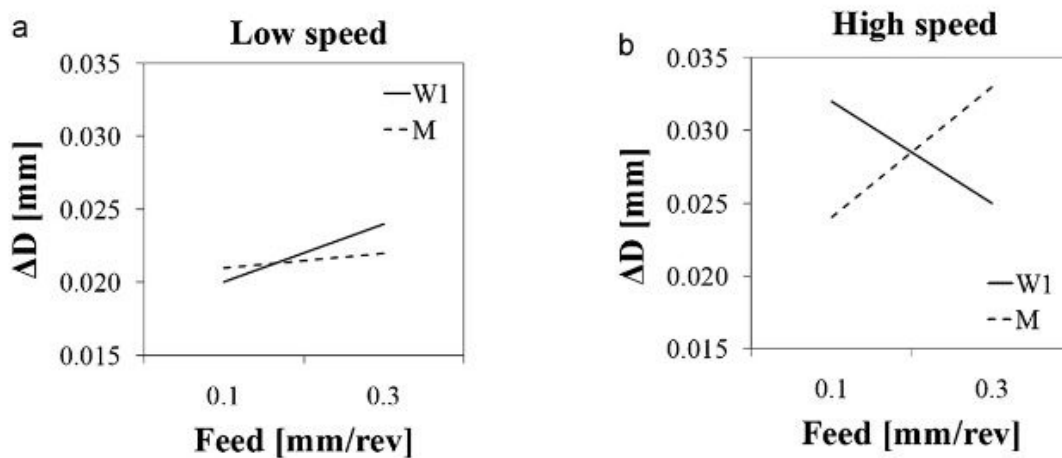
Tabulka 8. Plán experimentu [14]

Experimentem bylo zjištěno, že nejlepších hodnot drsnosti bylo dosaženo při variantě C, a naopak nejhorších hodnot při variantě D. Vyšší řezná rychlost měla za stejných podmínek vždy horší drsnost vystružené díry, než nižší řezná rychlost (viz obr. 20). [14]



Obrázek 20. Vyhodnocení drsnosti vystružené díry [14]

Z hlediska průměru obrobené díry je vidět, že nejmenší odchylka od průměru byla v případě nižší řezné rychlosti, malého posuvu a při použití syntetické kapaliny. Při těchto podmínkách bylo dosaženo odchylky od průměru 0,02 mm. (viz obr. 21). [14]



Obrázek 21. Vyhodnocení průměru vystružené díry [14]

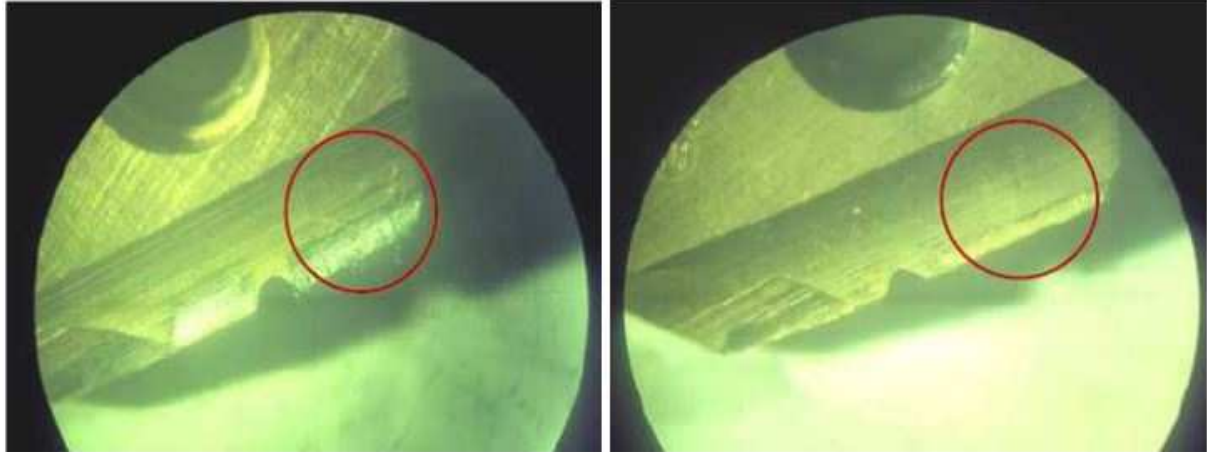
2.2.4 Miroslav Pecháček - Vliv řezných kapalin na výsledky obrábění – 2008/2009

Pecháček [15] hodnotil vliv řezné kapaliny na opotřebení nástroje a kvalitu vyvrtané díry. Pro experiment byl vybrán šroubovitý vrták bez povlaku o \varnothing 8 mm. Dva vrtáky byly použity bez přívodu řezné kapaliny, u dalších tří byly použity tři různé procesní kapaliny. Jednalo se o CIMPERIAL 900 (emulze pro náročné obrábění a broušení), CIMTECU D12 (syntetická kapalina pro lehké obrábění) a CIMSTAR 579 (polosyntetická kapalina pro středně těžké aplikace). Vrtalo se vždy do plného materiálu, a to do ocele 12 050 dle ČSN. Z experimentu bylo zjištěno, že největší opotřebení měl vrták bez přívodu řezné kapaliny, a naopak nejmenší bylo u vrtáku s přívodem emulze CIMPERIAL 900. Z hlediska drsnosti vrtané díry dopadl nejhůře opět vrták bez přívodu řezné kapaliny. Nejlépe vrták s přívodem kapaliny CIMSTAR 579. [15]

2.2.5 Martin Hort - Technologické, ekonomické a ekologické aspekty obrábění s vysoce výkonným chlazením – 2008/2009

Hort [16] porovnával vliv vysokotlakého (70 Bar) a nízkotlakého (20 Bar) chlazení při obrábění. Řešil opotřebení nástroje, životnost nástroje, tvorbu třísky, odvod tepla apod. Testy probíhaly na stroji MCV 1000 QUICK, kde je chladicí kapalina přiváděna středem vřetena. Jako chladicí médium byla použita kapalina typu Blaser. Jedná se o chladicí a mazací kapalinu vhodnou ke středně těžkému až těžkému obrábění. Nejprve byl proveden test zaměřený na opotřebení a životnost nástroje. Jednalo se o celokarbidový vrták. Byl hodnocen vliv vysokotlakého chlazení na životnost nástroje. U vysokotlakého chlazení bylo opotřebení velice malé a po celou dobu vrtání nebylo nutné vrták přebušovat (obr. 22 b)). Naopak u nízkotlakého chlazení docházelo k velkému opotřebení a bylo nutné vrták přebušovat

(obr. 22 a)). Rozdíly byly způsobené pravděpodobně tím, že u vysokotlakého chlazení bylo teplo odvedeno rychleji než u nízkotlakého chlazení. Vyšší tlak také zkracuje kontakt mezi třískou a břitovou destičkou. Testem bylo zjištěno, že obrábění s vysokotlakým chlazením snižuje opotřebení vrtáku a tím zvyšuje jeho životnost. [16]



Obrázek 22. Opotřebení břitu při a) nízkotlakém chlazení, b) vysokotlakém chlazení [16]

Dále byla zkoumána délka řezu, aniž by došlo k destrukci nástroje. Požadavkem byl vrtání díry do hloubky 120 mm bez přerušení řezu. Při nízkotlakém chlazení nebylo možné díru vyvrtat, protože docházelo k zahlcení díry třískou, a to vedlo ke zlomení nástroje. Při použití vysokotlakého chlazení nebyl problém s vrtáním děr těchto parametrů. Poté byla hodnocena tvorba třísky při obrábění nízkouhlíkové oceli. Při obrábění s nízkotlakým chlazením vznikají dlouhé třísky, které je třeba před nadcházející operací odstranit. Naopak při vysokotlakém obrábění vznikají třísky krátké, které není třeba odstraňovat. Tím se zvyšuje i produktivita výroby. [16]

3 Analýza a zhodnocení rešeršních poznatků

Rešeršní část byla zpracována na základě českých i zahraničních článků a prací. Byly vybrány především práce zaměřující se na kvalitu obrobene díry, při různých řezných podmínkách. Nejčastěji hodnocenými parametry byl průměr vystružené díry, drsnost povrchu, válcovitost vystružené díry a opotřebení řezného břitu (viz tabulka 9).

| Autor | Nástroj | Materiál | Ø díry | Ra / Rz | Válcovitost | Kruhovitost | Opořebení | Kolmost | Teplota |
|---|---------------------------|-------------|--------|---------|-------------|-------------|-----------|---------|---------|
| Neprášek | Výstružník | Cermet | • | • | | | • | | |
| Kroft | Výstružník | Cermet / SK | • | • | • | | • | | |
| Šmejkal | Výstružník | Cermet | • | • | • | | • | | |
| Halaburdová | Výstružník | Cermet | • | • | • | | • | • | |
| Pecháček | Vrták | HSS | | • | | | • | | • |
| Petrů | Výstružník | Cermet | • | • | • | • | | | |
| Roub | Výstružník | Cermet | • | • | • | • | | | |
| Hort | Vrták | Karbid | | | | | • | | |
| De Chiffre, Píška, Müller, Tosello, | Výstružník | Cermet | • | • | • | • | | | |
| De Chiffre, Müller, Genta, Barbato, Levi | Výstružník | Cermet | • | • | | | | | |
| Lučaník | Výstružník | Cermet | • | • | | | • | | |
| Kouřil | Vyvrtávací hlavice MT3 | Cermet | • | • | • | • | • | | |

Tabulka 9. Přehled hodnocených parametrů

Zpravidla byla měněna řezná rychlost, posuv a posuvová rychlost (viz tab. 10). Tyto faktory mají velký vliv na výslednou díru. Především na tvorbu třísky a její odvod z místa řezu, a tím i na kvalitu vystružené díry.

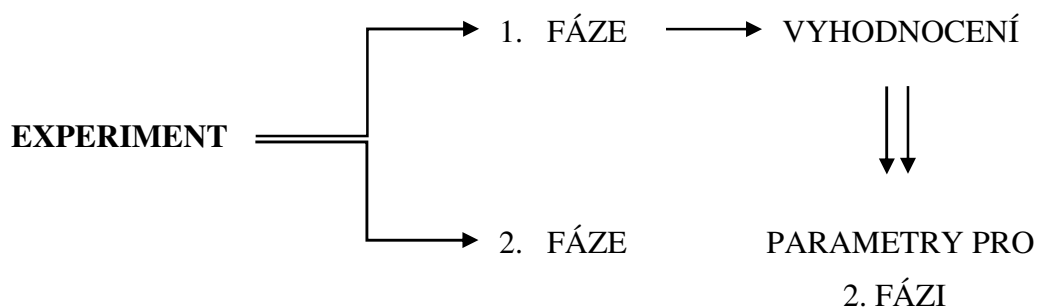
| Autor | v_c [m/min] | f_{ot} [mm] | v_f [m/min] | a_p [mm] | p [bar] | $v_f_{zpět}$ [m/min] | typ kapaliny |
|---|---------------|---------------|----------------|------------|-------------|----------------------|----------------|
| Neprášek | 165 | 0,1 | 439 | 0,2 | - | 45 000 | emulze |
| Kroft SK +cermet | 170 - 230 | 0,3/0,5 | 1,6- 3,6 | 0,2 | 20 | 15 000 | emulze |
| Kroft G SK | 200-275 | 1,2 | 7,6- 10,3 | 0,2 | 20 | 15 000 | emulze |
| Kroft Beck SK | 200-275 | 1,2 | 7,6- 10,3 | 0,2 | 20 | 15 000 | emulze |
| Šmejkal | 80 | 0,4 | 1280 | 0,9 | 30 | 30 000 | emulze |
| Halaburdová | 140/180 | 0,3/0,4 | 1114 / 2785 | 0,9 | 30 / 100 | 30 000 | emulze |
| Pecháček | 25,5 | 0,1 | - | - | - | - | - |
| Petrů | 12,56 | 1,2 | 60 | 0,2 | 30 | 500 | emulze |
| Roub | 180 | 0,72 | 60 | 0,2 | 40 | 15 000 – 45 000 | emulze |
| Hort | 100 | 0,15 | 2,73 | - | 20/70 | - | - |
| De Chiffre, Píška, Müller, Tosello, | 5/6 | 0,31/0,21 | 0,03- 0,05 | 0,1/0,2 | 6 | Slow/rapid | - |
| De Chiffre, Müller, Genta, Barbato, Levi | 4,5/20,5 | 0,1/0,3 | - | 0,1 | - | - | Minerál./synt. |
| Lučaník | 68 | 0,3 | - | 0,2 | - | - | - |

Tabulka 10. Přehled měněných faktorů

Přestože se problematikou vystružování zabývá mnoho firem a institucí, tak je stále mnoho faktorů ovlivňujících kvalitu díry, které se zatím nepodařilo objasnit. V této práci bych chtěla navázat na slečnu Halaburdovou, která již při svém experimentu okrajově zkoumala vliv tlaku procesní kapaliny na vystruženou díru. Hlavním cílem je tedy metodou plánovaných experimentů stanovit vliv tlaku procesní kapaliny a přídatku na rozměrové a kvalitativní parametry vystružené díry, a to ve vazbě na opotřebení nástroje.

4 Návrh a realizace experimentálního studia, vyhodnocení naměřených výsledků

Experiment zaměřený na vliv tlaku procesní kapaliny a přídavku na rozměrové a kvalitativní parametry vystružené díry ve vazbě na opotřebení nástroje byl proveden v laboratoři na KTO. Byl rozdělen na dvě hlavní části:



První část experimentu byla zaměřena na vyjádření vlivu faktorů uvedených v tabulce 11 na sledované parametry. Těmi byly skutečný průměr díry, drsnost obroběného povrchu, válcovitost, akustická emise. V této části byl vyloučen vliv opotřebení řezného břitu, protože je to faktor, který nelze řídit.

| Faktor | Jednotky | Rozsah | |
|-------------|----------|--------|------|
| v_c | m/min | 120 | 210 |
| f_{ot} | mm | 0,6 | 0,84 |
| Vf_{zpet} | m | 15 | 45 |
| a_p | mm | 0,1 | 0,25 |
| tlak | bar | 40 | 100 |

Tabulka 11. Podmínky první části experimentu

Z první části experimentu byla vytipována kombinace 2 případů, pro které se provedla dlouhodobá zkouška a objasnil se vliv opotřebení na sledované parametry.

4.1 Obráběcí stroj

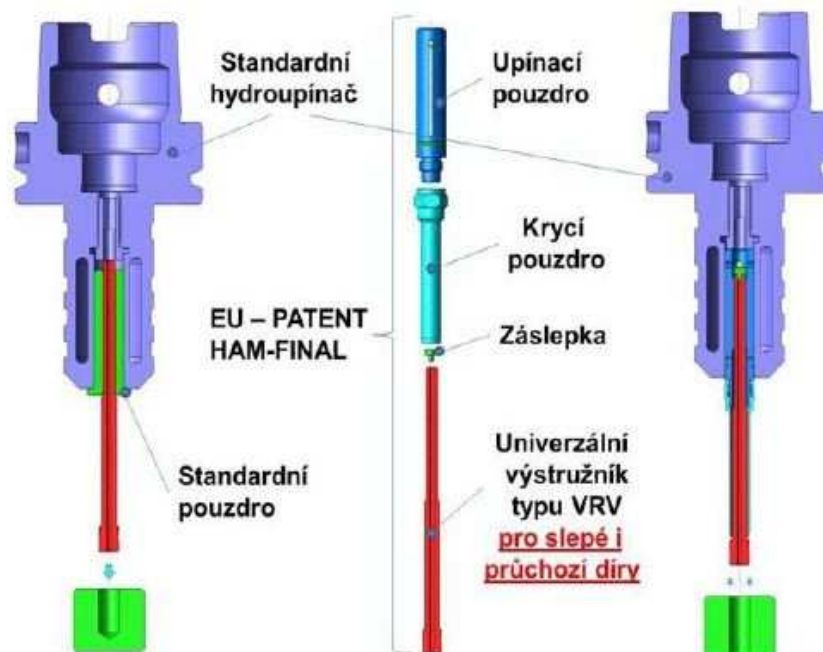
Experiment proběhl v laboratořích KTO. Zvoleným strojem bylo multifunkční soustružnické centrum CTX beta 1250 TC 4A (viz obrázek 23). Celá specifikace je uvedena v příloze 4.



Obrázek 23. CTX beta 1250 TC 4A [17]

4.2 Vystružovací nástroj

Vystružovacím nástrojem byl vysokorychlostní výstružník (VRV) od firmy FINAL Tools s.r.o (viz. obrázek 24).



Obrázek 24. Vysokorychlostní výstružník od firmy FINAL Tools s.r.o [11]

Jedná se o karbidový výstružník se šesti pájenými břitovými destičkami z cermetu. Řezná kapalina je zde přiváděna středem nástroje. Nástroj byl upnut v hydraulickém upínači.

4.3 Obrobek

Pro tento experiment byla zvolena tyčovina o \varnothing 180 mm z chrom-molybdenové oceli 42CrMo4 (15 142 dle ČSN) v zušlechťeném stavu. Tato ocel dosahuje, v ose obrobku, pevnosti 1 000 MPa. Chemické složení oceli je uvedeno v tabulce 12.

| Chemické složení 42CrMo4 | | | | | | | |
|--------------------------|-------------|-----------|----------|-----------|------------|------------------|------------------|
| Prvek | C | Mn | Si | Cr | Mo | P _{max} | S _{max} |
| Množství [%] | 0,35 – 0,45 | 0,6 – 0,9 | max. 0,4 | 0,9 – 1,2 | 0,15 – 0,3 | 0,035 | 0,035 |

Tabulka 12. Chemické složení oceli 42CrMo4 [18]

4.4 Průběh experimentu

Cílem experimentu bylo získat vliv tlaku procesní kapaliny a velikosti přídavku na vyhodnocované parametry vystružené díry ve vazbě na opotřebení nástroje. Z výsledků pre-experimentu byly vytipovány podmínky pro stěžejní část této práce a byl proveden úplný faktorový experiment se dvěma úrovněmi. Před samotným započítáním experimentu byly vrtáky i výstružníky zaříznuty. Předem připravené polotovary byly upínány do tříčelistového sklíčidla soustruhu (viz. obrázek 25). Nástroje byly upínány ručně, výměna pak probíhala automaticky.



Obrázek 25. Upnutí polotovaru

4.5 Použité nástroje

4.5.1 Vrtací nástroj


Vrtání probíhalo nástrojem ze slinutého karbidu se dvěma řeznými břity. Nástroj byl upnut v hydraulickém upínači. Parametry jsou uvedeny v tabulce 13.

| | | |
|---|-------------------------|--------------------|
|  | Materiál | SK + povlak |
| | Průměr [mm] | 11,5 / 11,8 |
| | Počet břitů | 2 |
| | Vnitřní chlazení | ANO |
| | Upnutí | Hydraulický upínač |

Tabulka 13. Vrtací nástroj

4.5.2 Vyvrtávací nástroj


Vyvrtávací tyč s VBD byla upnuta v excentrickém upínači. Parametry jsou uvedeny v tabulce 14.

| | | |
|---|-------------------------|--------------------|
|  | Materiál | SK + povlak TiN |
| | Průměr [mm] | 11,75 / 11,9 |
| | Počet břitů | 1 |
| | Vnitřní chlazení | ANO |
| | Upnutí | Excentrický upínač |

Tabulka 14. Vyvrtávací nástroj

4.5.3 Nástroj na sražení hran

Pro sražení hran byl zvolen srážec s jednou řeznou hranou ze SK. Parametry jsou uvedeny v tabulce 15.

| | | |
|---|-------------------------|-------------------|
|  | Materiál | SK + povlak |
| | Průměr [mm] | 12 |
| | Počet břitů | 2 |
| | Vnitřní chlazení | NE |
| | Upnutí | Kleštinový upínač |

Tabulka 15. Srážec hran

4.5.4 Vystružovací nástroj


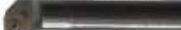


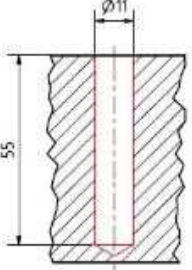
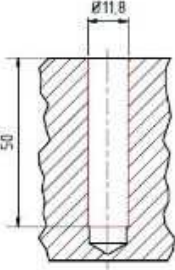
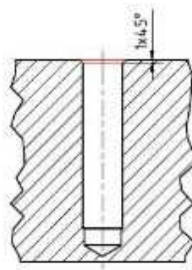
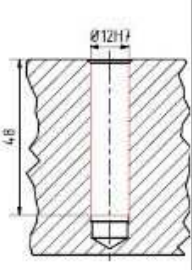
Vystružování probíhalo vysokorychlostním výstružníkem od firmy FINAL Tools s.r.o. Parametry jsou uvedeny v tabulce 16.

| | | |
|---|-------------------------|----------------------|
|  | Materiál | SK + břity z cermetu |
| | Průměr [mm] | 12 |
| | Počet břitů | 6 |
| | Vnitřní chlazení | ANO |
| | Upnutí | Hydraulický upínač |

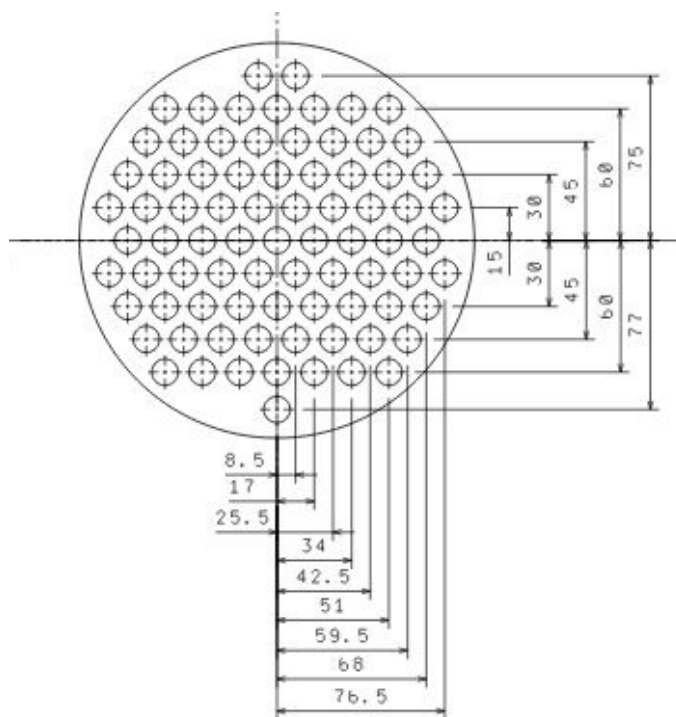
Tabulka 16. Vystružovací nástroj

4.6 Technologický postup

Ihned po upnutí obrobku bylo zarovnáno čelo a soustružena část obvodu válcové plochy. To kvůli lepšímu ustavení měřeného kusu v metrologické laboratoři. Technologie výroby měla 4 základní fáze: vrtání, vyvrtávání, sražení a samotné vystružování (viz tabulka 17). Na každém polotovaru bylo postupně vytvořeno 80 slepých děr (viz obrázek 26). Nakonec bylo odříznuto dno obrobku pro lepší vyčištění děr.

| Název: Vystružování DP - Čiperová | | Typ díry: Slepá | Materiál obrobku: 42CrMo4 (15 142 dle ČSN) | |
|---|---|---|--|---|
| Druh stroje: Obráběcí centrum CTX beta 1250 TC 4A | | Chlazení: Vnitřní | Pevnost: 1 000 [MPa] | |
| Chladičí médium: Blasocut BC 35 kombi 15% | | | | |
| VÝROBNÍ OPERACE: | Vrtání | Vyvrtání | Sražení hrany | Vystružení |
| NÁSTROJ: | Vrták ø11,5 a ø11,8 | Vyvrtávací tyč ø11,75 a ø11,9 | Jednobřitý sražeč | VRV ø12H7 |
| MAT. NÁSTROJE: | SK + povlak | SK + povlak | SK + povlak | Cermet |
| UPNUTÍ NÁSTROJE: | Hydraulický upínač | Excentrický upínač | Kleštinový upínač | Hydraulický upínač |
| NÁSTROJ: |  |  |  |  |
| Počet břitů: | 2 | 1 | 2 | 6 |
| ZNÁZORNĚNÍ: |  |  |  |  |
| v_c [m.min ⁻¹] | 80 | 80 | 80 | 210 |
| n [min ⁻¹] | 2 214 a 2 158 | 2 167 a 2 139 | 2 122 | 5 570 |
| f_s [mm] | 0,1 | 0,05 | 0,175 | 0,72 |
| v_f [mm.min ⁻¹] | 221 a 216 | 216 a 214 | 371 | 4 010 |
| $v_{f,sp}$ [mm.min ⁻¹] | 45 000 | 45 000 | 45 000 | 45 000 |
| p [bar] | 40 | 40 | 40 | 40 a 100 |

Tabulka 17. Technologický postup



Obrázek 26. Rozložení děr

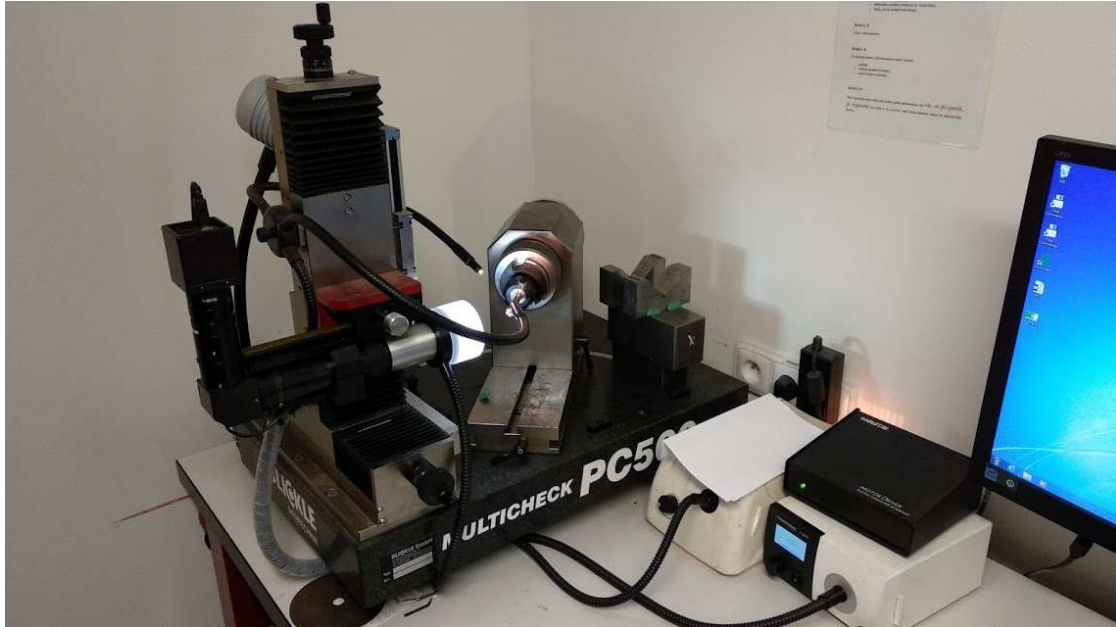
Aby bylo možné pozorovat vliv jednotlivých faktorů na vyhodnocované parametry vystružené díry ve vazbě na opotřebení nástroje, byly použity 4 totožné výstružníky, při různých řezných podmínkách. Plán experimentu je uvedený v tabulce 18. Pro každý výstružník bylo připraveno 6 polotovarů, tzn. 480 děr o celkové délce 22,56 m. Výstružník byl proměřován na dílenském mikroskopu po každých 80 vystružených dírách. Po ukončení experimentu byly vzorky převezeny do metrologické laboratoře a byla měřena drsnost vystruženého povrchu a skutečný průměr díry na vstupu i na výstupu.

| Nástroj | ØD [mm] | p [bar] |
|---------|---------|---------|
| 1 | 11,75 | 40 |
| 2 | 11,75 | 100 |
| 3 | 11,9 | 40 |
| 4 | 11,9 | 100 |

Tabulka 18. Plán experimentu

4.7 Měření opotřebení břitů

Měření opotřebení břitů probíhalo na dílenském mikroskopu BLICKLE Multicheck PC 500 (viz obr. 27). Celá specifikace je uvedena v příloze 1. Zkoumaným parametrem bylo opotřebení na hlavním hřbetě nástroje. Výstružník byl proměřován vždy po 80 vystružených dířích, tzn. po ujetí dráhy 3,76 m.



Obrázek 27. Dílenský mikroskop BLICKLE

4.8 Měření vzorků

Po vystružení všech děr byly vzorky převezeny do metrologické laboratoři. Zde byla měřena drsnost povrchu na drsnoměru Hommel Etamic T8000 (viz obrázek 28). Celá specifikace je uvedena v příloze 2.



Obrázek 28. Drsnoměr Hommel Etamic T8000 [20]

Dalším měřeným parametrem byl skutečný průměr vystružené díry. Ten byl měřen vzduchovým měřícím přístrojem Mahr Millimar S1840 (viz obr. 29). Celá specifikace je uvedena v příloze 3.



Obrázek 29. Vzduchový měřící přístroj Millimar S1840

Posledním hodnoceným parametrem byla válcovitost. Ta byla měřena na 3D měřícím stroji CMM Carl Zeiss Prismo 7 Navigator (viz obrázek 30). Celá specifikace stroje je uvedena v příloze 5.



Obrázek 30. CMM Carl Zeiss Prismo 7 Navigator [19]

4.9 Vyhodnocení experimentu

V této části bude vyhodnocen experiment, který byl popsán v předchozí části práce. Cílem je vyhodnotit jak rozměrové, tak kvalitativní parametry obrobeneho povrchu v závislosti na proměnných parametrech. Hodnoceno bude také opotřebení hlavního hřbetu nástroje. Vzhledem k odstřípnutí dvou břitů na výstružníku č. 1 byla tato část experimentu zopakována ještě jednou s výstružníkem č. 5. Avšak výstružník obrobil pouze 160 děr, během kterých byly opět vyštípnuty řezné břity.

Souhrn kritérií pro experimentální obrábění:

- VBmax = 50 μm
- vystružená dráha = 22,56 m

Parametry vztažené na díru v stupni přesnosti IT7:

- Ra \leq 0,8 μm
- Dmin = 12,000 mm
- Dmax = 12,018 mm
- válcovitost = 8 μm

Vzhledem k tomu, že experiment byl naplánován jako úplný faktorový experiment na dvou úrovních, lze statisticky určit efekt faktorů na sledované parametry. Plán experimentu je nutné psát v kódovaných proměnných, jako je uvedeno v tabulce 19.

| Nástroj | ØD [mm] | p [bar] | ØD [mm] | ØD [mm] |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 | 11,75 | 40 | -1 | -1 |
| 2 | 11,75 | 100 | -1 | +1 |
| 3 | 11,9 | 40 | +1 | -1 |
| 4 | 11,9 | 100 | +1 | +1 |

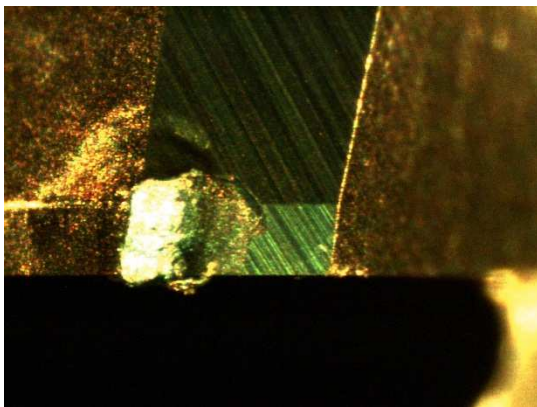
Tabulka 19. Kódované proměnné

Z takto upraveného plánu experimentu bylo možné vypočítat efekt faktoru, čímž se rozumí změna ukazatele kvality sledovaného parametru, kterou způsobí přechod faktoru z úrovně -1 na úroveň +1. Efekt faktoru byl vypočítán vždy pro 240 vystružených děr, tj. 11,28 m vystružené díry, a to pro možnost porovnání všech variant vystružování. Proto i porovnání skutečných průběhů sledovaných parametrů s matematicko – statisticky vypočtenými průběhy, proběhlo vždy pouze do vystružené délky 11,28 m. Jelikož nástroje

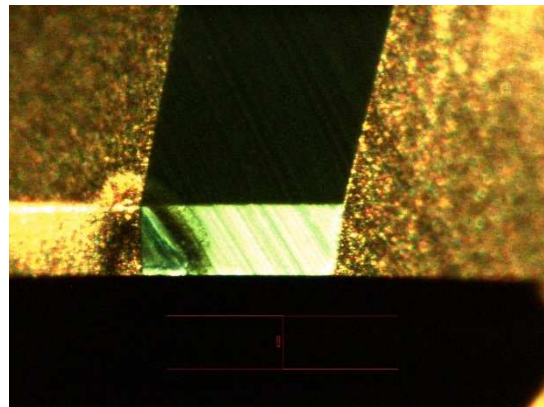
č. 2, 3 a 4 byly schopny obrobít až 22,56 m vystružené dráhy, tak jsou v práci uváděny závěry vztahující se k tomuto kritériu. V tomto bodě, již není možné výsledky statisticky hodnotit.

4.9.1 Opotřebení řezného břitu

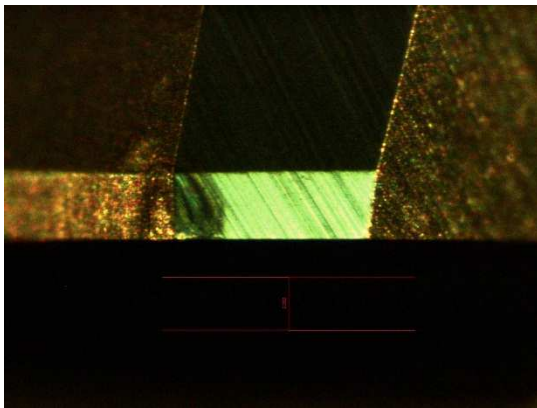
Již během experimentu bylo sledováno opotřebení nástroje. Hodnoty opotřebení byly měřeny na dílenském mikroskopu BLICKLE, a to vždy po 80 vystružených dírách. Na obrázcích 31 až 34 je znázorněno opotřebení řezných břitů po 240 vystružených dírách. Další obrázky opotřebení jednotlivých břitů jsou vloženy do přílohy 6. Pro experiment bylo zvoleno maximální opotřebení 50 μm , tj. Kriteriaální opotřebení $VB_{\text{max}} = 50 \mu\text{m}$.



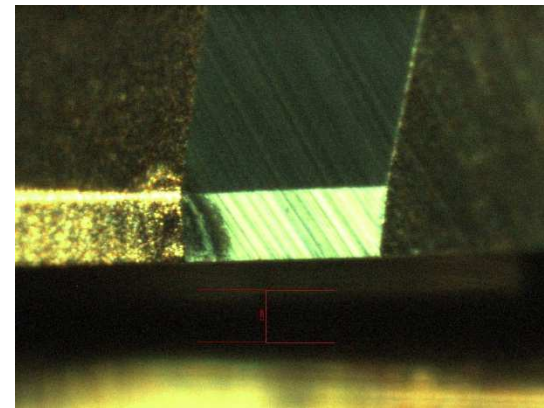
Obrázek 31. Opotřebení břitu – nástroj 1



Obrázek 32. Opotřebení břitu – nástroj 2

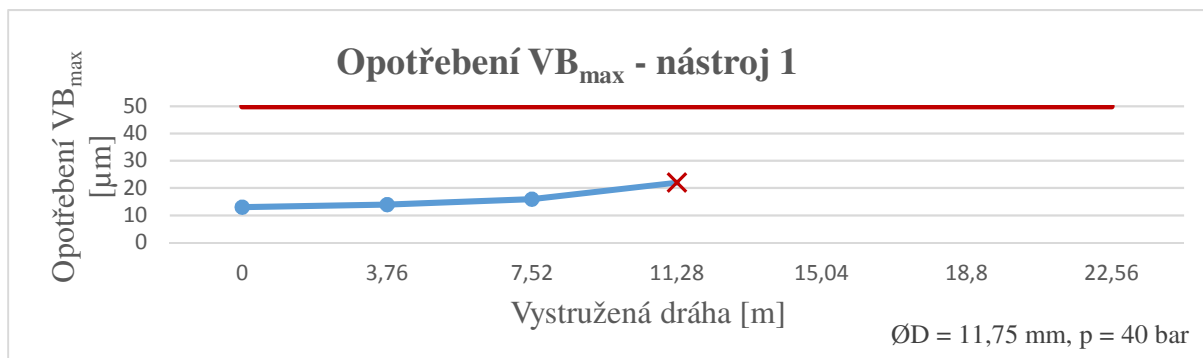


Obrázek 33. Opotřebení břitu – nástroj 3

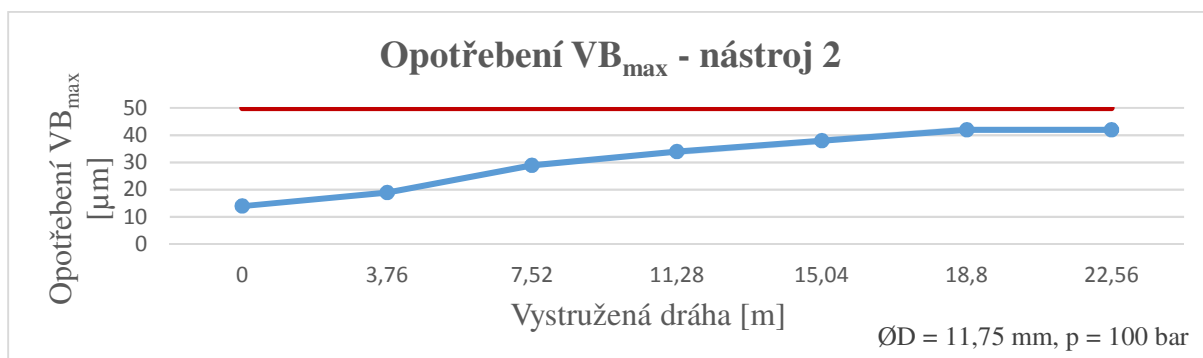


Obrázek 34. Opotřebení břitu – nástroj 4

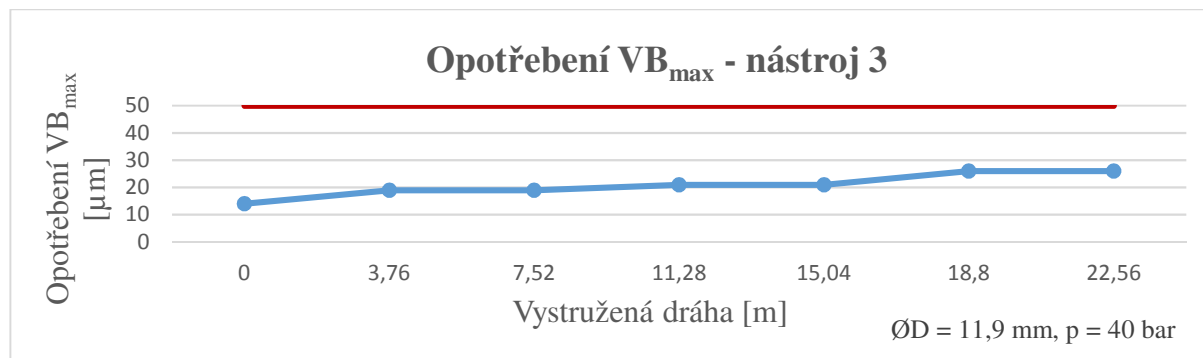
Opotřebení řezných břitů je znázorněno v grafech na obrázcích 35 až 39. Je zde vždy uvedeno největší opotřebení na nástroji.



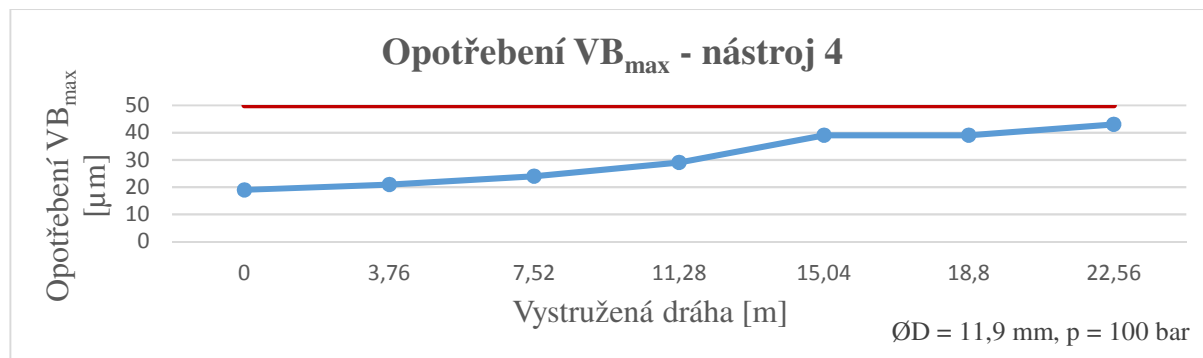
Obrázek 35. Opotřebení hlavního hřbetu nástroje č. 1



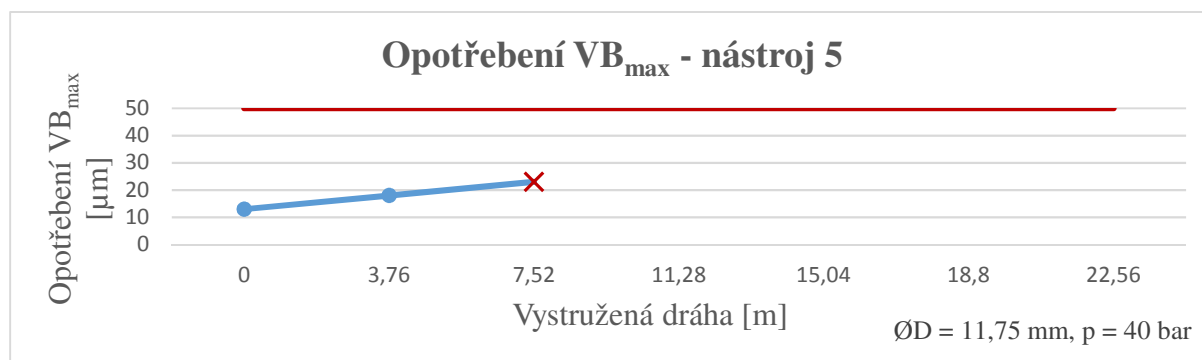
Obrázek 36. Opotřebení hlavního hřbetu nástroje č. 2



Obrázek 37. Opotřebení hlavního hřbetu nástroje č. 3



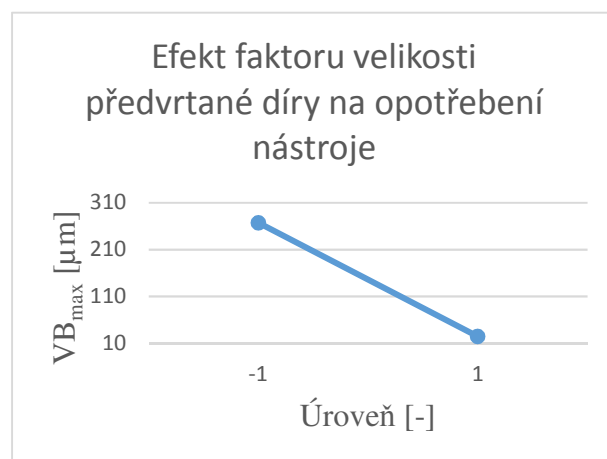
Obrázek 38. Opotřebení hlavního hřbetu nástroje č. 4



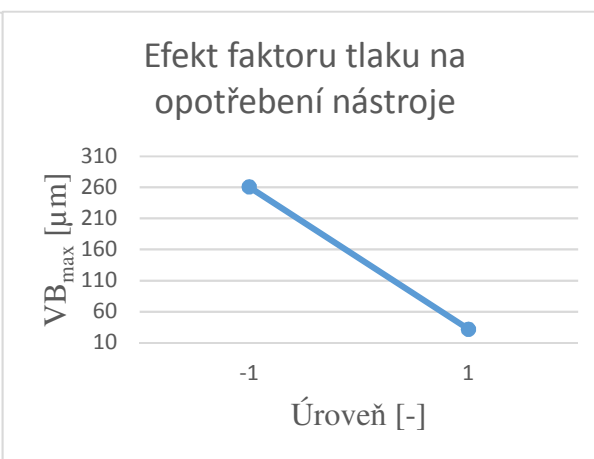
Obrázek 39. Opotřebení hlavního hřbetu nástroje č. 5

Jak je vidět z grafů, největší vliv na opotřebení nástroje měl průměr předvrtané díry. Při velkém přídavku a nízkém tlaku procesní kapaliny došlo dokonce ke zlomení nástroje (nástroj 1 a 5). Zvýšením tlaku došlo k menšímu opotřebení řezných břitů a nástroj byl schopen vystružit požadovanou dráhu, tzn. zvýšení tlaku na 100 bar mělo pozitivní vliv na trvanlivost nástroje. Nejlépe dopadl výstružník č. 3. Zde byl zvolen nižší přídavek (0,1mm) a nižší tlak (40 bar). Tento nástroj měl po zaříznutí hodnotu opotřebení na hlavním hřbetě 14 μm a po vystružení 22,56 m byla hodnota VB_{max} pouze 26 μm. Zvýšením tlaku na 100 bar došlo k většímu opotřebení nástroje. Všechny hodnoty opotřebení jsou uvedené v příloze 6.

Na následujících grafech (viz obrázek 40 a 41) jsou vidět statisticky vypočtené vlivy jednotlivých faktorů na opotřebení břitů. Z grafů je patrné, že s klesajícím přídavkem klesá opotřebení řezných břitů nástroje a klesá také s rostoucím tlakem procesní kapaliny. Při porovnání s hodnotami naměřenými během experimentu můžeme potvrdit vliv přídavku na opotřebení břitů. Ovšem u vlivu tlaku to již není tak jednoznačné.



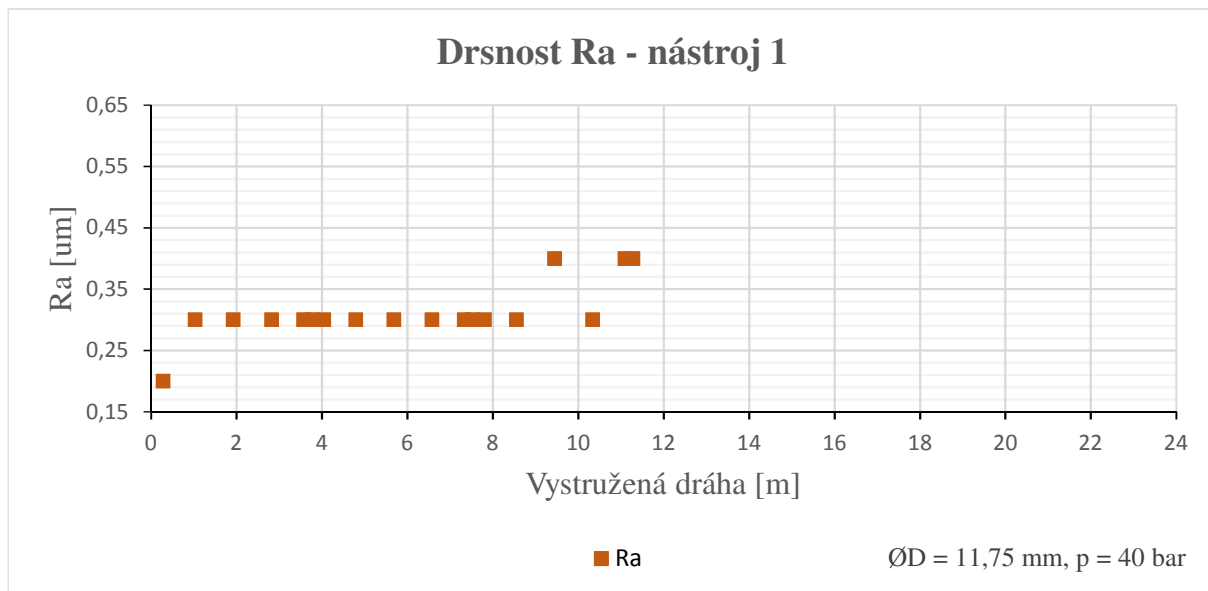
Obrázek 40. Efekt faktoru velikosti předvrtané díry na opotřebení nástroje



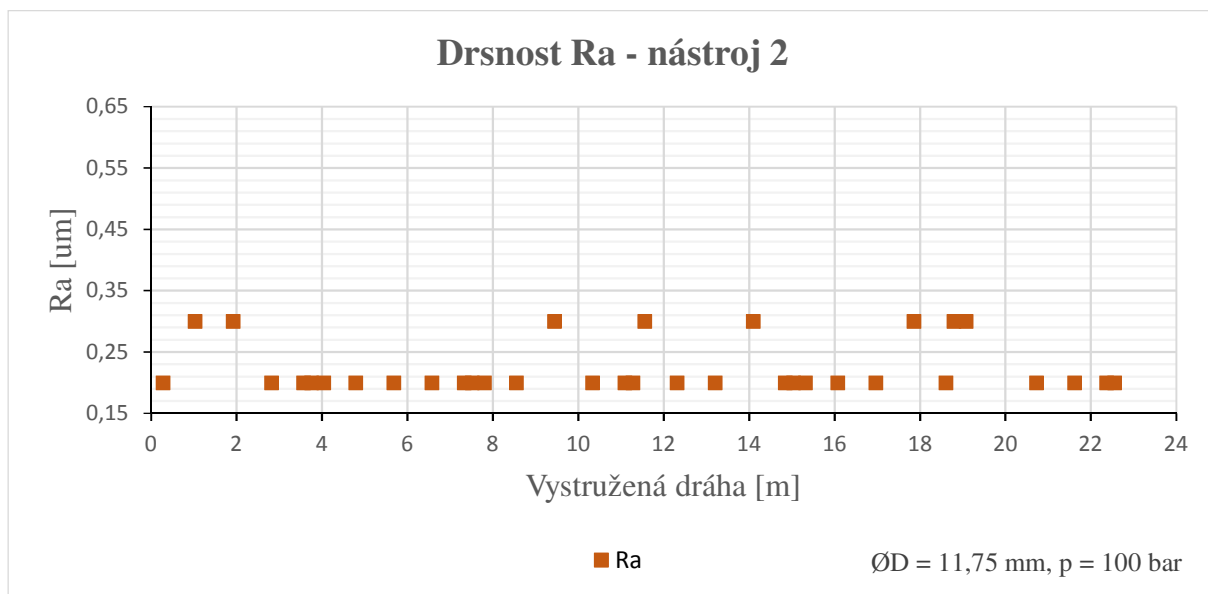
Obrázek 41. Efekt faktoru tlaku na opotřebení nástroje

4.9.2 Drsnost Ra

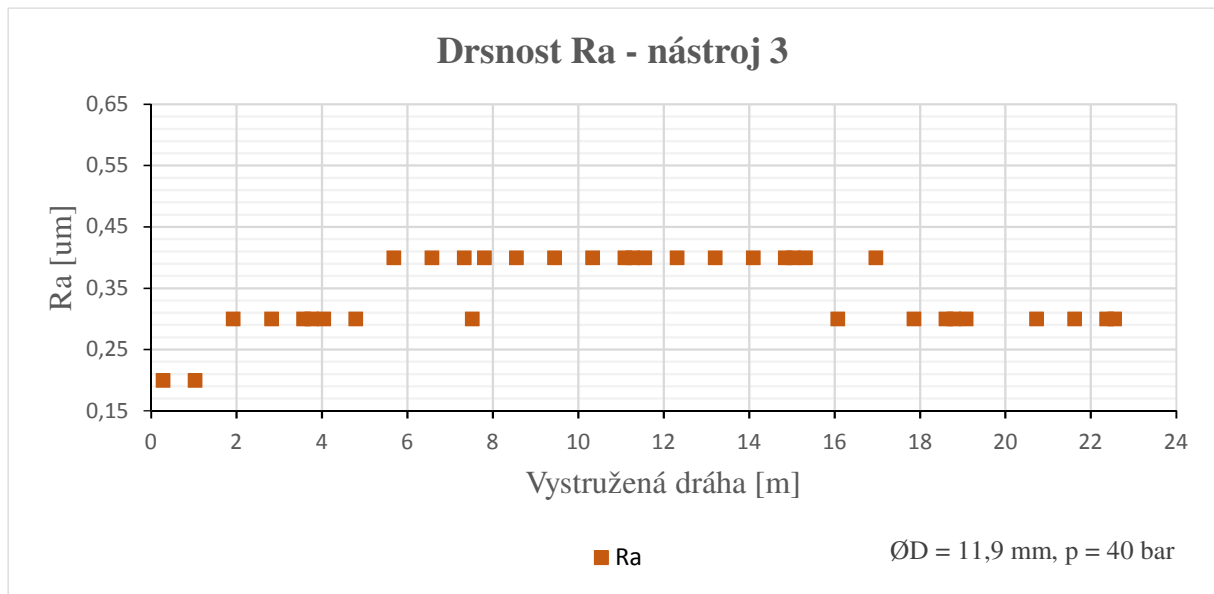
Dalším z vyhodnocovaných parametrů byla drsnost Ra. Hodnoty byly měřeny v metrologické laboratoři na drsnoměru. Ukázkový protokol z měření je v příloze 7. Průběh drsností Ra je zobrazen na obrázcích 42 až 46. Konkrétní hodnoty jsou uvedeny v příloze 8.



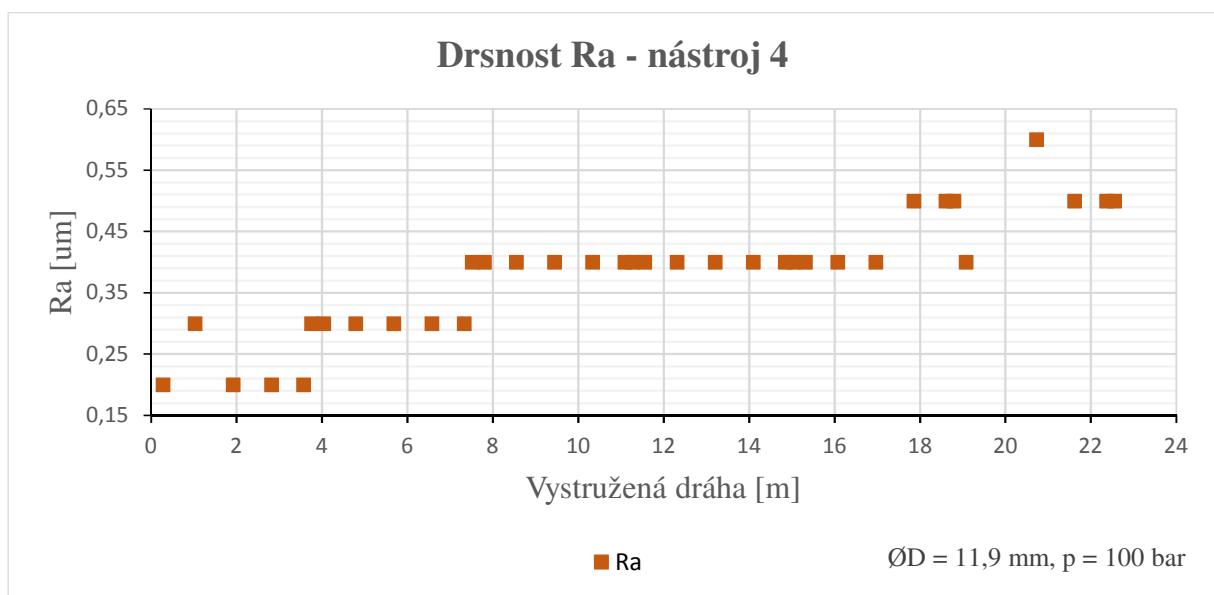
Obrázek 42. Drsnost Ra děr vystružených nástrojem č. 1



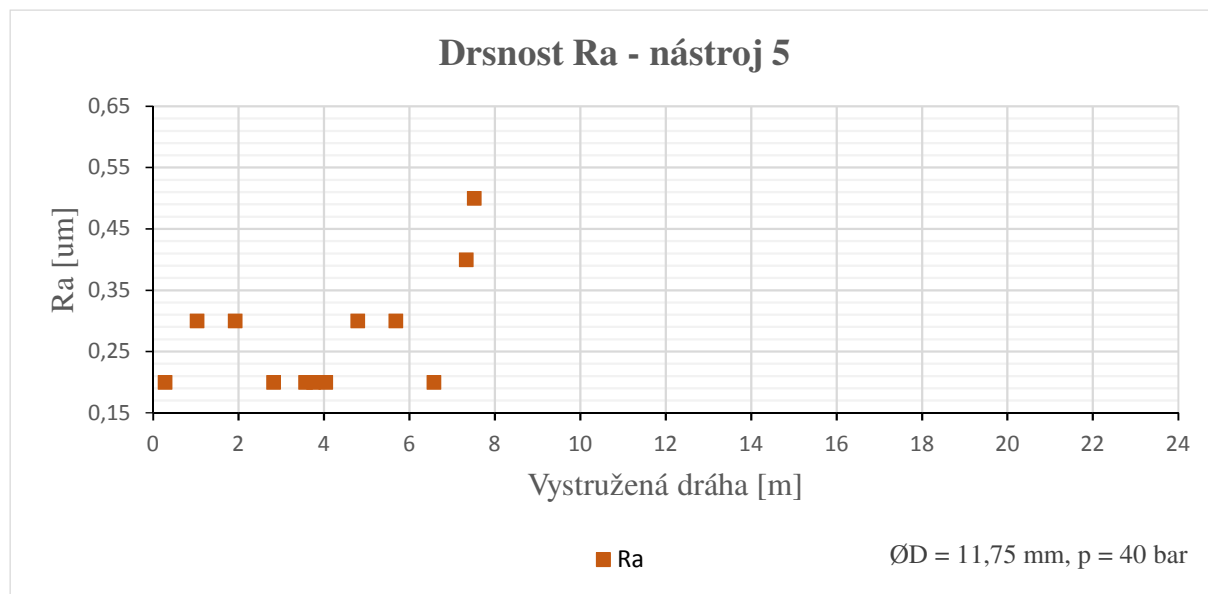
Obrázek 43. Drsnost Ra děr vystružených nástrojem č. 2



Obrázek 44. Drsnost Ra děr vystružených nástrojem č. 3



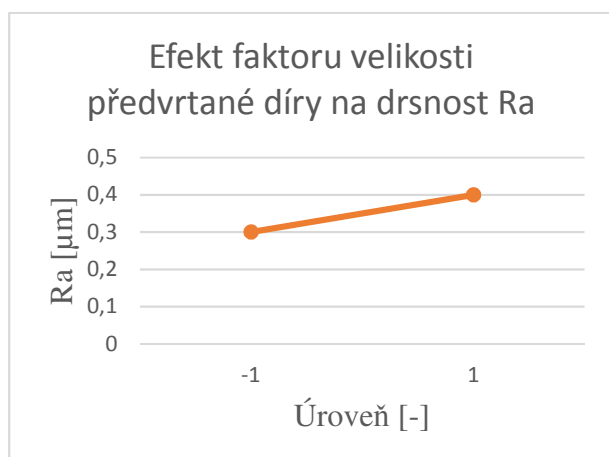
Obrázek 45. Drsnost Ra děr vystružených nástrojem č. 4



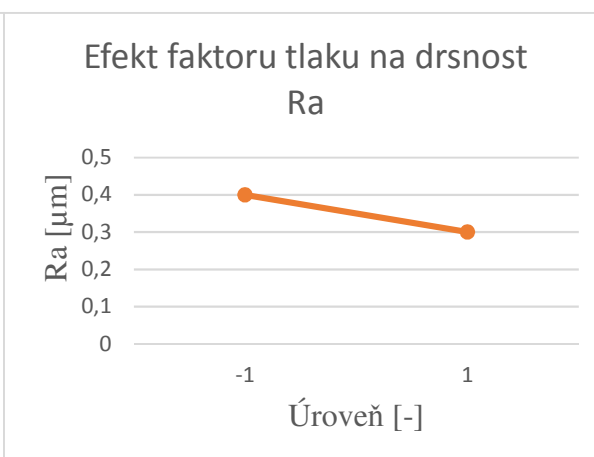
Obrázek 46. Drsnost Ra děr vystružených nástrojem č. 5

Požadavkem byla maximální drsnost Ra 0,8 µm. Tuto podmínku bez problémů dodržely všechny nástroje, včetně těch, u kterých došlo k odštípnutí řezného břitu. Z grafů je vidět, že velký vliv na drsnost Ra má opět průměr předvrtané díry.

Na obrázcích 47 a 48 jsou znázorněny vlivy vypočítané matematicky. Ty ukazují, že snižováním přídávku, tedy zvětšováním průměru předvrtané díry, stoupá hodnota drsnosti Ra. Zvyšováním tlaku procesní kapaliny, dle matematicko – statistického vyhodnocení, klesá hodnota drsnosti Ra. Toto tvrzení je platné pro 240 vystružených děr, tedy 11, 28 m vystružené dráhy. Výsledná drsnost obrobeného povrchu je však závislá na opotřebení řezného břitu, viz obr. 45, kde s narůstající délkou vystružené dráhy, při vyšším tlaku procesní kapaliny, se zhoršuje drsnost Ra.



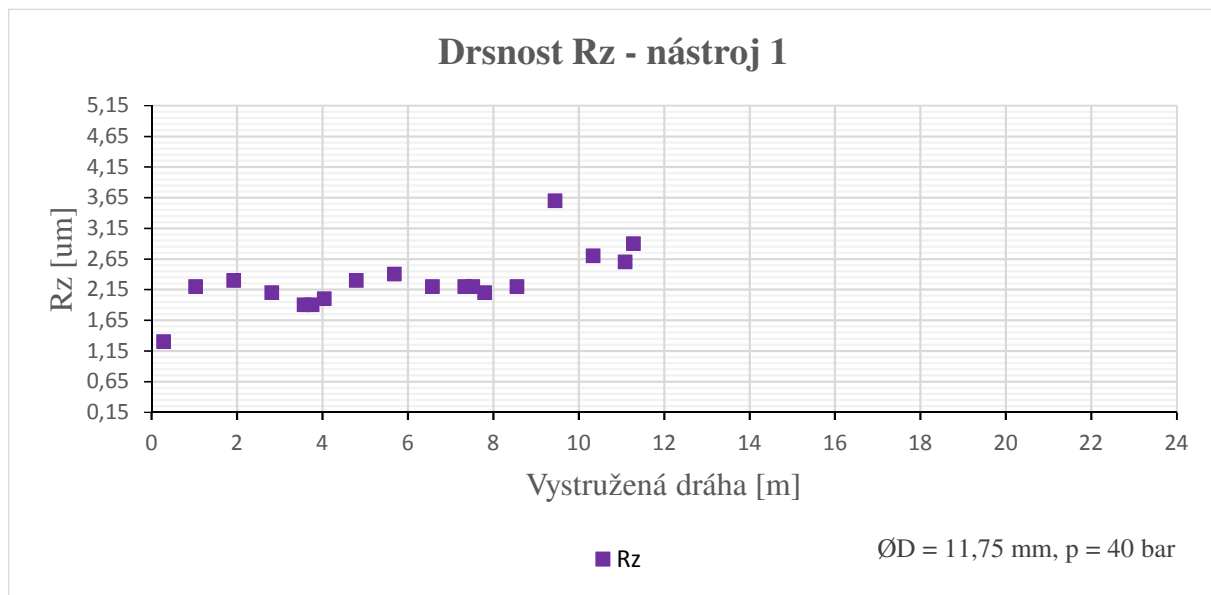
Obrázek 47. Efekt faktoru velikosti předvrtané díry na drsnost Ra



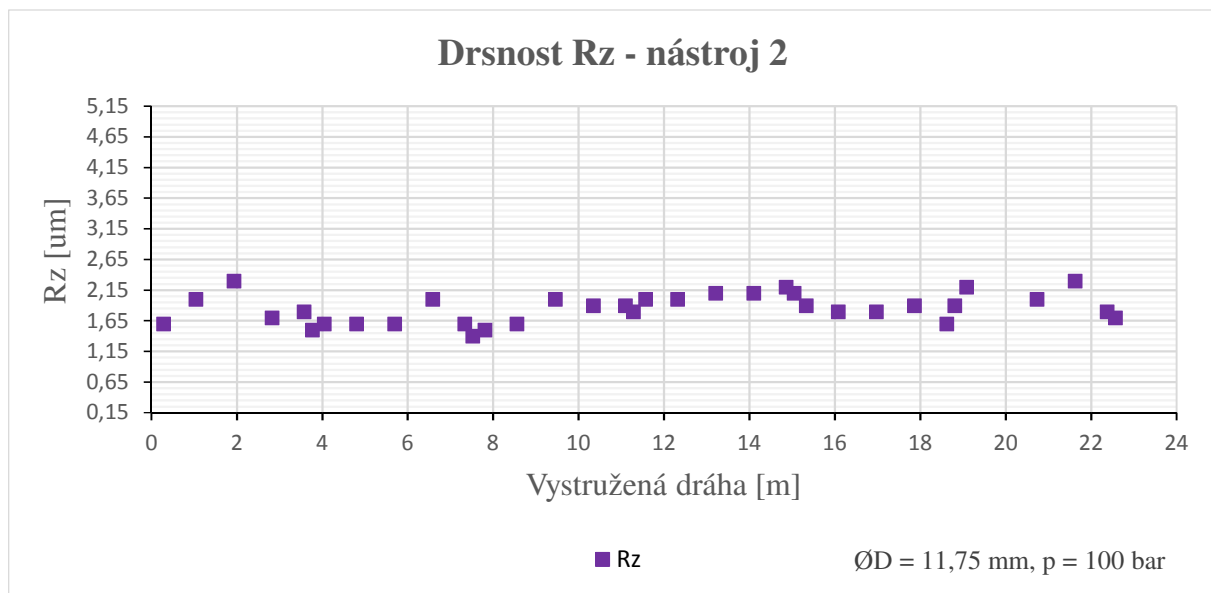
Obrázek 48. Efekt faktoru tlaku na drsnost Ra

4.9.2 Drsnost Rz

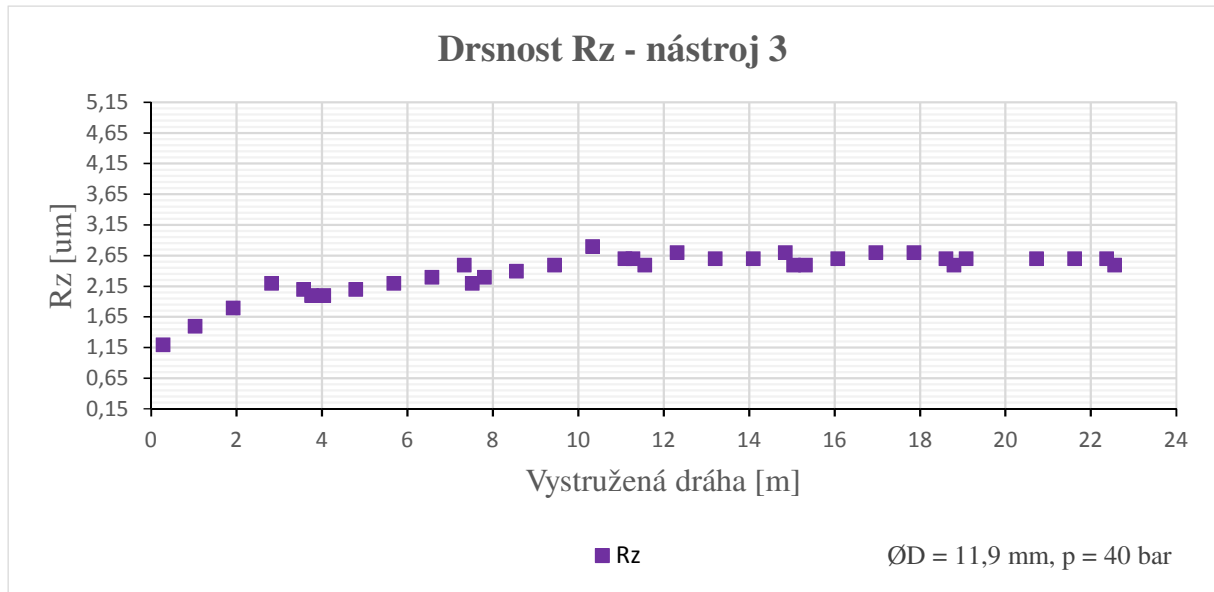
Na drsnoměru byla také měřena drsnost Rz. Přestože nebývá uváděna na výkresech, je tento parametr z hlediska kvality povrchu důležitější než drsnost Ra. Jedná se o střední hloubku drsnosti. Hodnoty z drsnoměru jsou uvedené v grafech na obrázcích 49 až 53. Všechny hodnoty jsou uvedené v příloze 9.



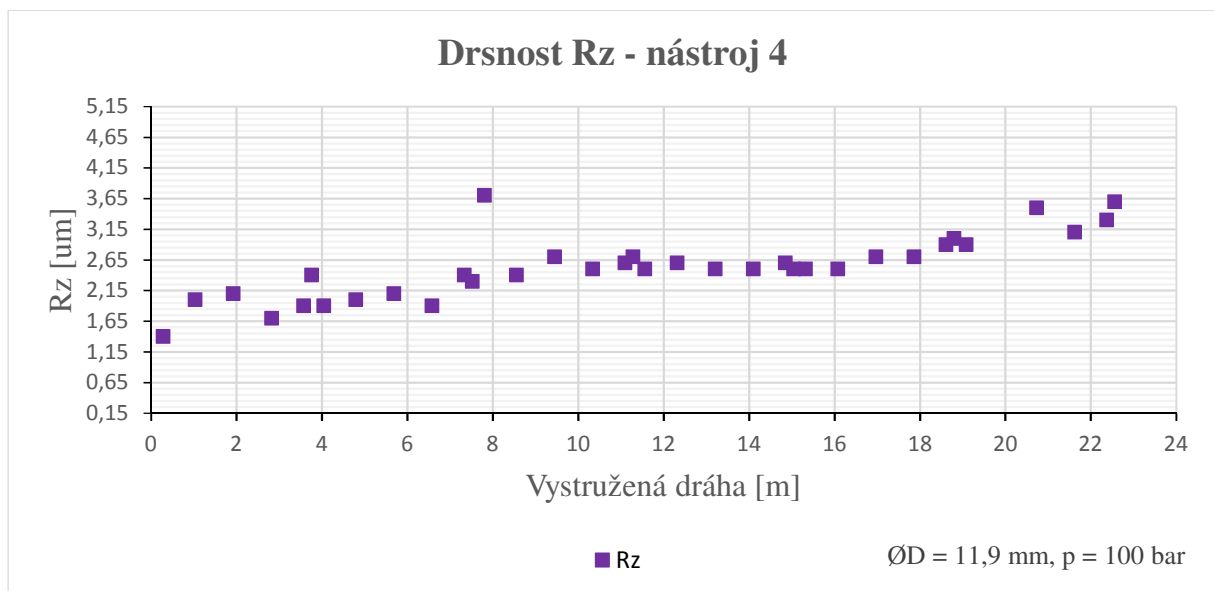
Obrázek 49. Drsnost Rz děr vystružených nástrojem č. 1



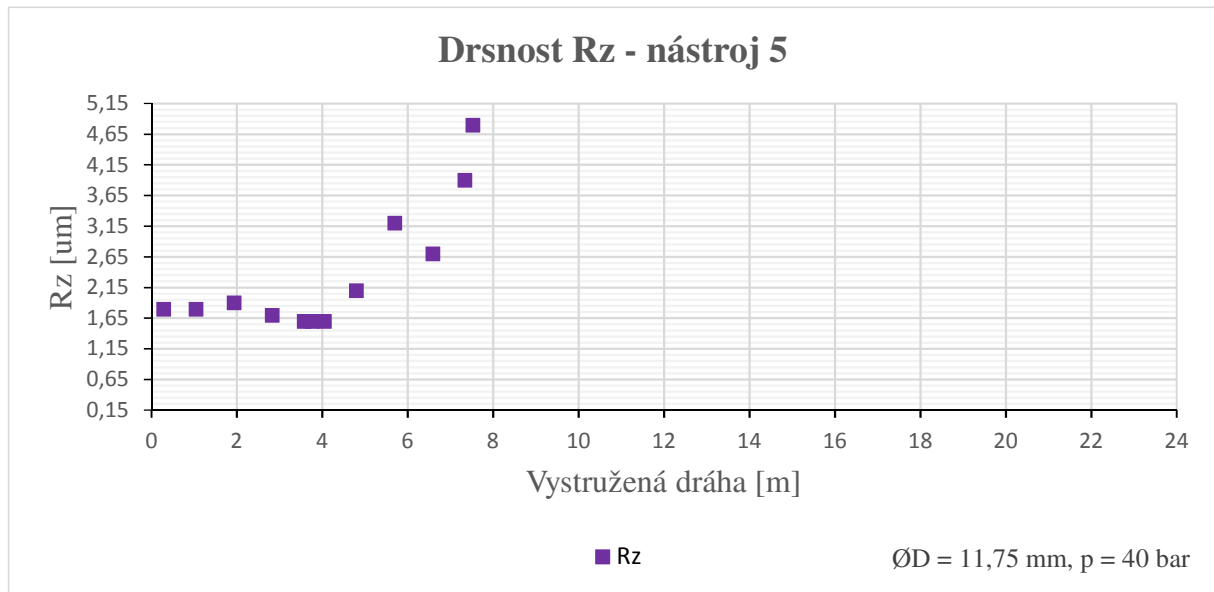
Obrázek 50. Drsnost Rz děr vystružených nástrojem č. 2



Obrázek 51. Drsnost Rz děr vystružených nástrojem č. 3

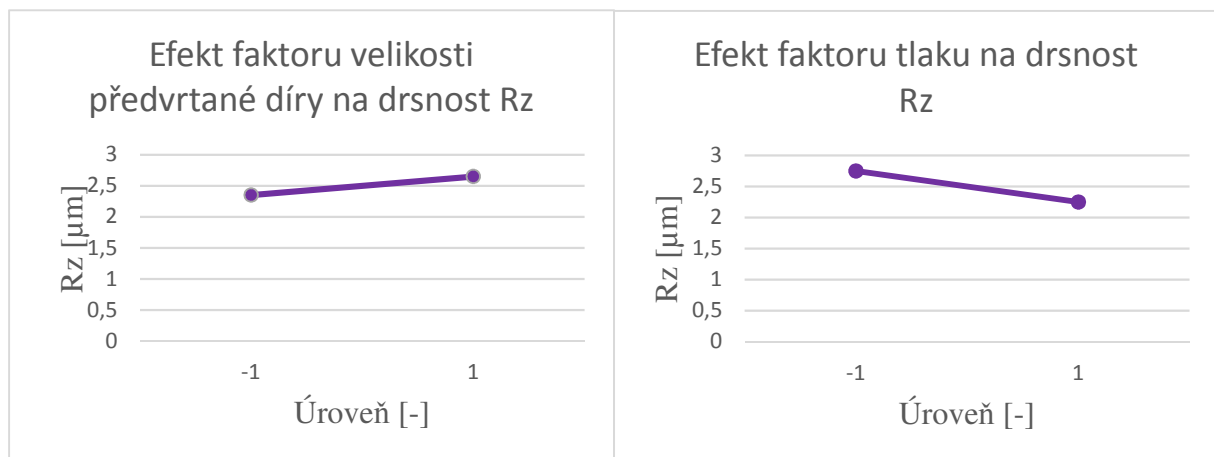


Obrázek 52. Drsnost Rz děr vystružených nástrojem č. 4



Obrázek 53. Drsnost Rz děr vystružených nástrojem č. 5

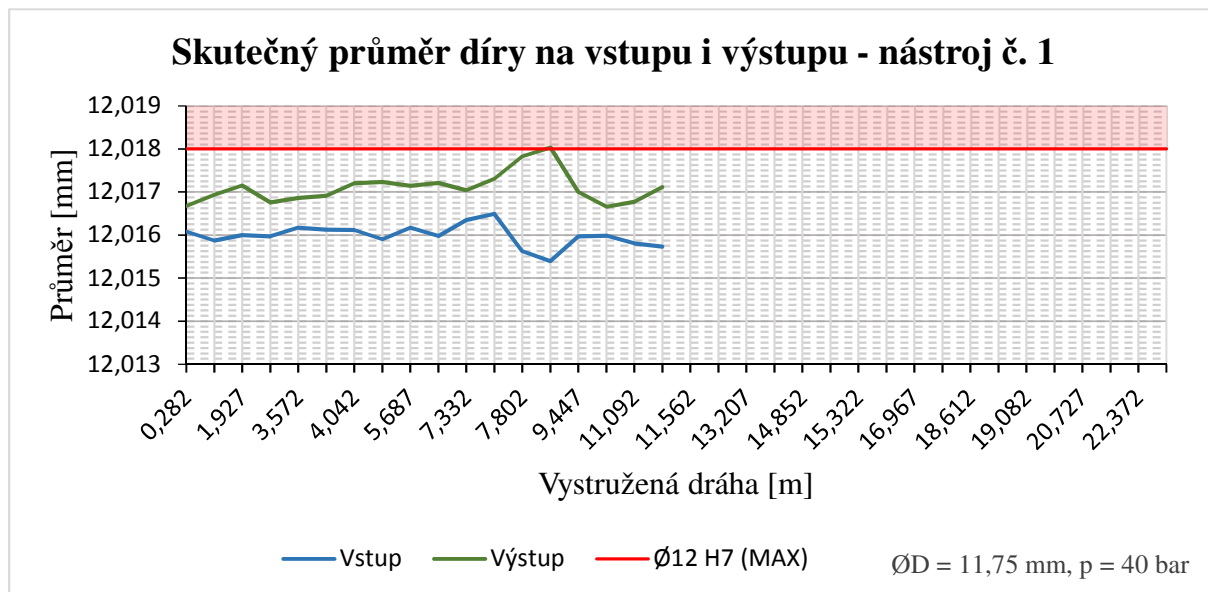
Hodnoty drsnosti Rz mají podobný průběh jako hodnoty Ra. S klesající hodnotou přídavku narůstají hodnoty Rz a s rostoucím tlakem procesní kapaliny hodnoty Rz klesají. To je opět podloženo i statistikou (viz obr. 54 a 55).



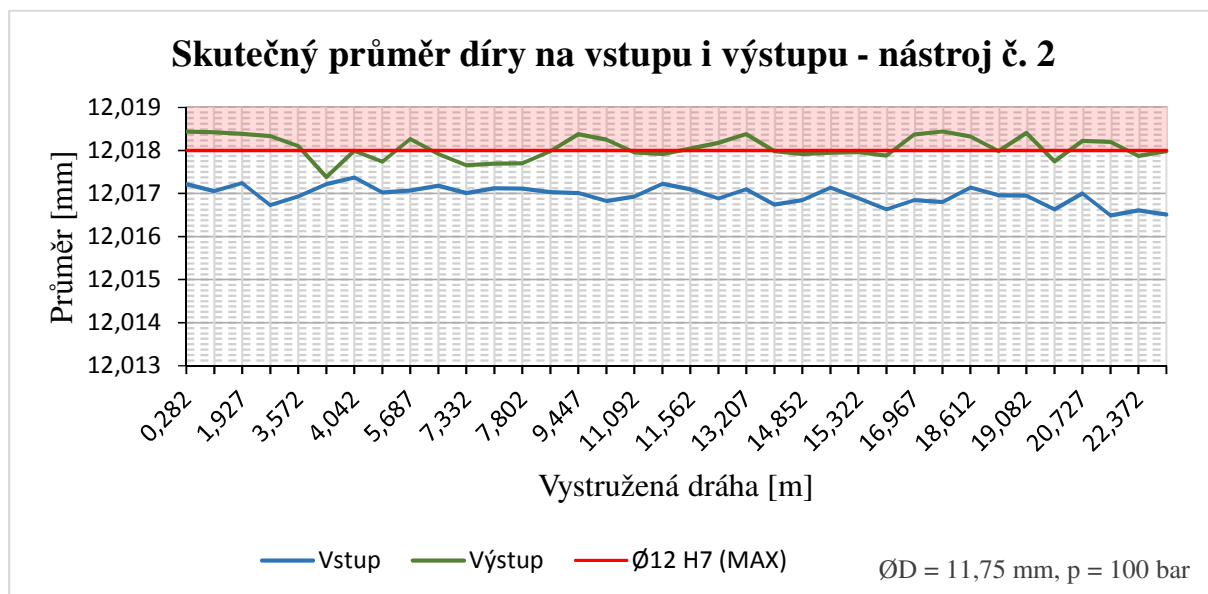
Obrázek 54. Efekt faktoru velikosti předvrtané díry na drsnost Rz
Obrázek 55. Efekt faktoru tlaku na drsnost Rz

4.9.3 Skutečný průměr díry na vstupu a výstupu

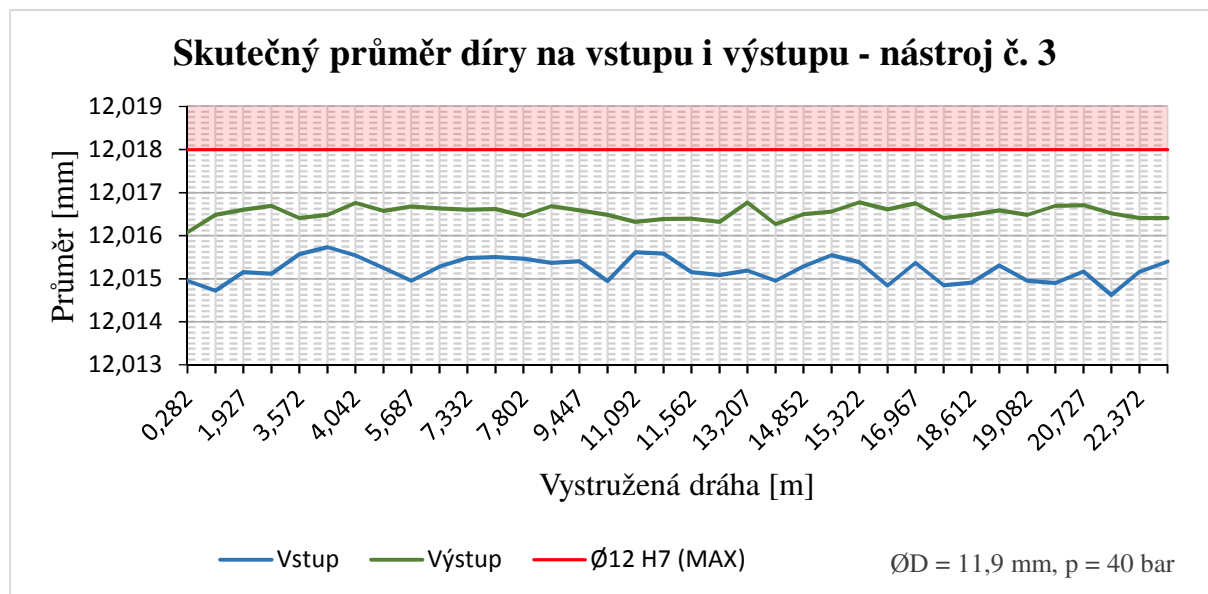
Hodnoty průměrů vystružených děr na vstupu a výstupu jsou zobrazeny v grafech na obrázcích 56 až 60. V grafu je červenou čarou vyznačen také horní mezní rozměr pro $\varnothing 12H7$. Spodní hranice zde není vyznačena kvůli přehlednosti grafů. Dolní mezní rozměr pro $\varnothing 12H7$ je rovných 12 mm. Konkrétní hodnoty jsou uvedené v příloze 10.



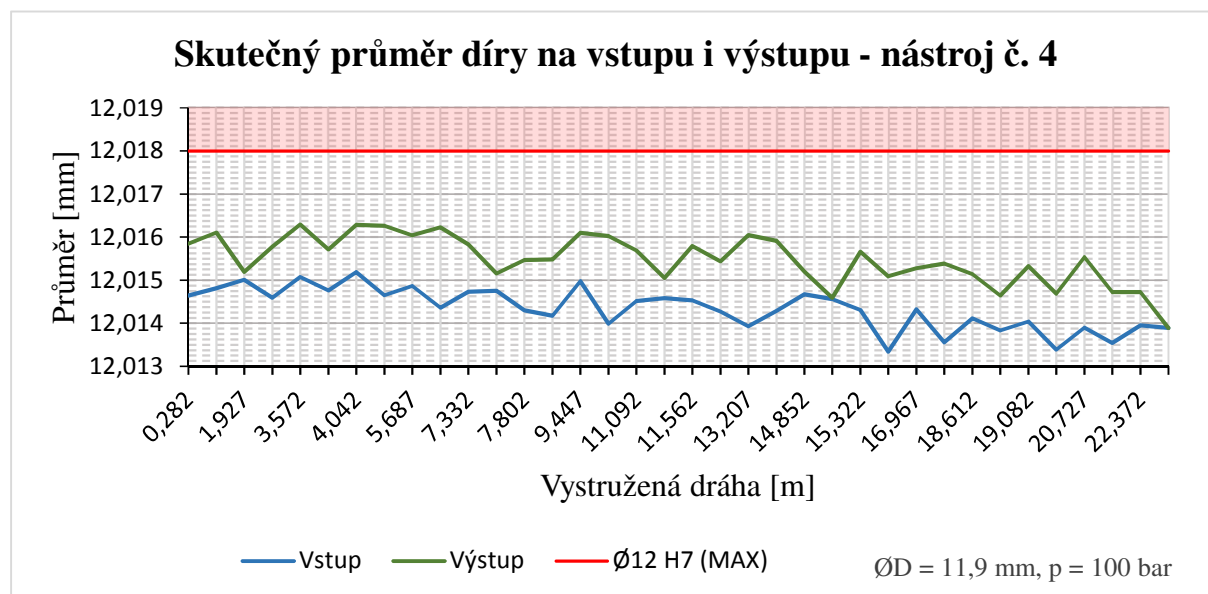
Obrázek 56. Hodnoty skutečného průměru díry na vstupu a výstupu – nástroj č. 1



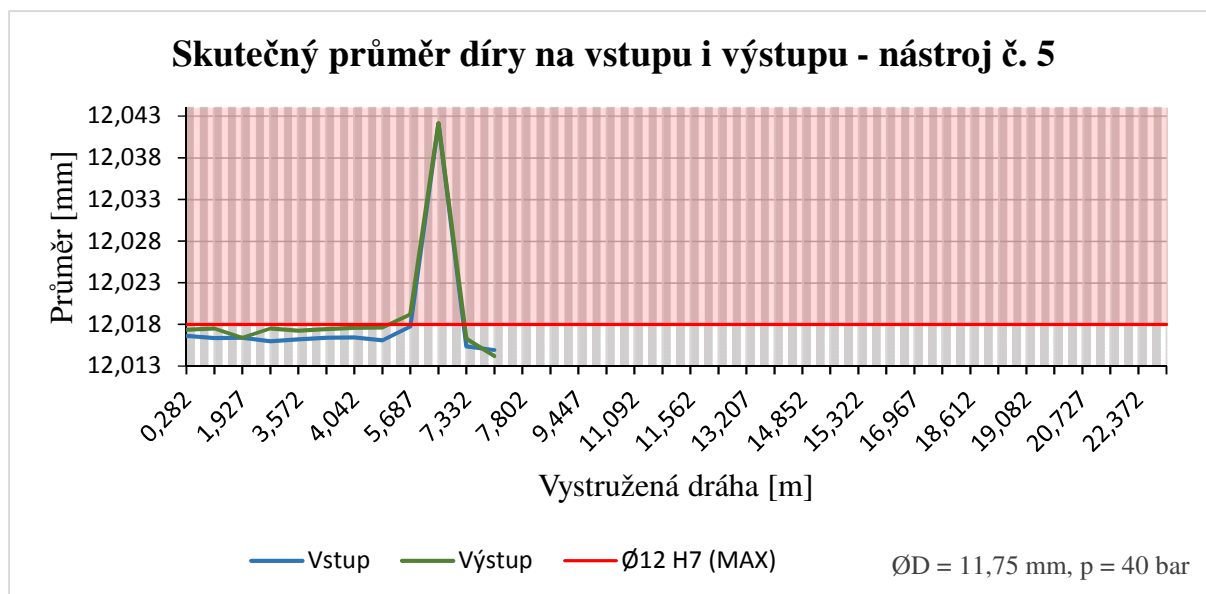
Obrázek 57. Hodnoty skutečného průměru díry na vstupu a výstupu – nástroj č. 2



Obrázek 58. Hodnoty skutečného průměru díry na vstupu a výstupu – nástroj č. 3



Obrázek 59. Hodnoty skutečného průměru díry na vstupu a výstupu – nástroj č. 4

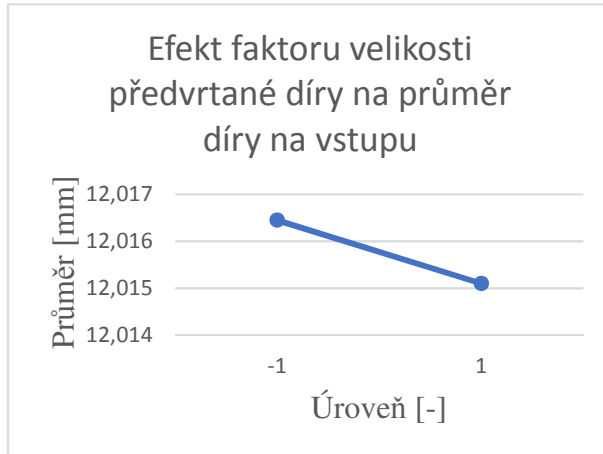


Obrázek 60. Hodnoty skutečného průměru díry na vstupu a výstupu – nástroj č. 5

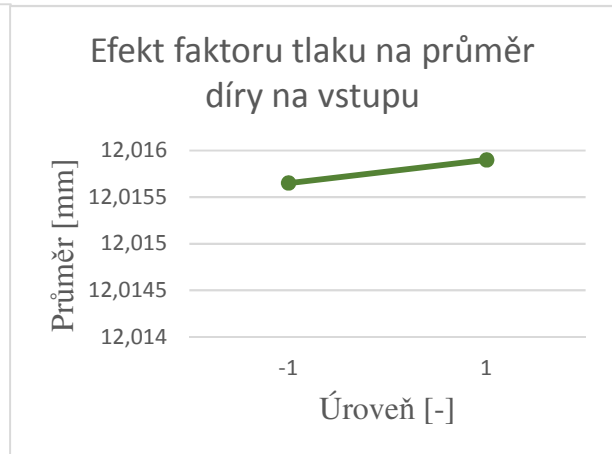
Z grafů je patrné, že všechny nástroje, kromě nástroje č. 2, se pohybovaly pod horním mezním rozměrem jak na vstupu, tak i na výstupu. Hodnoty nástroje č. 2 na vstupu jsou těsně pod horním mezním rozměrem, avšak hodnoty na výstupu kolísají kolem horní hranice tolerančního pole. V tolerančním poli se pohybovaly dokonce i výstružníky, u kterých došlo k odštípnutí řezného břítu. U nástroje č. 5 lze náhlou změnu u průměru díry označit za hrubou chybu měření.

Pro hodnoty na vstupu i na výstupu má vliv jak velikost předvrtané díry, tak i tlak řezné kapaliny. S rostoucím přídatkem se zvětšuje průměr vystružené díry na vstupu i na výstupu. V případě konstantního přídatku je skutečný průměr vystružené díry ovlivněn především opotřebním břítu. Vliv tlaku procesní kapaliny na skutečný průměr díry zde není jednoznačný.

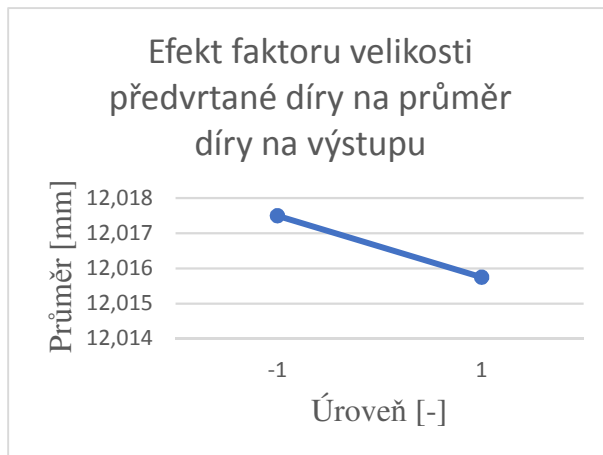
Statistické vyhodnocení je zobrazeno na obrázcích 61 až 64. I zde je vidět, že s klesajícím přídatkem klesá průměr vystružené díry na vstupu i výstupu. A také, že s rostoucím tlakem řezné kapaliny roste průměr obrobene díry na vstupu a zároveň klesá průměr díry na výstupu. Velikost předvrtané díry má mnohem větší vliv na výsledný skutečný průměr vystružené díry než tlak procesní kapaliny.



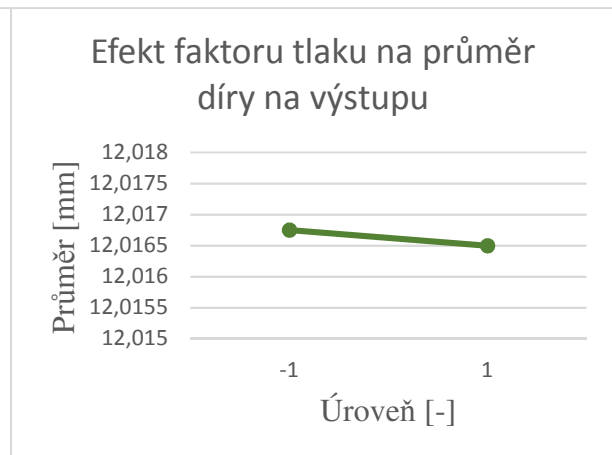
Obrázek 61. Efekt faktoru velikosti předvrtané díry na průměr díry na vstupu



Obrázek 62. Efekt faktoru tlaku na průměr díry na vstupu



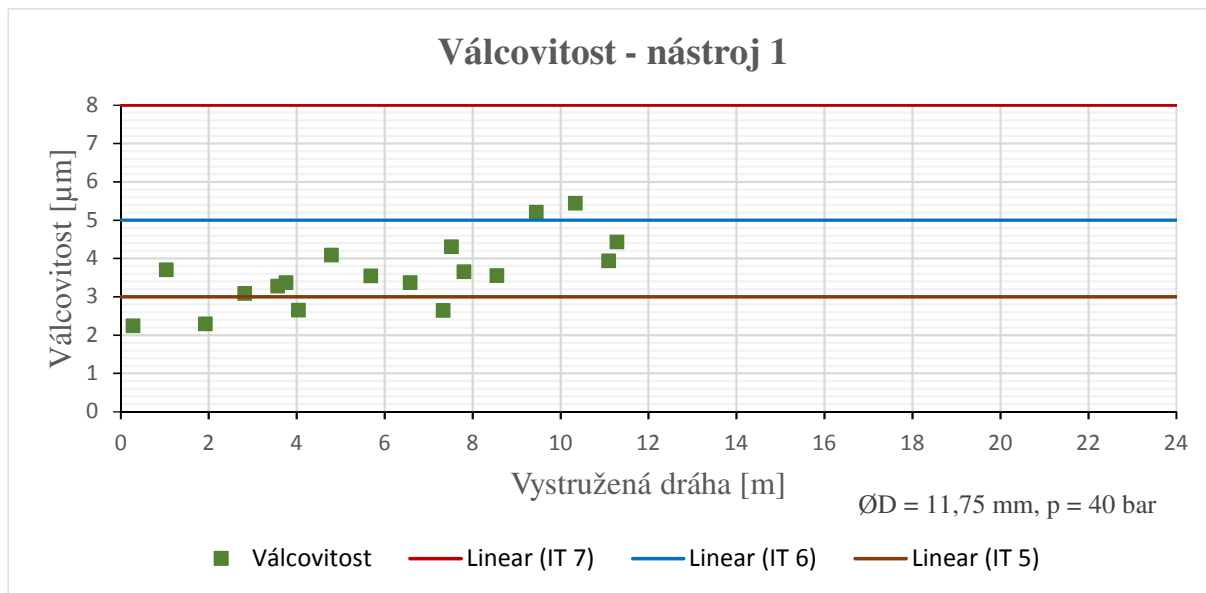
Obrázek 63. Efekt faktoru velikosti předvrtané díry na průměr díry na výstupu



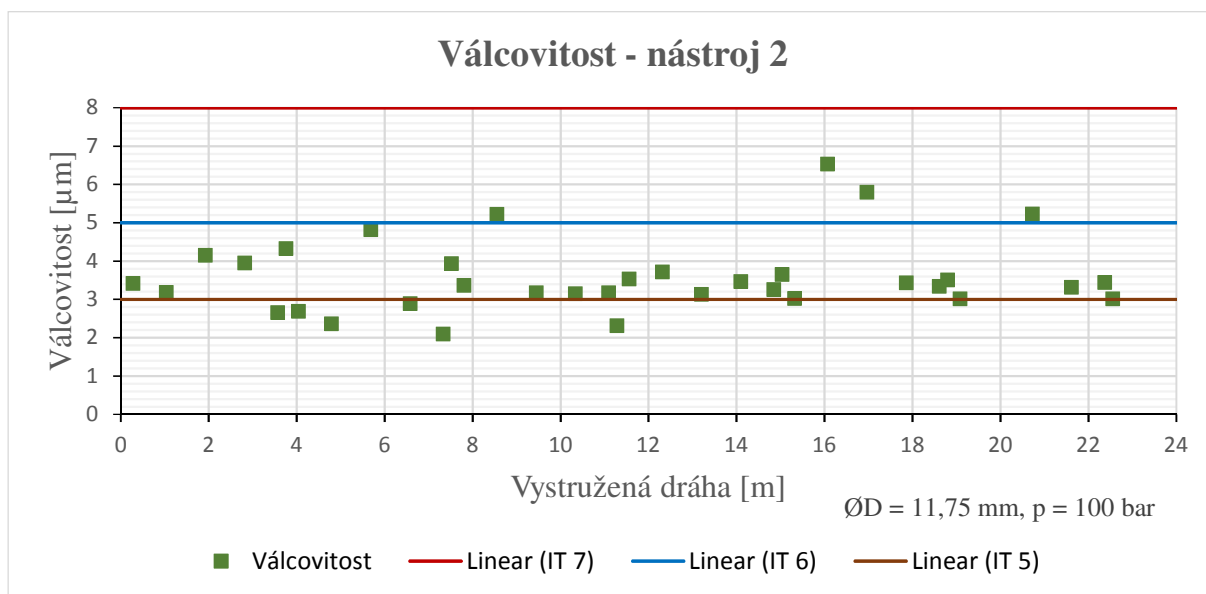
Obrázek 64. Efekt faktoru tlaku na průměr díry na výstupu

4.9.4 Válcovitost

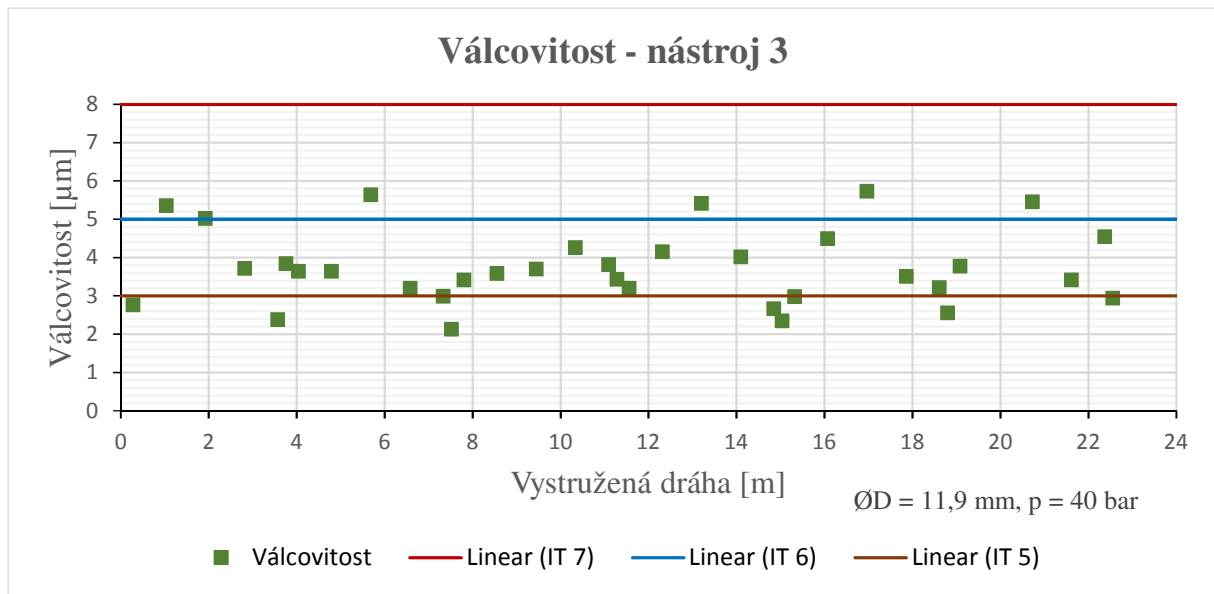
Posledním sledovaným parametrem byla válcovitost vystružené díry. Hodnoty naměřené na 3D měřícím stroji jsou zobrazeny v grafech na obrázcích 65 až 69 a číselné hodnoty jsou uvedeny v příloze 11. V grafu jsou také znázorněny kritériální hodnoty pro IT7, IT6 a IT5 určené normou ČSN 01 4455.



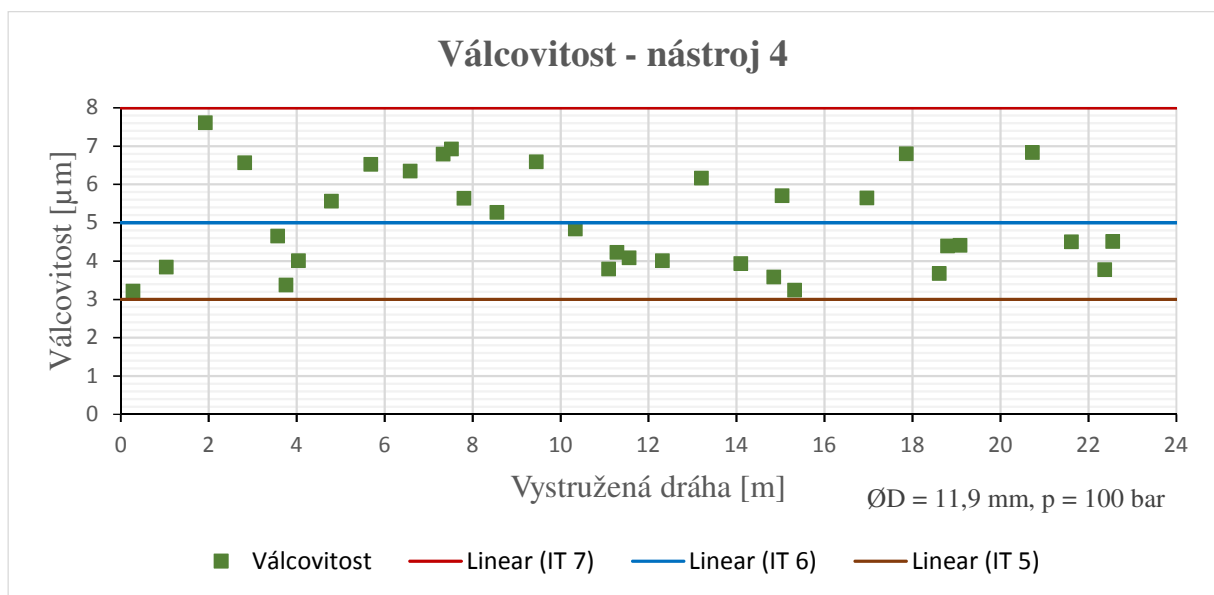
Obrázek 65. Válcovitost díry – nástroj č. 1



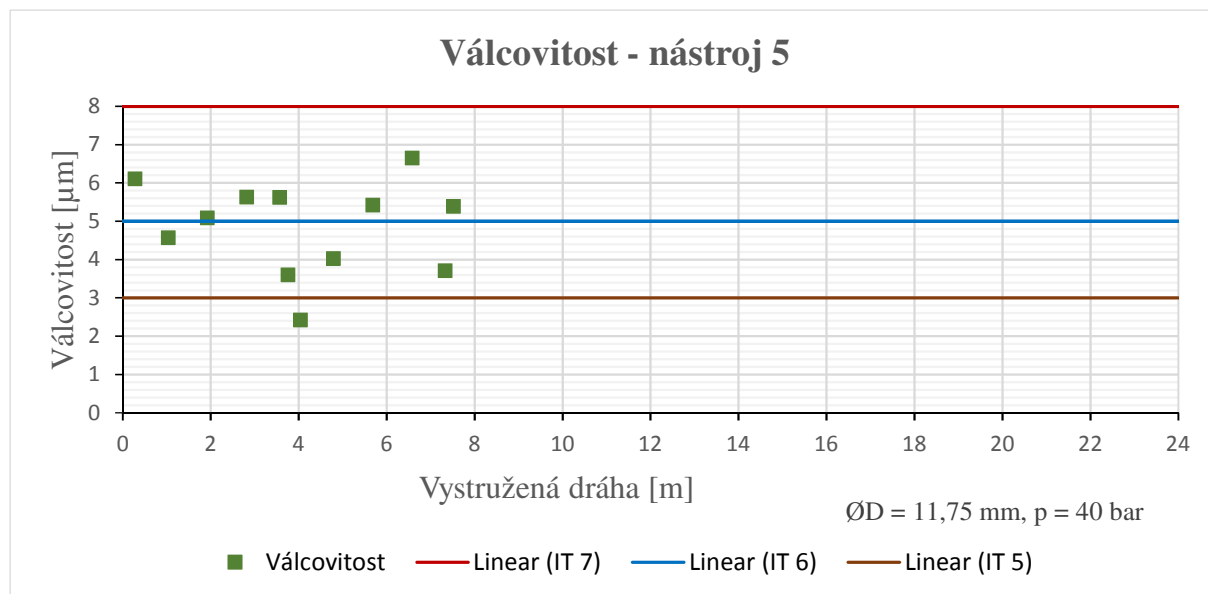
Obrázek 66. Válcovitost díry – nástroj č. 2



Obrázek 67. Válcovitost díry – nástroj č. 3



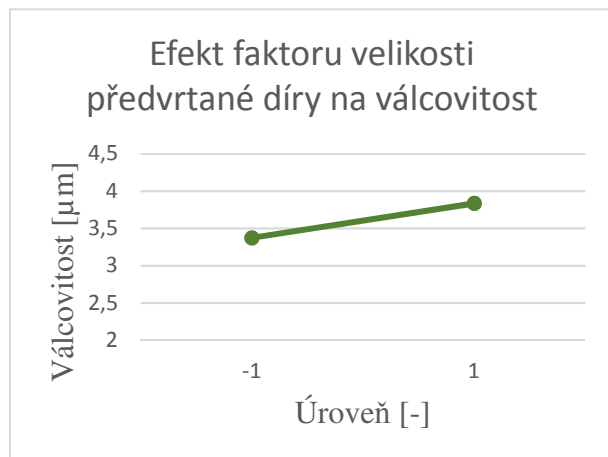
Obrázek 68. Válcovitost díry – nástroj č. 4



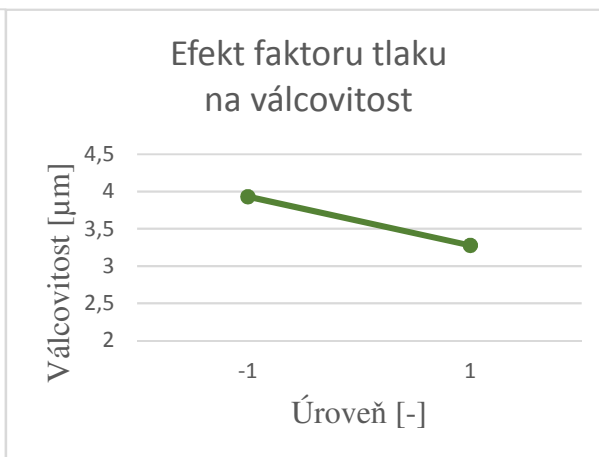
Obrázek 69. Válcovitost díry – nástroj č. 5

Jak je z grafů patrné, všechny výstružníky dosáhly požadované hodnoty válcovitosti, tj. $8 \mu\text{m}$. Nejlepších hodnot válcovitosti dosahoval výstružník č. 1. Pohyboval se dokonce na úrovni IT6. Zvýšením tlaku procesní kapaliny se neprojeví velké změny v naměřených hodnotách.

Na následujících grafech, na obrázcích 70 a 71, je zobrazeno statistické vyhodnocení vlivu tlaku a přídavku na hodnotu válcovitosti.



Obrázek 70. Efekt faktoru velikosti předvrtané na válcovitost



Obrázek 71. Efekt faktoru tlaku na válcovitost

5 Technicko-ekonomické zhodnocení

Cílem technicko-ekonomického hodnocení je nalézt co nejvýhodnější variantu řešení jak z hlediska technického, tak i z hlediska ekonomického. V současné době je v oblasti techniky velká konkurence, a proto je třeba dbát na snížení nákladů při zachování stejné kvality výroby.

V této diplomové práci byl sledován vliv vybraných faktorů na kvalitu vystružené díry a na opotřebení nástroje. Ekonomickým přínosem je již správná volba použitých nástrojů. Pro tuto práci byl zvolen VRV výstružník od firmy FINAL Tools s.r.o. Výhodou tohoto výstružníku je možnost výměny pouze cermetových řezných břitů. Ty jsou pájeny na karbidovém nástroji, který může zůstat zachován. Výměnu řezných břitů provádí sám výrobce.

V průběhu experimentu bylo sledováno opotřebení řezných břitů v závislosti na řezných podmínkách. Po ukončení experimentu byly proměřeny vystružené díry. Díky tomu lze doporučit optimální kombinaci tlaku řezné kapaliny a průměru předvrtané díry. Porovnání proběhne dle tabulky 20.

| | Nástroj 1 | | Nástroj 2 | | Nástroj 3 | | Nástroj 4 | |
|------------------------|-----------|-------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
| Ø předvrtané díry [mm] | 11,75 | | 11,75 | | 11,9 | | 11,9 | |
| Tlak [bar] | 40 | | 100 | | 40 | | 100 | |
| Vystružená dráha [m] | 11,28 | 22,56 | 11,28 | 22,56 | 11,28 | 22,56 | 11,28 | 22,56 |
| VB _{max} [µm] | LOM | X | 34 | 42 | 21 | 26 | 29 | 43 |
| Ra [µm] | 0,4 | X | 0,2 | 0,2 | 0,4 | 0,3 | 0,4 | 0,5 |
| Rz [µm] | 2,9 | X | 1,8 | 1,7 | 2,6 | 2,5 | 2,7 | 3,6 |
| Ø vstup [mm] | 12,0157 | X | 12,0172 | 12,0165 | 12,0156 | 12,0154 | 12,0146 | 12,0129 |
| Ø výstup [mm] | 12,0171 | X | 12,0179 | 12,0180 | 12,0164 | 12,0164 | 12,0151 | 12,0139 |
| Válcovitost [µm] | 4,427 | X | 2,321 | 3,018 | 3,437 | 2,9477 | 4,233 | 4,5176 |

Tabulka 20. Výsledné hodnoty po 240 a po 480 dírách

Jak je patrné z tabulky č. 20, u nástroje č. 1 došlo k odštípnutí řezných břitů. U nástroje č. 2 se hodnoty skutečného průměru vystružené díry dostaly na hranici horního mezního rozměru tolerančního pole IT7. Proto není vhodné doporučovat vystružování předvrtaných děr s vyšším přídávkem vrtané díry. Podmínky pro nástroj č. 3 a č. 4 jsou vyhovující. Avšak u nástroje č. 4 byl použit tlak 100 bar. Tento tlak není pro konvenční stroje běžný a zajištění tohoto tlaku by bylo nákladné. Proto jako optimální varianta je zvolena kombinace nižšího přídávku a nižšího tlaku.

6 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo objasnit vliv vybraných faktorů na kvalitu vystružené díry, a to ve vazbě na opotřebení řezného nástroje. Proměnnými parametry byly tlak řezné kapaliny a velikost přídavku pro vystružování.

V první části je uveden cíl diplomové práce a teoretický úvod do problematiky výroby velmi přesných děr vystružováním.

Ve druhé části práce byla provedena rešerše. Vzhledem k tomu, že problematika vystružování je na ZČU řešena již od roku 2012, byl vytvořen souhrn diplomových prací zaměřených na toto téma. Poté byly vyhledány práce a odborné články mimo ZČU. Ty byly vyhledávány především z elektronických informačních zdrojů, a to dle vybraných klíčových slov.

V další části byl již navržen vlastní experiment. Ten byl rozdělen na dvě části. V první části byl proveden pre-experiment, při kterém byl vyjádřen vliv více faktorů na sledované parametry. Z tohoto pre-experimentu pak vzešly podmínky pro stěžejní část diplomové práce. V té bylo úkolem určit vliv tlaku procesní kapaliny a velikosti předvrtané díry na sledované parametry a na opotřebení nástroje. Sledovanými parametry byla drsnost R_a , drsnost R_z , skutečný průměr díry na vstupu i na výstupu a válcovitost obrobené díry. Byl naplánován úplný faktorový experiment se dvěma úrovněmi. Díky tomu bylo možné porovnat skutečně naměřená data se statisticky vypočtenými průběhy. Experiment ve většině případů potvrdil matematicky vypočítané vlivy jednotlivých faktorů.

Předepsanou přesností pro vystruženou díru bylo toleranční pole IT7. V tabulce č. 21 jsou vypsány hodnoty dosažené různými podmínkami při vystružování.

U všech sledovaných parametrů bylo této přesnosti dosaženo. Výjimkou byl skutečný průměr díry na výstupu u nástroje č. 2. Zde byl zvolen vyšší přídavek a vyšší tlak. Problém byl také s výstružníkem č. 1, který při větším přídavku a nižším tlaku dokázal vystružit pouze část předpřipravených děr. Poté došlo k odštípnutí dvou řezných břitů. Z tohoto důvodu lze konstatovat, že velikost přídavku negativně ovlivňuje opotřebení nástroje. Vyšší tlak však působí pozitivně.

Vystružování děr s menším přídavkem dosahovalo všech požadovaných parametrů. Při menším přídavku a nižším tlaku řezné kapaliny dochází k menšímu opotřebení řezného břitu než při vyšším tlaku procesní kapaliny. Lepších hodnot dosahují také drsnost R_a , R_z a válcovitost vystružené díry. Naopak při použití menšího přídavku a vyššího tlaku řezné kapaliny je, v porovnání s menším přídavkem a menším tlakem, dosaženo lepších hodnot skutečného průměru vystružené díry.

Závěrečnou částí práce bylo technicko-ekonomické zhodnocení. Zde byly doporučeny optimální řezné podmínky pro vystružování. Ty byly vybírány jak z hlediska opotřebení řezného nástroje, tak z hlediska kvality vystružené díry.

| | Nástroj 1 | Nástroj 2 | Nástroj 3 | Nástroj 4 |
|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Ø předvrtané díry [mm] | 11,75 | 11,75 | 11,9 | 11,9 |
| Tlak [bar] | 40 | 100 | 40 | 100 |
| Vystružená dráha [m] | 11,28 | 22,56 | 22,56 | 22,56 |
| VB _{max} [µm] | LOM | 42 | 26 | 43 |
| Ra [µm] | 0,4 | 0,2 | 0,3 | 0,5 |
| Rz [µm] | 2,9 | 1,7 | 2,5 | 3,6 |
| Ø vstup [mm] | 12,0157 | 12,0165 | 12,0154 | 12,0129 |
| Ø výstup [mm] | 12,0171 | 12,0180 | 12,0164 | 12,0139 |
| Válcovitost [µm] | 4,427 | 3,018 | 2,9477 | 4,5176 |
| | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ |

Tabulka 21. Výsledné hodnoty experimentu

7 Použitá literatura

- [1] Internetové stránky Střední školy a Centra odborné přípravy technické Kroměříž [online]. 2018 [cit. 2017-11-20] Dostupné z www.coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=23122&revision=-1&instance=2
- [2] Internetové stránky Střední školy a Centra odborné přípravy technické Kroměříž [online]. 2018 [cit. 2017-12-10] Dostupné z www.coptkm.cz
- [3] Internetové stránky Construction 53 [online]. 2018 [cit. 2017-10-11] <http://www.construction53.com/2011/08/blueprint-understanding-industrial-blueprints/>
- [4] Reamers [online]., 1-5 [cit. 2018-05-24]. Dostupné z www.biancogianfranco.com/.../Reamers/Reamers.pdf
- [5] KROFT, Luboš. Produktivní vystružování moderními výstružníky I.. Plzeň, 2014
- [6] Internetové stránky Střední školy a Centra odborné přípravy technické Kroměříž [online]. 2018 [cit. 2017-11-20] Dostupné z www.coptkm.cz
- [7] Elektornická učebnice [online]. 2018 [cit. 2017-11-25] Dostupné z <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1821>
- [8] NEPRÁŠEK, Martin. Technologie výroby vysoce přesných otvorů vystružováním. Plzeň, 2013
- [9] ŠMEJKAL, Martin. Produktivní vystružování moderními výstružníky II.. Plzeň, 2014
- [10] PETRŮ, David. Produktivita vystružování ve firmě GTW Bearings s.r.o.. Plzeň, 2015
- [11] ROUB, Jan. Vliv vybraných technologických faktorů obrábění na integritu povrchu přesných děr – řezné podmínky při vystružování. Plzeň, 2017
- [12] LUČANÍK, Aleš. Apikace vystružovacích nástrojů s břity z cermetu a PVD povlakem. Brno, 2011
- [13] DE CHIFFRE, L.; TOSELLO, G.; PÍŠKA, M.; MULLER, P. Investigation on capability of the reaming process using minimal quantity lubrication. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol.2, (2009), No.1, pp.47-54, ISSN 1755-5817, Elsevier
- [14] Müller P.; Genta G.; Barbato G.; De Chiffre L.; Levi R.. Reaming process improvement and control: an application of statistical engineering. - ISSN 1755-5817. -STAMPA. - 5:3(2012), pp. 196-201.
- [15] PECHÁČEK, Miroslav. Vliv řezných kapalin na výsledky obrábění. Zlín, 2009
- [16] HORT, Martin. Technologické, ekonomické a ekologické aspekty obrábění s vysoce výkonným chlazením. Brno, 2009
- [17] Internetové stránky spol. DMG MORI [online]. 2018 [cit. 2018-04-25] Dostupné z <https://cz.dmgmori.com/products/lathes/turn-mill-complete-machining-centres/ctx-tc/ctx-beta-1250-tc-4a>

- [18] Internetové stránky spol. T-PROM s.r.o [online]. 2015 [cit. 2018-04-25] Dostupné z <http://www.tprom.cz/wiki/ocel/15142>
- [19] Internetové stránky RTI [online]. 2018 [cit. 2018-04-28] Dostupné z http://www.rti.zcu.cz/laboratore/ldm/vybaveni_ldm.html
- [20] Internetové stránky společnosti JENOPTIK AG [online]. 2015 [cit. 2018-04-28] Dostupné z <https://www.jenoptik.com/products/metrology/roughness-and-contour-measurement/contour-measuring/t8000c>

PŘÍLOHY K DIPLOMOVÉ PRÁCI

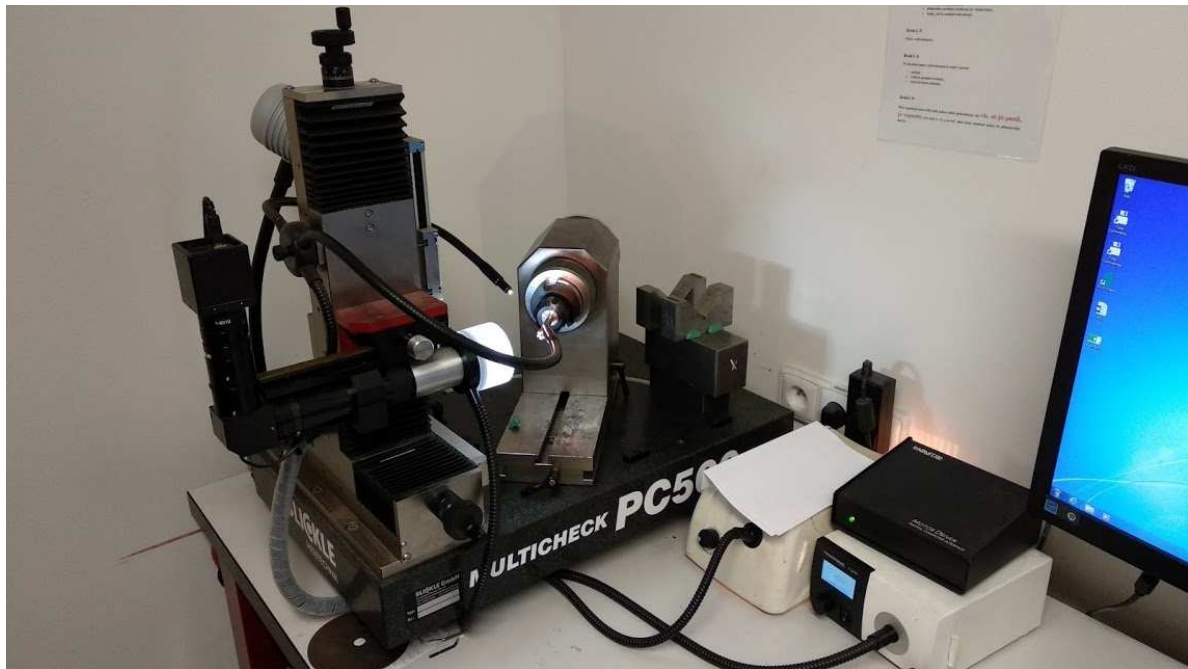
Vliv tlaku procesní kapaliny a přídavku na rozměrové a kvalitativní parametry
vystružené díry ve vazbě na opotřebení nástroje

Obsah

| | | |
|---------------|---|-------|
| Příloha č. 1 | Dílenský mikroskop BLICKLE Multicheck PC 500..... | III |
| Příloha č. 2 | Drsnoměr Hommel Etamic T8000..... | V |
| Příloha č. 3 | Vzduchový měřicí přístroj Millimar S1840..... | VII |
| Příloha č. 4 | Multifunkční soustružnické centrum CTX beta 1250 TC 4A..... | IX |
| Příloha č. 5 | CMM Carl Zeiss Prismo 7 Navigator..... | XI |
| Příloha č. 6 | Opotřebení řezných břitů..... | XIII |
| Příloha č. 7 | Protokol z měření na drsnoměru | XVIII |
| Příloha č. 8 | Hodnoty drsností Ra..... | XX |
| Příloha č. 9 | Hodnoty drsností Rz..... | XXII |
| Příloha č. 10 | Hodnoty skutečného průměru díry..... | XXIV |
| Příloha č. 11 | Hodnoty válcovitosti..... | XXVII |

PŘÍLOHA č. 1

Dílenský mikroskop BLICKLE Multicheck PC 500



Obrázek P.1 - Dílenský mikroskop BLICKLE

Upínané nástroje

Typ provedení

Rozsah v ose x

Rozsah v ose y

Možnost natáčení nástroje vůči objektivu

Počet vyměnitelných objektivů

Zvětšení vyměnitelných objektivů

Hodnocení měřených veličin

rotační i nerotační nástroje

horizontální

0 – 150 mm

0 – 150 mm

0°- 90°

4

10x, 30x, 75x, 150x

software WMS

PŘÍLOHA č. 2

Drsnoměr Hommel Etamic T8000



Obrázek P.2 - Drsnoměr Hommel Etamic T8000 [21]

Posuv - Waveline 120

| | |
|--------------------------|------------------------|
| Max. dráha | 120 mm |
| Posuvová rychlost | 0,1-3 mm/s |
| Rozlišení měření | 0,01/0,1 μm |

Sloup - Wavelift 400

| | |
|-----------------|---------------|
| Pojezd | 400 mm |
| Rychlost | 0,1 - 12 mm/s |

Profiloměr - Wavecontour

| | |
|--------------------------|--------------------|
| Max. zdvih | 60 mm |
| Rozlišení v ose Z | 0,05 μm |

PŘÍLOHA č. 3

Vzduchový měřicí přístroj Millimar S1840



Obrázek P.3 - Vzduchový měřicí přístroj Millimar S1840

| | |
|--------------------------------------|---|
| Analogový ukazatel | 101 LED kontrolky, 3 barvy |
| Zobrazení měřené hodnoty | 7místný LCD |
| Rozsahy zobrazení | $\pm 10, 30, 100, 300, 1000, 3000, 10000$ [μm] |
| Zobrazení tolerance | změnou barvy analogového ukazatele |
| <i>Doba odezvy:</i> | |
| Měřená hodnota | 0,008 s |
| Analogový ukazatel | 0,02 s |
| Výstupy | 0,02 s |
| <i>Mezní chyby:</i> | |
| Desítkový stupnicový ukazatel | 1% (101 LED) |
| Číslicový ukazatel | 1% (101 LED) |
| Teplotní koeficient | $\pm 0,005\%$ / $^{\circ}\text{C}$ |
| Rozsah provozní teploty | 0 $^{\circ}\text{C}$ až 45 $^{\circ}\text{C}$ |
| <i>Parametry měřidla:</i> | |
| Rozměry cca | 487 x 47 x 144 mm |
| Hmotnost cca | 1,4 kg |

PŘÍLOHA č. 4

Multifunkční soustružnické centrum CTX beta 1250 TC 4A



Obrázek P.4 - CTX beta 1250 TC 4A [18]

| | |
|---|--|
| Výkon | 25/32 kW |
| Kroutící moment | 280/360 Nm |
| Max. průměr otáčení | 500 mm |
| Max. délka soustružení | 1200 mm |
| Integrovaný vřetenový motor s osou C | 5000 ot / min |
| Max. bar pracovní kapacity | 102 mm |
| Max. vřeteno otáčení vřetena | 20 000 ot / min |
| Max. počet nástrojových stanic | 80 |
| Přesnost polohování | do <math><6 \mu\text{m}</math> pakovatelnost až <math><2 \mu\text{m}</math> |
| Řídící systém | CNC řízení SIEMENS SINUMERIK 840D |
| Chlazení | 40 – 100 bar |

PŘÍLOHA č. 5

CMM Carl Zeiss Prismo 7 Navigator



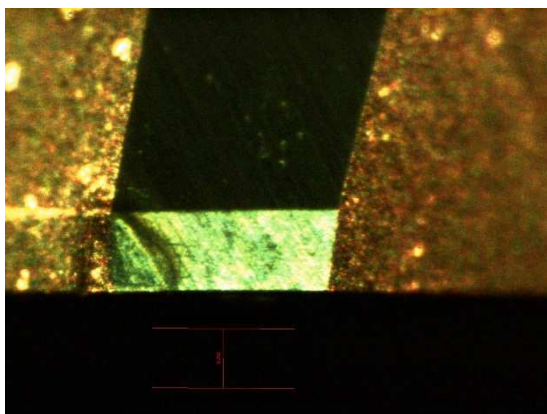
Obrázek P.4 - CMM Carl Zeiss Prismo 7 Navigator [20]

| | |
|-----------------------------------|------------------------------|
| Měřicí rozsah | 700 x 900 x 650 mm |
| Chyba měření délky E0 | od 0,9 + L/350 μm |
| Hmotnost měřených součástí | do 300 kg |

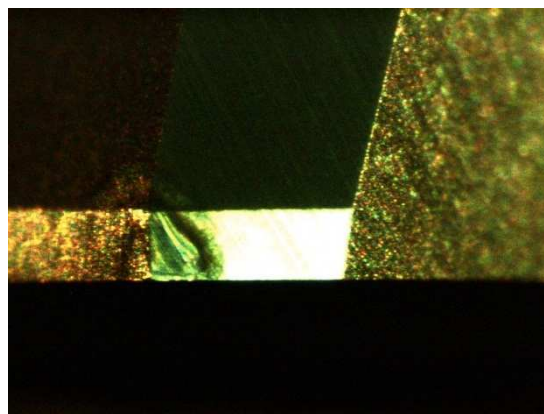
PŘÍLOHA č. 6

Opotřebení řezných břitů

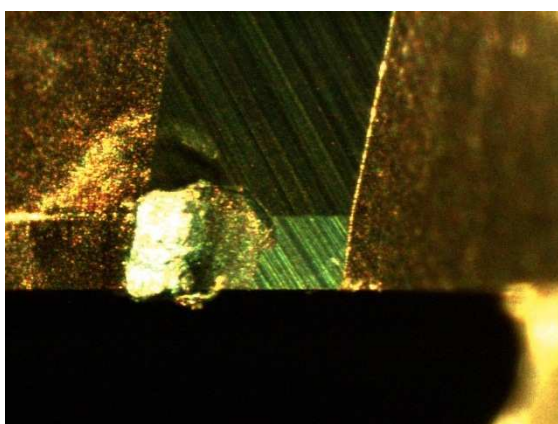
Nástroj 1



Obrázek P.6.1. Opotřebení - 80 děl - 14 μm

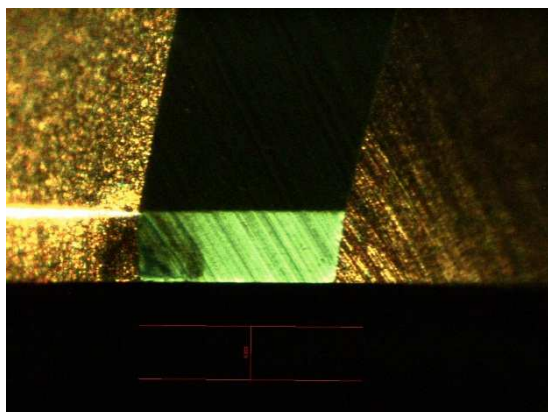


Obrázek P.6.2. Opotřebení – 160 děl - 16 μm

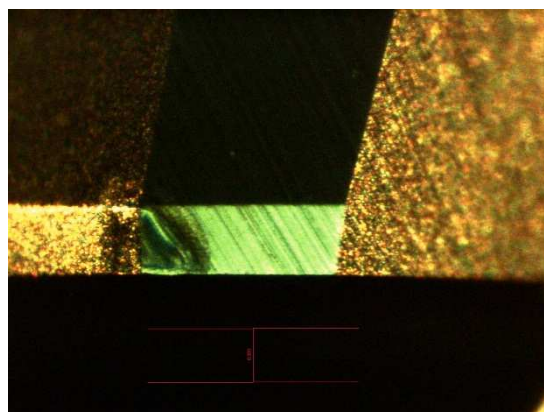


Obrázek P.6.3. Opotřebení – 320 děl - lom

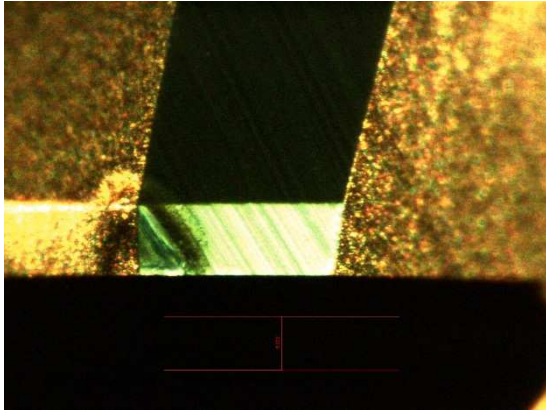
Nástroj 2



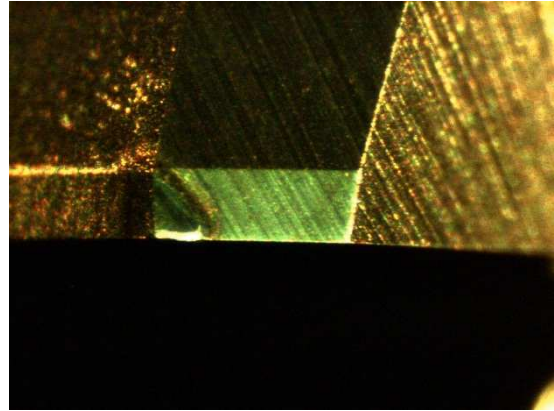
Obrázek P.6.4. Opotřebení - 80 děl - 19 μm



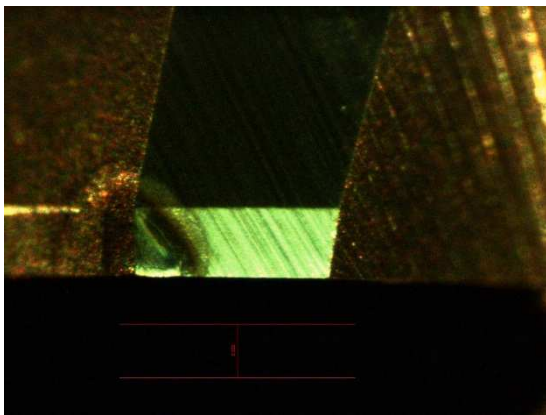
Obrázek P.6.5. Opotřebení - 160 děl - 29 μm



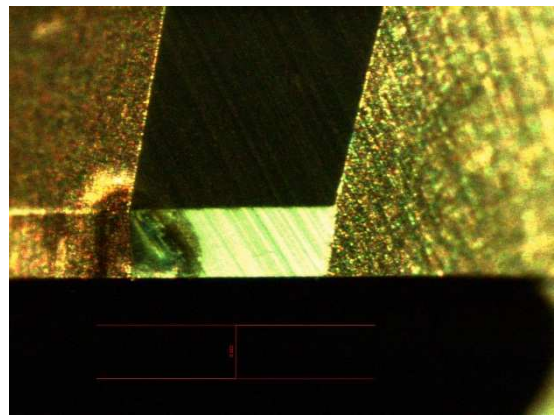
Obrázek P.6.6. Opotřebení – 240 děl - 34 μm



Obrázek P.6.7. Opotřebení – 320 děl - 38 μm

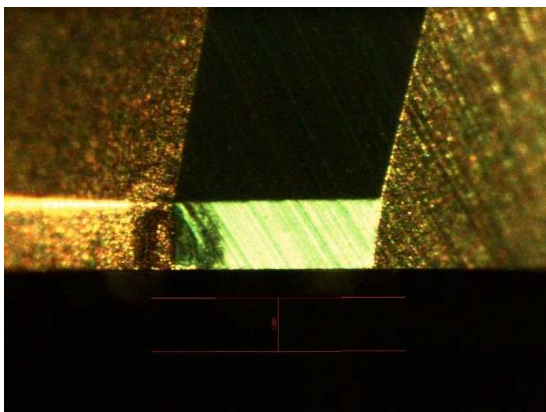


Obrázek P.6.8. Opotřebení – 400 děl - 42 μm

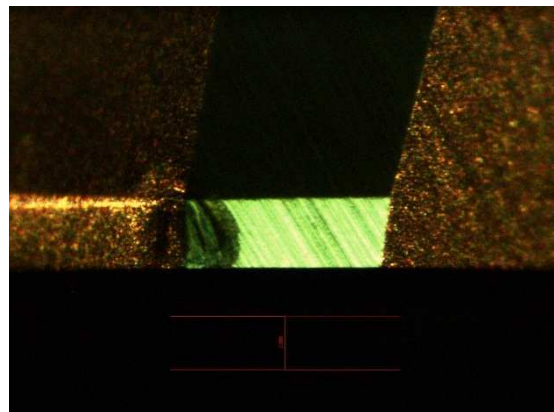


Obrázek P.6.9. Opotřebení – 480 děl - 42 μm

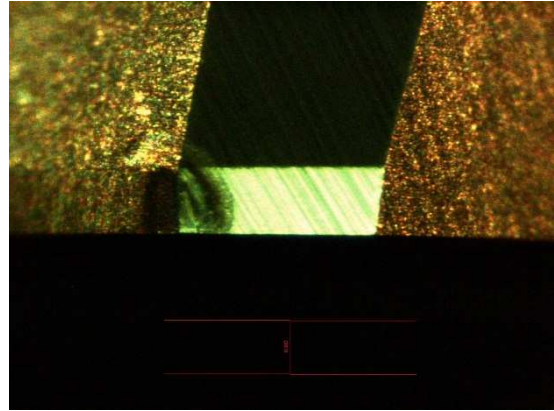
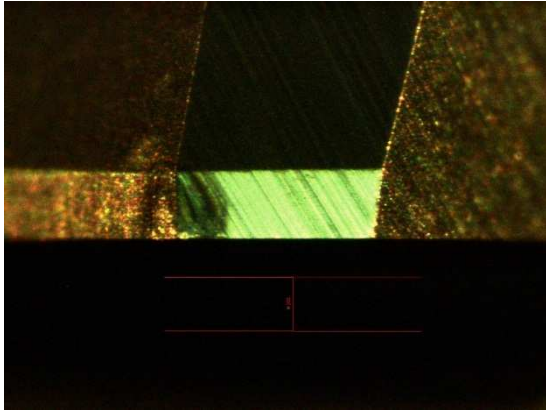
Nástroj 3



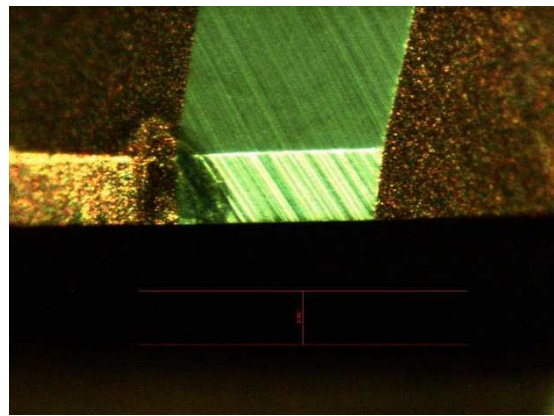
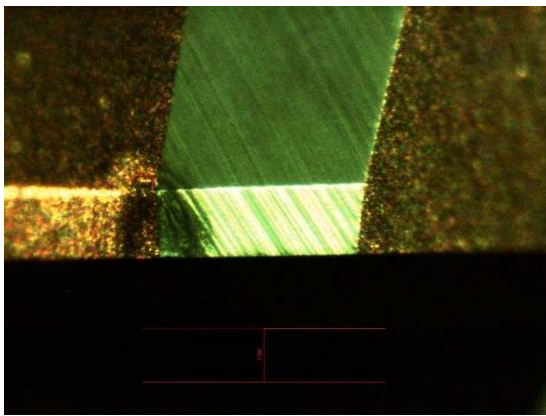
Obrázek P.6.10. Opotřebení - 80 děl - 19 μm



Obrázek P.6.11. Opotřebení - 160 děl - 19 μm

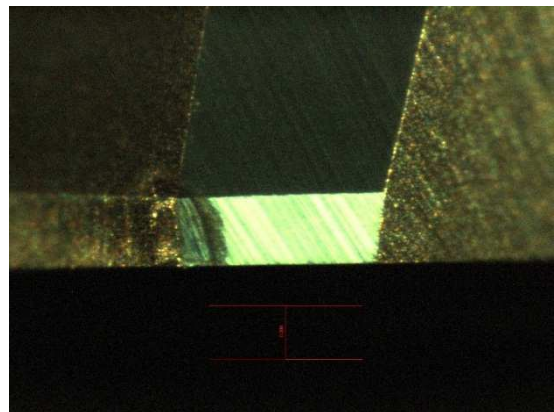
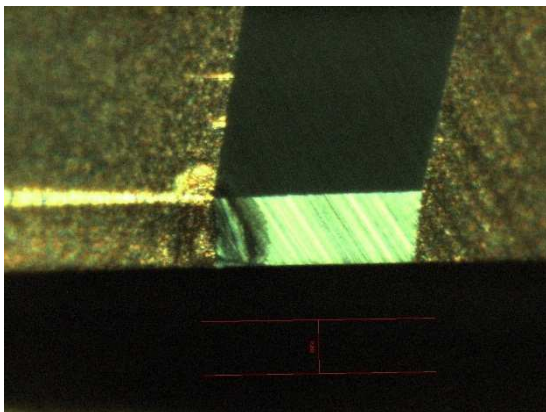


Obrázek P.6.12. Opotřebení –240 děl - 21 μm Obrázek P.6.13. Opotřebení – 320 děl - 21 μm

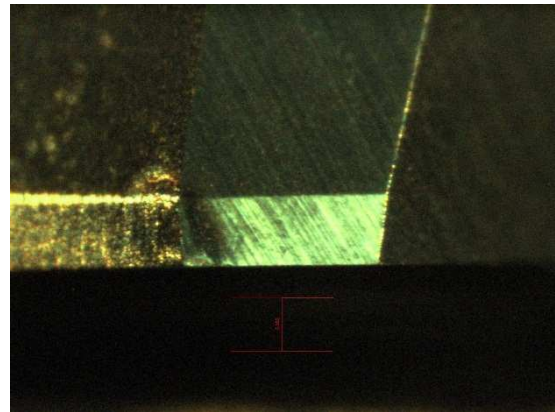
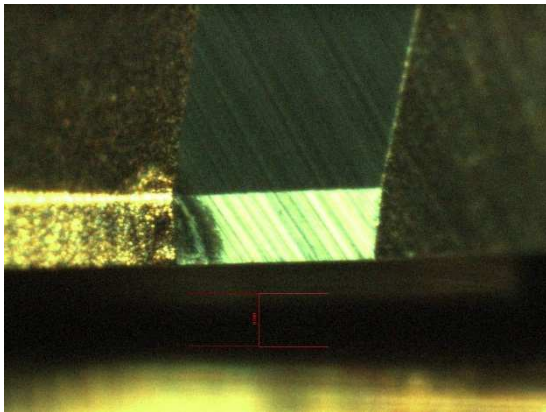


Obrázek P.6.14. Opotřebení – 400 děl - 26 μm Obrázek P.6.15. Opotřebení – 480 děl - 26 μm

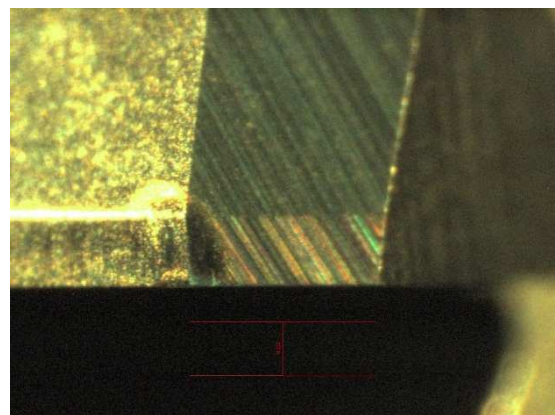
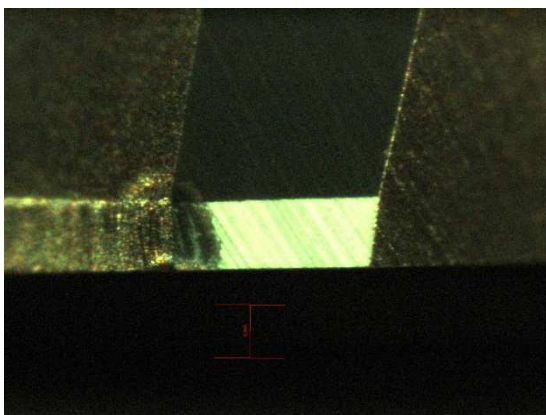
Nástroj 4



Obrázek P.6.16. Opotřebení - 80 děl - 21 μm Obrázek P.6.17. Opotřebení - 160 děl - 24 μm

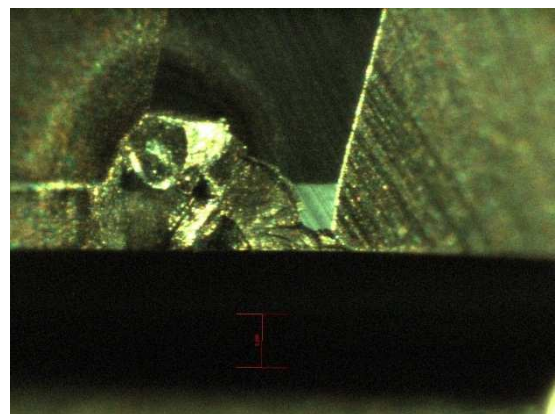
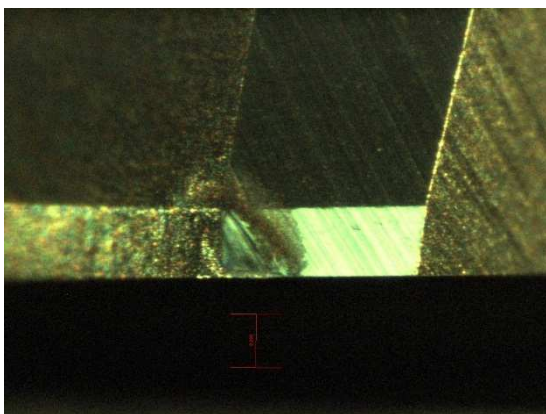


Obrázek P.6.18. Opotřebení – 240 děl - 29 μm Obrázek P.6.19. Opotřebení – 320 děl - 39 μm



Obrázek P.6.20. Opotřebení – 400 děl - 39 μm Obrázek P.6.21. Opotřebení – 480 děl - 43 μm

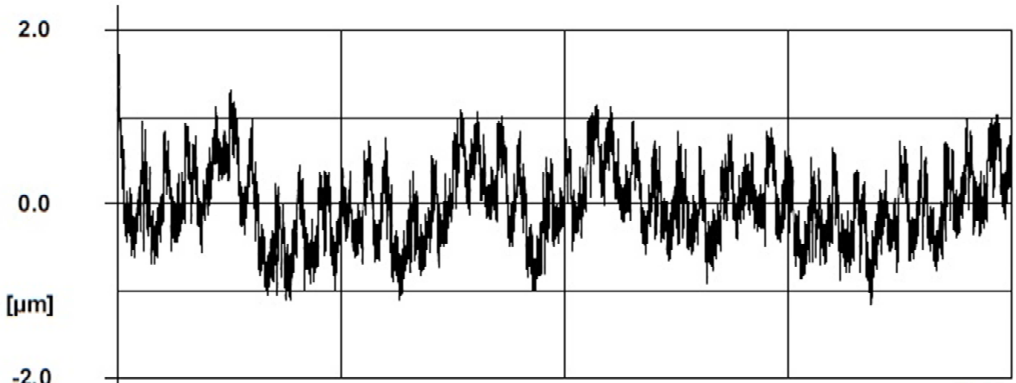
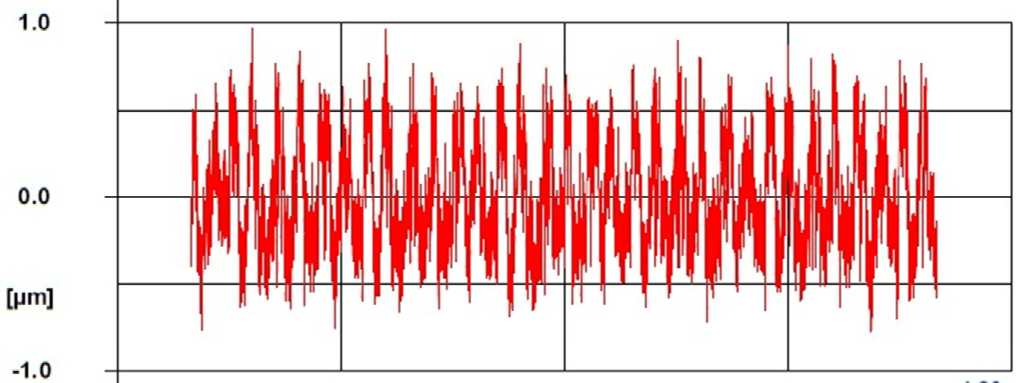
Nástroj 5



Obrázek P.6.22. Opotřebení - 80 děl - 18 μm Obrázek P.6.23. Opotřebení - 160 děl - 10 μm

PŘÍLOHA č. 7

Protokol z měření na drsnoměru

| Měřicí protokol | | | |
|--|--|--|-------------------|
| HOMMEL-ETAMIC TURBO WAVE V7.45 Měricí podmínky Snímac: TKU300 Mer.rozsah: 800 µm Lineární pos. přístroj: waveline 120 Měricí dráha (Lt) : 4.80 mm Posuvová rychlost (Vt): 0.50 mm/s Mer.hodnoty: 48000 | | Zakazník: A | |
| P- Profil vyrovnan Lc/Ls = VYP | | | |
|  | | | |
| Snímac TKU300 Lt = 4.80 mm Vt = 0.50 mm/s 4.80 | | | |
| Pt 2.9 µm Pz 2.5 µm Pa 0.4 µm PSm 0.1300 mm | Rz 1.6 µm Ra 0.3 µm RSm 0.0363 mm Rq 0.3 µm | Wt 1.1 µm Wz 0.8 µm Wa 0.2 µm WSm 0.7508 mm | |
| R- Profil vyrovnan Filtr ISO 11562 Lc = 0.250 mm | | | |
|  | | | |
| Snímac TKU300 Lt = 4.80 mm Vt = 0.50 mm/s 4.80 | | | |
| Měřil: | | | 10.05.18 14:22 |

PŘÍLOHA č. 8

Hodnoty drsností Ra

| Vystružená dráha [m] | Ra [μm] nástroj 1 | Ra [μm] nástroj 2 | Ra [μm] nástroj 3 | Ra [μm] nástroj 4 | Ra [μm] nástroj 5 |
|----------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 0,282 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| 1,034 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,3 |
| 1,927 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,3 |
| 2,82 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,2 |
| 3,572 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,2 |
| 3,76 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,2 |
| 4,042 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,2 |
| 4,794 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| 5,687 | 0,3 | 0,2 | 0,4 | 0,3 | 0,3 |
| 6,58 | 0,3 | 0,2 | 0,4 | 0,3 | 0,2 |
| 7,332 | 0,3 | 0,2 | 0,4 | 0,3 | 0,4 |
| 7,52 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 |
| 7,802 | 0,3 | 0,2 | 0,4 | 0,4 | |
| 8,554 | 0,3 | 0,2 | 0,4 | 0,4 | |
| 9,447 | 0,4 | 0,3 | 0,4 | 0,4 | |
| 10,34 | 0,3 | 0,2 | 0,4 | 0,4 | |
| 11,092 | 0,4 | 0,2 | 0,4 | 0,4 | |
| 11,28 | 0,4 | 0,2 | 0,4 | 0,4 | |
| 11,562 | | 0,3 | 0,4 | 0,4 | |
| 12,314 | | 0,2 | 0,4 | 0,4 | |
| 13,207 | | 0,2 | 0,4 | 0,4 | |
| 14,1 | | 0,3 | 0,4 | 0,4 | |
| 14,852 | | 0,2 | 0,4 | 0,4 | |
| 15,04 | | 0,2 | 0,4 | 0,4 | |
| 15,322 | | 0,2 | 0,4 | 0,4 | |
| 16,074 | | 0,2 | 0,3 | 0,4 | |
| 16,967 | | 0,2 | 0,4 | 0,4 | |
| 17,86 | | 0,3 | 0,3 | 0,5 | |
| 18,612 | | 0,2 | 0,3 | 0,5 | |
| 18,8 | | 0,3 | 0,3 | 0,5 | |
| 19,082 | | 0,3 | 0,3 | 0,4 | |
| 19,834 | | 0,2 | 0,3 | 0,5 | |
| 20,727 | | 0,2 | 0,3 | 0,6 | |
| 21,62 | | 0,2 | 0,3 | 0,5 | |
| 22,372 | | 0,2 | 0,3 | 0,5 | |
| 22,56 | | 0,2 | 0,3 | 0,5 | |

PŘÍLOHA č. 9

Hodnoty drsností Rz

| Vystružená dráha [m] | Rz [μm] nástroj 1 | Rz [μm] nástroj 2 | Rz [μm] nástroj 3 | Rz [μm] nástroj 4 | Rz [μm] nástroj 5 |
|----------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 0,282 | 1,3 | 1,6 | 1,2 | 1,4 | 1,8 |
| 1,034 | 2,2 | 2 | 1,5 | 2 | 1,8 |
| 1,927 | 2,3 | 2,3 | 1,8 | 2,1 | 1,9 |
| 2,82 | 2,1 | 1,7 | 2,2 | 1,7 | 1,7 |
| 3,572 | 1,9 | 1,8 | 2,1 | 1,9 | 1,6 |
| 3,76 | 1,9 | 1,5 | 2 | 2,4 | 1,6 |
| 4,042 | 2 | 1,6 | 2 | 1,9 | 1,6 |
| 4,794 | 2,3 | 1,6 | 2,1 | 2 | 2,1 |
| 5,687 | 2,4 | 1,6 | 2,2 | 2,1 | 3,2 |
| 6,58 | 2,2 | 2 | 2,3 | 1,9 | 2,7 |
| 7,332 | 2,2 | 1,6 | 2,5 | 2,4 | 3,9 |
| 7,52 | 2,2 | 1,4 | 2,2 | 2,3 | 4,8 |
| 7,802 | 2,1 | 1,5 | 2,3 | 3,7 | |
| 8,554 | 2,2 | 1,6 | 2,4 | 2,4 | |
| 9,447 | 3,6 | 2 | 2,5 | 2,7 | |
| 10,34 | 2,7 | 1,9 | 2,8 | 2,5 | |
| 11,092 | 2,6 | 1,9 | 2,6 | 2,6 | |
| 11,28 | 2,9 | 1,8 | 2,6 | 2,7 | |
| 11,562 | | 2 | 2,5 | 2,5 | |
| 12,314 | | 2 | 2,7 | 2,6 | |
| 13,207 | | 2,1 | 2,6 | 2,5 | |
| 14,1 | | 2,1 | 2,6 | 2,5 | |
| 14,852 | | 2,2 | 2,7 | 2,6 | |
| 15,04 | | 2,1 | 2,5 | 2,5 | |
| 15,322 | | 1,9 | 2,5 | 2,5 | |
| 16,074 | | 1,8 | 2,6 | 2,5 | |
| 16,967 | | 1,8 | 2,7 | 2,7 | |
| 17,86 | | 1,9 | 2,7 | 2,7 | |
| 18,612 | | 1,6 | 2,6 | 2,9 | |
| 18,8 | | 1,9 | 2,5 | 3 | |
| 19,082 | | 2,2 | 2,6 | 2,9 | |
| 19,834 | | 1,7 | 2,4 | 2,8 | |
| 20,727 | | 2 | 2,6 | 3,5 | |
| 21,62 | | 2,3 | 2,6 | 3,1 | |
| 22,372 | | 1,8 | 2,6 | 3,3 | |
| 22,56 | | 1,7 | 2,5 | 3,6 | |

PŘÍLOHA č. 10

Hodnoty skutečného průměru díry

Hodnoty skutečného průměru na vstupu

| Vystružená dráha [m] | ØD [mm] nástroj 1 | ØD [mm] nástroj 2 | ØD [mm] nástroj 3 | ØD [mm] nástroj 4 | ØD [mm] nástroj 5 |
|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 0,282 | 12,0161 | 12,0172 | 12,0150 | 12,0146 | 12,0166 |
| 1,034 | 12,0159 | 12,0171 | 12,0147 | 12,0148 | 12,0164 |
| 1,927 | 12,0160 | 12,0172 | 12,0152 | 12,0150 | 12,0164 |
| 2,82 | 12,0160 | 12,0167 | 12,0151 | 12,0146 | 12,0160 |
| 3,572 | 12,0162 | 12,0169 | 12,0156 | 12,0151 | 12,0162 |
| 3,76 | 12,0161 | 12,0172 | 12,0157 | 12,0148 | 12,0164 |
| 4,042 | 12,0161 | 12,0174 | 12,0155 | 12,0152 | 12,0164 |
| 4,794 | 12,0159 | 12,0170 | 12,0153 | 12,0147 | 12,0161 |
| 5,687 | 12,0162 | 12,0171 | 12,0150 | 12,0149 | 12,0177 |
| 6,58 | 12,0160 | 12,0172 | 12,0153 | 12,0144 | 12,0421 |
| 7,332 | 12,0163 | 12,0170 | 12,0155 | 12,0147 | 12,0154 |
| 7,52 | 12,0165 | 12,0171 | 12,0155 | 12,0148 | 12,0149 |
| 7,802 | 12,0156 | 12,0171 | 12,0155 | 12,0143 | |
| 8,554 | 12,0154 | 12,0170 | 12,0154 | 12,0142 | |
| 9,447 | 12,0160 | 12,0170 | 12,0154 | 12,0150 | |
| 10,34 | 12,0160 | 12,0168 | 12,0149 | 12,0140 | |
| 11,092 | 12,0158 | 12,0169 | 12,0156 | 12,0145 | |
| 11,28 | 12,0157 | 12,0172 | 12,0156 | 12,0146 | |
| 11,562 | | 12,0171 | 12,0152 | 12,0145 | |
| 12,314 | | 12,0169 | 12,0151 | 12,0143 | |
| 13,207 | | 12,0171 | 12,0152 | 12,0139 | |
| 14,1 | | 12,0167 | 12,0150 | 12,0143 | |
| 14,852 | | 12,0168 | 12,0153 | 12,0147 | |
| 15,04 | | 12,0171 | 12,0155 | 12,0146 | |
| 15,322 | | 12,0169 | 12,0154 | 12,0143 | |
| 16,074 | | 12,0166 | 12,0148 | 12,0133 | |
| 16,967 | | 12,0168 | 12,0154 | 12,0143 | |
| 17,86 | | 12,0168 | 12,0148 | 12,0136 | |
| 18,612 | | 12,0171 | 12,0149 | 12,0141 | |
| 18,8 | | 12,0170 | 12,0153 | 12,0138 | |
| 19,082 | | 12,0170 | 12,0150 | 12,0140 | |
| 19,834 | | 12,0166 | 12,0149 | 12,0134 | |
| 20,727 | | 12,0170 | 12,0152 | 12,0139 | |
| 21,62 | | 12,0165 | 12,0146 | 12,0135 | |
| 22,372 | | 12,0166 | 12,0152 | 12,0140 | |
| 22,56 | | 12,0165 | 12,0154 | 12,0139 | |

Hodnoty skutečného průměru na výstupu

| Vystružená dráha [m] | ØD [mm] nástroj 1 | ØD [mm] nástroj 2 | ØD [mm] nástroj 3 | ØD [mm] nástroj 4 | ØD [mm] nástroj 5 |
|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 0,282 | 12,0167 | 12,0184 | 12,0161 | 12,0158 | 12,0173 |
| 1,034 | 12,0169 | 12,0184 | 12,0165 | 12,0161 | 12,0175 |
| 1,927 | 12,0171 | 12,0184 | 12,0166 | 12,0152 | 12,0164 |
| 2,82 | 12,0168 | 12,0183 | 12,0167 | 12,0158 | 12,0175 |
| 3,572 | 12,0169 | 12,0181 | 12,0164 | 12,0163 | 12,0172 |
| 3,76 | 12,0169 | 12,0174 | 12,0165 | 12,0157 | 12,0174 |
| 4,042 | 12,0172 | 12,0180 | 12,0168 | 12,0163 | 12,0176 |
| 4,794 | 12,0172 | 12,0177 | 12,0166 | 12,0163 | 12,0176 |
| 5,687 | 12,0171 | 12,0183 | 12,0167 | 12,0160 | 12,0192 |
| 6,58 | 12,0172 | 12,0179 | 12,0166 | 12,0162 | 12,0421 |
| 7,332 | 12,0170 | 12,0177 | 12,0166 | 12,0158 | 12,0163 |
| 7,52 | 12,0173 | 12,0177 | 12,0166 | 12,0152 | 12,0142 |
| 7,802 | 12,0178 | 12,0177 | 12,0165 | 12,0155 | |
| 8,554 | 12,0180 | 12,0180 | 12,0167 | 12,0155 | |
| 9,447 | 12,0170 | 12,0184 | 12,0166 | 12,0161 | |
| 10,34 | 12,0167 | 12,0183 | 12,0165 | 12,0160 | |
| 11,092 | 12,0168 | 12,0180 | 12,0163 | 12,0157 | |
| 11,28 | 12,0171 | 12,0179 | 12,0164 | 12,0151 | |
| 11,562 | | 12,0180 | 12,0164 | 12,0158 | |
| 12,314 | | 12,0182 | 12,0163 | 12,0154 | |
| 13,207 | | 12,0184 | 12,0168 | 12,0161 | |
| 14,1 | | 12,0180 | 12,0163 | 12,0159 | |
| 14,852 | | 12,0179 | 12,0165 | 12,0152 | |
| 15,04 | | 12,0179 | 12,0166 | 12,0146 | |
| 15,322 | | 12,0180 | 12,0168 | 12,0157 | |
| 16,074 | | 12,0179 | 12,0166 | 12,0151 | |
| 16,967 | | 12,0184 | 12,0167 | 12,0153 | |
| 17,86 | | 12,0184 | 12,0164 | 12,0154 | |
| 18,612 | | 12,0183 | 12,0165 | 12,0151 | |
| 18,8 | | 12,0180 | 12,0166 | 12,0146 | |
| 19,082 | | 12,0184 | 12,0165 | 12,0153 | |
| 19,834 | | 12,0177 | 12,0167 | 12,0147 | |
| 20,727 | | 12,0182 | 12,0167 | 12,0155 | |
| 21,62 | | 12,0182 | 12,0165 | 12,0147 | |
| 22,372 | | 12,0179 | 12,0164 | 12,0147 | |
| 22,56 | | 12,0180 | 12,0164 | 12,0139 | |

PŘÍLOHA č. 11

Hodnoty válcovitosti

| Vystružená dráha [m] | válcovitost [μm] nástroj 1 | válcovitost [μm] nástroj 2 | válcovitost [μm] nástroj 3 | válcovitost [μm] nástroj 4 | válcovitost [μm] nástroj 5 |
|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 0,282 | 2,238 | 3,421 | 2,772 | 3,222 | 6,108 |
| 1,034 | 3,703 | 3,188 | 5,358 | 3,851 | 4,574 |
| 1,927 | 2,289 | 4,155 | 5,028 | 7,616 | 5,091 |
| 2,82 | 3,086 | 3,958 | 3,722 | 6,573 | 5,639 |
| 3,572 | 3,276 | 2,664 | 2,390 | 4,656 | 5,627 |
| 3,76 | 3,372 | 4,332 | 3,847 | 3,380 | 3,606 |
| 4,042 | 2,650 | 2,693 | 3,651 | 4,012 | 2,424 |
| 4,794 | 4,086 | 2,366 | 3,649 | 5,573 | 4,034 |
| 5,687 | 3,541 | 4,829 | 5,641 | 6,532 | 5,431 |
| 6,58 | 3,370 | 2,893 | 3,207 | 6,353 | 6,651 |
| 7,332 | 2,645 | 2,105 | 2,992 | 6,797 | 3,716 |
| 7,52 | 4,300 | 3,938 | 2,134 | 6,933 | 5,396 |
| 7,802 | 3,655 | 3,372 | 3,423 | 5,645 | |
| 8,554 | 3,553 | 5,227 | 3,592 | 5,275 | |
| 9,447 | 5,207 | 3,179 | 3,710 | 6,600 | |
| 10,34 | 5,439 | 3,152 | 4,264 | 4,841 | |
| 11,092 | 3,938 | 3,179 | 3,820 | 3,798 | |
| 11,28 | 4,427 | 2,321 | 3,437 | 4,233 | |
| 11,562 | | 3,534 | 3,207 | 4,089 | |
| 12,314 | | 3,719 | 4,158 | 4,016 | |
| 13,207 | | 3,138 | 5,419 | 6,167 | |
| 14,1 | | 3,471 | 4,020 | 3,938 | |
| 14,852 | | 3,259 | 2,670 | 3,592 | |
| 15,04 | | 3,657 | 2,355 | 5,712 | |
| 15,322 | | 3,032 | 2,986 | 3,243 | |
| 16,074 | | 6,536 | 4,499 | 8,317 | |
| 16,967 | | 5,805 | 5,735 | 5,653 | |
| 17,86 | | 3,434 | 3,514 | 6,808 | |
| 18,612 | | 3,345 | 3,219 | 3,685 | |
| 18,8 | | 3,511 | 2,558 | 4,400 | |
| 19,082 | | 3,021 | 3,784 | 4,415 | |
| 19,834 | | 3,767 | 3,304 | 4,401 | |
| 20,727 | | 5,236 | 5,462 | 6,840 | |
| 21,62 | | 3,318 | 3,418 | 4,507 | |
| 22,372 | | 3,443 | 4,549 | 3,779 | |
| 22,56 | | 3,018 | 2,948 | 4,518 | |