

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie – technologie obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vliv vybraných technologických faktorů obrábění na integritu povrchu
přesných děr – řezné podmínky při vystružování

Autor: **Bc. Jan Roub**

Vedoucí práce: **Doc. Ing. Jan ŘEHOŘ, Ph.D.**

Akademický rok 2016/2017

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 vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval všem, kteří mě během mého studia podporovali a byli mi oporou. Děkuji vedoucímu mé diplomové práce Doc. Ing. Janu Řehořovi, Ph.D. za pomoc při zpracovávání práce a za odborné rady při experimentální činnosti a hlavně za možnost práce ve výzkumném týmu. Dále bych rád poděkoval Ing. Jaroslavě Fulemové za poskytnutý čas, rady a ochotu při konzultacích a za pomoc při organizování experimentů. Poděkování za pomoc při zpracovávání rešeršní části práce patří Ing. Václavě Pokorné.

Velké poděkování patří mým rodičům, sestře a přítelkyni, za podporu při studiu. Děkuji také svým přátelům.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Roub	Jméno Jan			
STUDIJNÍ OBOR	N2301 Strojírenská technologie – technologie obrábění				
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Řehoř, Ph.D.	Jméno Jan			
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KTO				
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ		Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Vliv vybraných technologických faktorů obrábění na integritu povrchu přesných děr – řezné podmínky při vystružování				
FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2017

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	76	TEXTOVÁ ČÁST	69	GRAFICKÁ ČÁST	7
<p>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>		<p>Diplomová práce ve své teoretické části obsahuje poznatky z rešerše z oblasti vlivu řezných podmínek na vystružování přesných děr a v praktické části se zabývá vyhodnocením vlivu vybraných technologických faktorů na kvalitu vystružené díry.</p>			
<p>KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>		<p>vrtání, vystružování, vrták, výstružník, řezná rychlost, posuv, slinutý karbid, cermet, integrita povrchu, válcovitost, kolmost, kruhovitost</p>			

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR		Surname Roub		Name Jan	
FIELD OF STUDY		N2301 Manufacturing processes – Technology of metal cutting			
SUPERVISOR		Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Řehoř, Ph.D.		Name Jan	
INSTITUTION		ZČU - FST - KTO			
TYPE OF WORK		DIPLOMA	BACHELOR		Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK		Influence of selected technological factors of machining to surface integrity of precise holes - cutting conditions during reaming			
FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Cutting technology	SUBMITTED IN	2017

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	76	TEXT PART	69	GRAPHICAL PART	7
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The diploma thesis in its theoretical part contains findings from the research on the influence of cutting conditions on the reaming of precise holes and in the practical part deals with the evaluation of the influence of selected technological factors on the quality of the reaming hole.
KEY WORDS	drilling, reaming, drill, reamer, cutting speed, feed rate, cemented carbide, cermet, surface integrity, cylindricity, perpendicularity, circularity

Obsah

1	ÚVOD DO PROBLEMATIKY VÝROBY PŘESNÝCH DĚR	11
1.1	Cíle řešení	11
1.2	Řezné materiály používané při vrtání a vystružování	12
1.3	Slinuté karbidy	13
1.4	CERMET	15
2	REŠERŠE SE ZAMĚŘENÍM NA VLIV ŘEZNÝCH PODMÍNEK PŘI VYSTRUŽOVÁNÍ NA KVALITU VYSTRUŽENÝCH DĚR	17
2.1	Vystružování pomocí hlavice VVH – HAM – FINAL	17
2.2	Vystružování nástrojem s utvářeči třísek HAM – FINAL 2	18
2.3	Vystružování nástrojem s lamači třísek - MAPAL	20
2.4	Výstružník pro neprůchozí díry GÜHRING 1	21
2.5	Výstružník pro průchozí díry GÜHRING 2	21
2.6	Vystružování pomocí hlavice MT3 HAM – FINAL 3	22
2.7	Vystružování s proměnlivými faktory	24
2.8	Vystružování pomocí hlavice MT3 HAM – FINAL 4	26
3	ANALÝZA A VYHODNOCENÍ REŠERŠNÍCH POZNATKŮ	29
4	VLIV TECHNOLOGIE VRTÁNÍ NA KVALITU VYSTRUŽENÉ DÍRY	31
4.1	Plán experimentu	32
4.2	Obrobek	33
4.3	Vrtání	33
4.4	Vystružování	33
4.5	Stroj	34
4.6	Průběh experimentu	35
4.7	Měření vzorků	38
4.8	Vyhodnocení	38
5	NÁVRH A REALIZACE EXPERIMENTÁLNÍHO STUDIA, VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ	41
5.1	Plán experimentu	41
5.2	Obrobek	44
5.3	Stroj	44
5.4	Navrtávání	45
5.5	Vrtání	45
5.6	Vystružování	45

5.7	Upínání obrobků	46
5.8	Průběh experimentu	47
5.9	Měření	50
5.10	Vyhodnocení	50
5.11	Válcovitost	52
5.11.1	Vliv řezné rychlosti	53
5.11.2	Vliv posuvu	55
5.11.3	Vliv zpětného posuvu	58
5.12	Střední aritmetická hodnota drsnosti – drsnost povrchu Ra	62
5.13	Složka řezné síly F_z	63
5.14	Doporučení pro další experimentální studium	66
6	TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	67
7	ZÁVĚR	69
8	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	70
9	SEZNAM PŘÍLOH	72

Seznam obrázků

Obrázek 1.	Schéma výroby přesného otvoru [1]	12
Obrázek 2.	Graf řezných materiálů [1]	13
Obrázek 3.	Struktura slinutého karbidu typu P [1]	14
Obrázek 4.	Monolitní vrták ze slinutého karbidu výrobce Nachreiner [18]	14
Obrázek 5.	Komplexní vrtací nástroj s VBD ze slinutého karbidu [19]	14
Obrázek 6.	Struktura CERMETU [1]	15
Obrázek 7.	Graf jednotlivých složek a jejich vliv na vlastnosti CERMETU [1]	15
Obrázek 8.	Cermetový výstružník firmy HAM – FINAL [17]	16
Obrázek 9.	Výstružníky s cermetovými břity od firmy HAM – FINAL [7]	16
Obrázek 10.	Vystružovací hlavice VVH firmy HAM – FINAL [7]	17
Obrázek 111.	VVH výstružník [7]	18
Obrázek 122.	Výstružník od HAM - FINAL s utvářeči třisek pro neprůchozí díry [8]	19
Obrázek 133.	Výstružník od HAM - FINAL pro průchozí díry [8]	19
Obrázek 14.	Výstružník MAPAL HPR110 s břity z cermetu [9]	20
Obrázek 15.	Konstrukce výstružníku MAPAL s vyměnitelnými hlavicemi [9]	21
Obrázek 16.	Cermetový výstružník s centrálním chladícím kanálem od firmy GÜHRING [10]	22

Obrázek 17. Vystružovací hlavice MT3 - rozložení zubů [11].....	22
Obrázek 18. Cermetová vystružovací hlavice MT3 od firmy HAM – FINAL [11]	23
Obrázek 19. Schéma proudění procesní kapaliny přes upnutou hlavici MT3 [11].....	23
Obrázek 20. Výstružník s tepelně upnutou hlavici MT3 [11].....	24
Obrázek 21. Diagram faktorů ovlivňujících řezný proces [12].....	24
Obrázek 22. Výstružník z rychlořezné oceli	25
Obrázek 23. Proměnlivé hodnoty drsností vzorků během prvního dne experimentu - A = W1 – 0,1 – 4,5; B = W1 – 0,1 – 20,5; C = W1 – 0,3 – 4,5; D = W1 – 0,3 – 20,5; E = M – 0,1 – 4,5; F = M – 0,1 – 20,5; G = M – 0,3 – 4,5; H = M – 0,3 – 20,5 [12].....	25
Obrázek 24. Graf změn drsnosti vystružených vzorků v průběhu dnů [12]	26
Obrázek 25. Křivka opotřebení nástroje	26
Obrázek 26. Vystružovací hlavice MT3 s břity z cermetu [13].....	28
Obrázek 27. Grafické znázornění vlivů jednotlivých faktorů na proces vystružování	30
Obrázek 28. Diagram příčin a následků [15]	32
Obrázek 29. Hotový vystružený vzorek popsáný laserem	33
Obrázek 30. Patentovaný VRV výstružník firmy HAM – FINAL [1].....	34
Obrázek 31. Soustružnické centrum DMG Mori CTX beta 1250 TC 4A.....	34
Obrázek 32. Hotový vzorek po upíchnutí	36
Obrázek 33. Obrobek upnutý ve sklíčidle soustruhu	36
Obrázek 34. Situace ve stroji před vrtáním	37
Obrázek 35. Použité nástroje s upínači pro experiment - zleva navrtávák, srážeč hran, vrták a výstružník	37
Obrázek 36. Drsnoměr Hommel Etamic T8000 [444].....	38
Obrázek 37. Kruhoměr Taylor Hobson Talyrond 585 Lt [444].....	38
Obrázek 38. Ortogonální centrálně kompozitní plán experimentu	41
Obrázek 39. Obrobek	44
Obrázek 40. DMU 65 monoblock	44
Obrázek 41. Vrták upnutý v hydraulickém upínači	45
Obrázek 42. VRV výstružník upnutý RC hydroupínači	46
Obrázek 43. Upínací soustava sklíčidla a dynamometru	46
Obrázek 44. Hotový vzorek	47
Obrázek 45. Nastavování excentricity páčkovým číselníkovým úchylkoměrem	49
Obrázek 46. Dynamometr KISTLER 9272 [20]	50
Obrázek 47. Obecné schéma experimentu	51
Obrázek 48. Rozložení hodnot válcovitosti dle Gaussova normálního rozložení.....	52

Obrázek 49. Závislost změny válcovitosti na změně řezné rychlosti při zpětném posuvu v_f zpět = 15 [m/min].....	53
Obrázek 50. Závislost změny válcovitosti na změně řezné rychlosti při zpětném posuvu v_f zpět = 30 [m/min].....	54
Obrázek 51. Závislost změny válcovitosti na změně řezné rychlosti při zpětném posuvu v_f zpět = 45 [m/min].....	55
Obrázek 52. Závislost změny válcovitosti na změně posuvu při zpětném posuvu v_f zpět = 15 [m/min].....	56
Obrázek 53. Závislost změny válcovitosti na změně posuvu při zpětném posuvu v_f zpět = 30 [m/min].....	56
Obrázek 54. Závislost změny válcovitosti na změně posuvu při zpětném posuvu v_f zpět = 45 [m/min].....	57
Obrázek 55. Závislost změny válcovitosti na změně zpětného posuvu při posuvu $f = 0,60$ [mm/ot].....	58
Obrázek 56. Závislost změny válcovitosti na změně zpětného posuvu při posuvu $f = 0,72$ [mm/ot].....	59
Obrázek 57. Závislost změny válcovitosti na změně zpětného posuvu při posuvu $f = 0,84$ [mm/ot].....	59
Obrázek 58. Závislost změny válcovitosti na změně zpětného posuvu při posuvu $v_c = 150$ [m/min].....	60
Obrázek 59. Závislost změny válcovitosti na změně zpětného posuvu při posuvu $v_c = 180$ [m/min].....	61
Obrázek 60. Závislost změny válcovitosti na změně zpětného posuvu při posuvu $v_c = 210$ [m/min].....	61
Obrázek 61. Gaussovo normální rozložení naměřených hodnot F_z	63
Obrázek 62. Graf vlivu posuvu na složky řezné síly [16].....	64
Obrázek 63. Závislost změny síly F_z na změně posuvu při v_f zpět = 15 [m/min]	64
Obrázek 64. Závislost změny síly F_z na změně posuvu při v_f zpět = 30 [m/min]	65
Obrázek 65. Závislost změny síly F_z na změně posuvu při v_f zpět = 45 [m/min]	66
Obrázek 66. Struktura materiálu 42CrMo4 v ose rotace se sulfidickými vměstkami.....	73

Seznam grafů

Graf 1. Dendrogramy válcovitosti a drsnosti R_a	39
Graf 2. Drsnost povrchu R_a vystružených vzorků s polohou střední hodnoty drsnosti.....	62
Graf 3. Válcovitost - vrtání do plna.....	74
Graf 4. Válcovitost - vrtání s navrtáváním.....	74
Graf 5. Drsnost R_a - vrtání do plna	75
Graf 6. Drsnost R_a - vrtání s navrtáváním	75

Seznam tabulek

Tabulka 1. Řezné podmínky vystružování 1 HAM - FINAL [7].....	18
Tabulka 2. Řezné podmínky vystružování 2 HAM – FINAL 2 [8].....	19
Tabulka 3. Řezné podmínky vystružování 3 MAPAL [9].....	20
Tabulka 4. Řezné podmínky vystružování 4 GÜHRING 1 [10].....	21
Tabulka 5. Řezné podmínky vystružování 5 GÜHRING 2 [10].....	21
Tabulka 6. Řezné podmínky vystružování 6 HAM – FINAL 3 [11].....	23
Tabulka 7. Řezné podmínky vystružování 7 DTU [12].....	25
Tabulka 8. Řezné podmínky vystružování 8 HAM – FINAL 4 [13].....	27
Tabulka 9. Naměřené hodnoty kruhovitosti, válcovitosti a drsnosti Ra po experimentu [13].	27
Tabulka 10. Srovnání řezných podmínek.....	30
Tabulka 11. Plán experimentu s technologiemi před-přípravy a vrtání [15].....	32
Tabulka 12. Řezné podmínky pro vrtání experimentu 1.....	33
Tabulka 13. Řezné podmínky pro vystružování experimentu 1.....	34
Tabulka 14. Technologický postup experimentu.....	35
Tabulka 15. Nastavení experimentu.....	42
Tabulka 16. Kombinace řezných podmínek pro experiment.....	43
Tabulka 17. Řezné podmínky pro navrtávání.....	45
Tabulka 18. Řezné podmínky pro vrtání.....	45
Tabulka 19. Technologický postup zhotovení vzorku.....	48
Tabulka 20. Dosažené hodnoty válcovitosti s porovnáním s předepsanou válcovitostí.....	68
Tabulka 21. Chemické složení 42CrMo4.....	73
Tabulka 22. Mechanické vlastnosti oceli 42CrMo4 v zušlechťeném stavu.....	73
Tabulka 23. Tolerance válcovitosti.....	76

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY VÝROBY PŘESNÝCH DĚR

Výroba děr pomocí technologie vrtání je jedna z nejstarších a zároveň nejpoužívanějších technologií třískového obrábění ve strojírenství. Je charakterizována hlavním rotačním pohybem nástroje nebo obrobku a přímočarým vedlejším pohybem nástroje či obrobku. Díky tomu lze produktivně vyrábět otvory na strojích, které umožňují tuto kombinaci pohybů. Samotná operace vrtání ovšem není dostačující pro výrobu přesných děr. Otvor po vrtání disponuje nízkou přesností (IT 9 – IT 12), vysokou drsností Ra, válcovitostí, kruhovitostí, atd. Proto se používá dokončovací operace vystružování, díky níž dojde ke zlepšení výše zmíněných parametrů. Dnes se již prakticky upouští od operace vyhrubování, neboť by jen prodlužovala a zdražovala výrobu, což odporuje trendu doby, aby výroba byla co nejrychlejší a nejlevnější. K dosažení požadované přesnosti otvoru je možné docílit pouze pomocí technologií vrtání a vystružování. Je ovšem nutné, aby jednotlivé operace byly každá co nejpresnější, aby byla zaručena konečná přesnost otvoru. Proto použité nástroje musí disponovat správně zvolenou geometrií, vhodným řezným materiálem a musí být zvoleny optimální řezné podmínky (řezná rychlost, posuv).

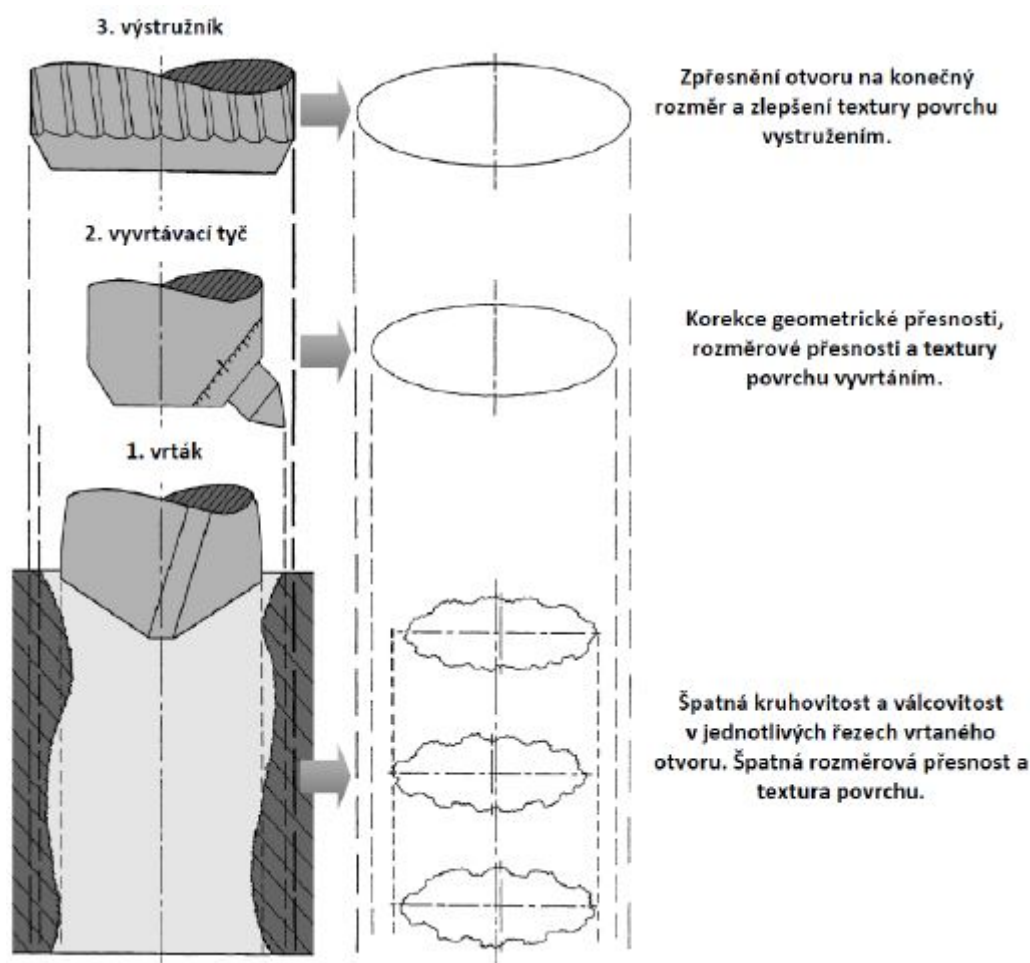
Termín přesná díra není nijak přesně a pevně definován pomocí číselných hodnot, záleží vždy na účelu, pro který je díra vyráběna a jaké jsou na ni kladené nároky. Je ale možné za přesné díry označit ty, které se pohybují ve stupni přesnosti do IT 8. [3] Drsnost Ra těchto přesných děr by měla být do 0,8 μm . Takových parametrů jsme schopni dosáhnout správně nastavenou operací vystružování, kterou lze dosáhnout stupně přesnosti IT 5 – IT 8 a drsnosti Ra od 0,3 do 0,8 μm . Další důležité parametry pro přesnou díru jsou válcovitost, kolmost, kruhovitost a sousost.

Ve skutečnosti není možné vyrobít přesnou díru tak dokonale přesně, že bude mít drsnost povrchu Ra 0 μm , stupeň přesnosti IT 01 a hodnoty válcovitosti, kruhovitosti, sousosti a kolmosti budou také nulové. Vždy bude mít přesná díra nějakou odchylku a nepřesnost. Záleží tedy jen na tom, jak nejlépe budou nastaveny podmínky výroby přesných děr.

Neustálý vývoj v oblasti obrábění usnadňuje výrobu přesných děr. Díky novým konstrukcím nástrojů a upínačů, optimalizaci tuhosti soustavy Stroj – Nástroj – Obrobek – Přípravek (S – N – O – P), vývoji a použití nových a progresivních řezných materiálů a tuhých a výkonných strojů, lze efektivně a produktivně vyrábět přesné díry v požadované kvalitě. [1], [3], [4]

1.1 Cíle řešení

Cílem této práce je shrnout rešeršní poznatky z oblasti vystružování přesných děr a na základě této rešerše vybrat faktory, které mají největší vliv na výslednou kvalitu vystružené díry. Následně experimentálně otestovat vliv těchto vybraných faktorů a s pomocí naměřených dat stanovit úroveň vlivu jednotlivých faktorů na kvalitu vystružené díry. Závěrem stanovit doporučení pro další experimentální činnost ohledně vystružování přesných děr.



Obrázek 1. Schéma výroby přesného otvoru [1]

1.2 Řezné materiály používané při vrtání a vystružování

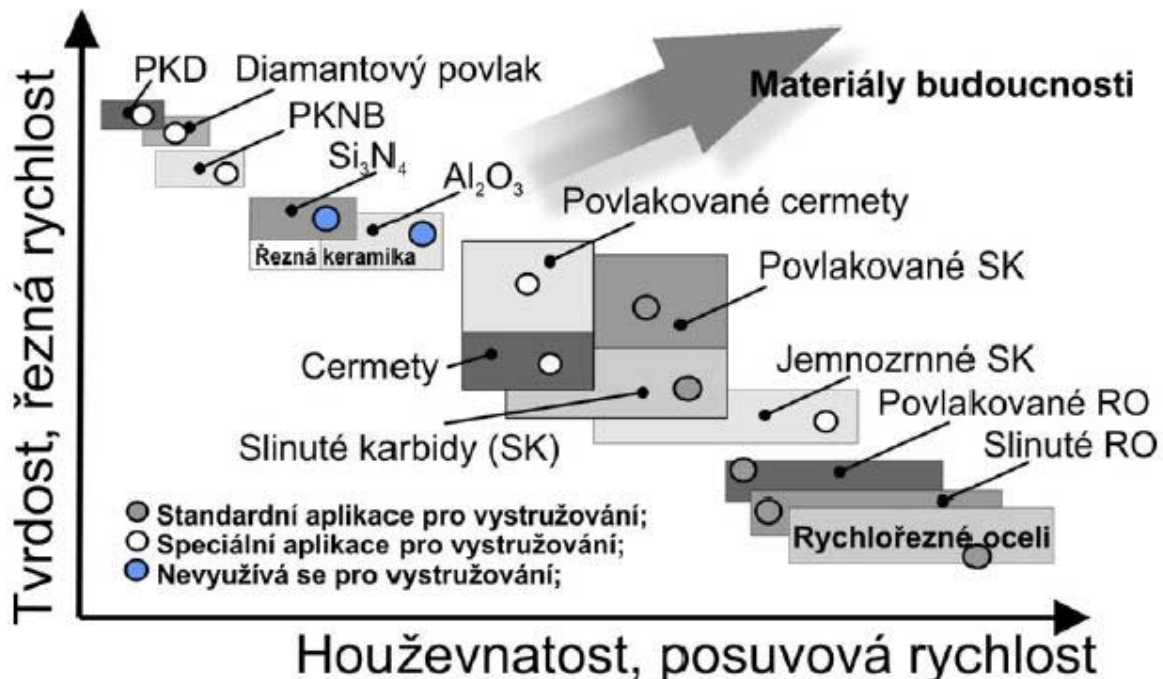
Pro vrtací nástroje se nejvíce používá rychlořezná ocel a slinuté karbidy. Cermet se zatím používá spíše výjimečně nebo pro speciální případy, což platí i pro kubický nitrid boru a diamant. V případě rychlořezné oceli se používají monolitní nástroje, slinuté karbidy a cermet lze mít jako monolitní nástroje, tak jako výměnné břitové destičky (dále jen VBD). Kubický nitrid boru a diamant lze mít pouze jako VBD.

V hojně míře ještě stále používaná rychlořezná ocel je postupně nahrazována slinutými karbidy, které mají sice menší houževnatost, ale větší tvrdost. Aplikací tenkých vrstev na slinuté karbidy lze docílit srovnatelné houževnatosti jako u rychlořezné oceli. Ty se dnes stále častěji vyrábí technologií práškové metalurgie, čímž získávají srovnatelné vlastnosti jako slinuté karbidy.

U vystružovacích nástrojů jsou nejvíce používány slinuté karbidy jako monolitní či nástroje s VBD. Stále více se pro své vlastnosti používají cermety. S rychlořeznou ocelí se obrábí spíše v kusových výroбах.

Řezná keramika se pro operace vrtání a vystružování nepoužívá z důvodu nestability ostří a nemožnosti uchycení VBD z keramiky na nástroj.

V této práci bude největší pozornost věnována slinutým karbidům a cermetu. [1], [2]



Obrázek 2. Graf řezných materiálů [1]

1.3 Slinuté karbidy

Jedná se o řezný materiál složený převážně z karbidů titanu, wolframu, tantalu a niobu a kobaltu, použitého jako pojivo karbidů. Vyrábí se technologií práškové metalurgie, tedy spékáním prášků kovů za vysokých teplot a tlaků. Vliv na vlastnosti slinutých karbidů má velikost částic karbidů, dále druh použitého pojiva, kvalita zpracování a technologie výroby. Velká zrna zvyšují houževnatost, naopak malá zrna zvyšují tvrdost. Se snižujícím se obsahem kobaltu jako pojiva klesá pevnost a houževnatost, ale naopak roste tvrdost a otěruvzdornost bříty nástroje.

Slinuté karbidy pro obrábění různých druhů materiálů se dělí do 7 skupin:

P – oceli – modrá barva

M – austenitické a feriticko-austenitické oceli, korozivzdorné oceli – žlutá barva

K – litiny – červená barva

N – neželezné kovy a jejich slitiny (slitiny Al, Cu) – zelená barva

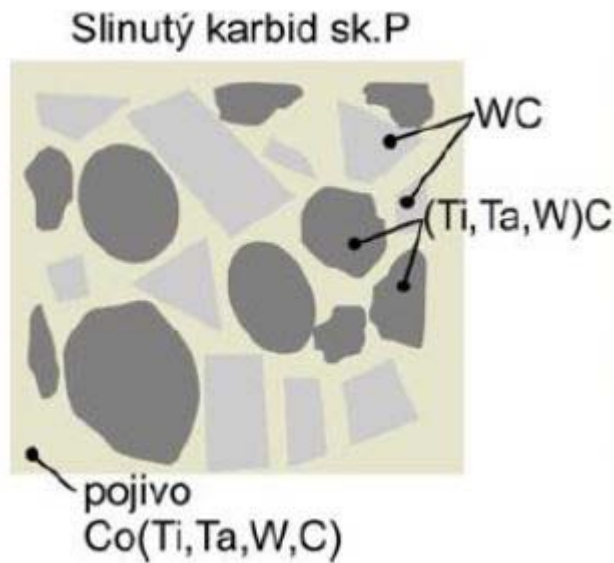
S – žáruvzdorné a žárupevné materiály – oranžová barva

H – kalené a zušlechtěné oceli – šedivá barva

O – plasty – bílá barva

Nástroje ze slinutých karbidů mohou být jak monolitní, tak pouze jako VBD připevněné na obráběcí nástroje např. z oceli. Destičky z karbidu mají velký rozsah použití jak u malých tak velkých rotačních i nerotačních řezných nástrojů.

Na nástroje ze slinutých karbidů lze použít tenké vrstvy (např. AlTiN, TiAlSiN, atd.) a tím zvýšit jejich houževnatost a tvrdost a také zvýšit jejich životnost. [1], [2], [6]



Obrázek 3. Struktura slinutého karbidu typu P [1]



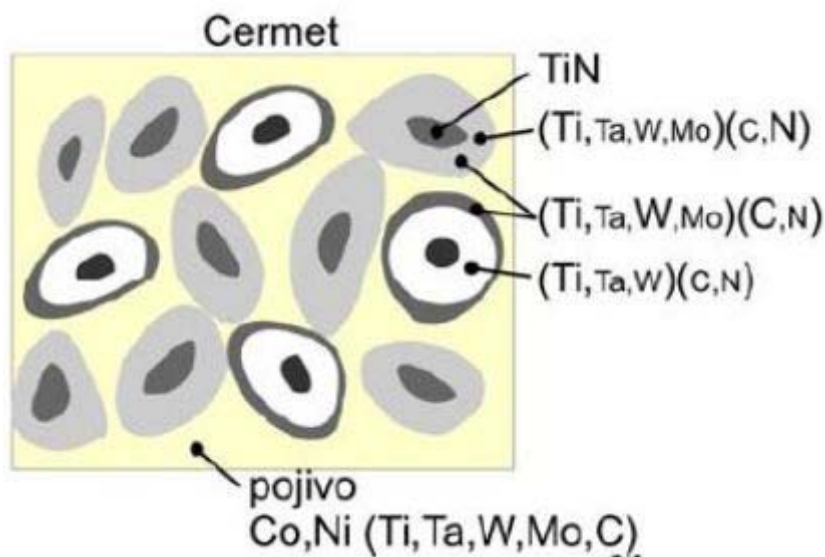
Obrázek 4. Monolitní vrták ze slinutého karbidu výrobce Nachreiner [18]



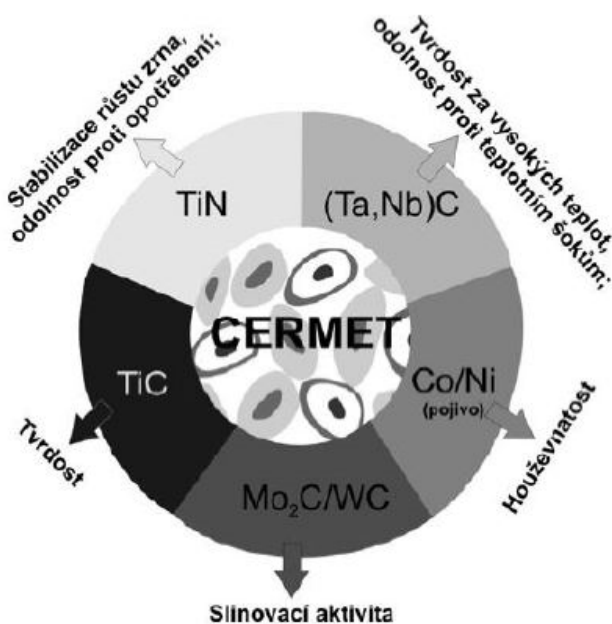
Obrázek 5. Komplexní vrtací nástroj s VBD ze slinutého karbidu [19]

1.4 CERMET

Cermety stejně jako slinuté karbidy se vyrábějí práškovou metalurgií. Lisují se za vysokých tlaků (50 – 150 MPa) a slinování při teplotách blízkých bodu tavení použitého pojiva (1 350 – 1 650 °C). Pro výrobu se používají karbidy titanu (TiC), karbonitridy titanu (TiCN), karbidy molybdenu (Mo₂C), nitridy titanu (TiN), karbidy wolframu (WC) a jako pojivo se používá kombinace niklu (Ni) a kobaltu (Co), nebo případně molybden (Mo). Se zvyšujícím se obsahem nitridů popřípadě dusíku se zvyšuje řezný výkon materiálu. Cermety mají složitou mikrostrukturu, která je ovlivněna velikostí výchozích tvrdých částic, složením prášků a slinovací atmosférou. Díky tomu mají cermety oproti slinutým karbidům větší odolnost proti opotřebení a mají lepší chemickou a tepelnou stabilitu.



Obrázek 6. Struktura CERMETU [1]



Obrázek 7. Graf jednotlivých složek a jejich vliv na vlastnosti CERMETU [1]

Břit z cermetu je ostrý a trvanlivý a lépe odolává opotřebením na hřbetu. Hodí se proto pro dokončovací obráběcí operace, tedy pro stabilní a nepřerušovaný řez. Svou stálostí se výborně hodí pro velkosériové či hromadné výroby.

Ohledně vystružování, lze s cermetem obrábět mnohem většími řeznými rychlostmi (okolo 160 m/min). Dále cermety díky nízké adhezi a tvrdé fázi vytváří kvalitní povrch s nízkou drsností.

Vyspělé výrobní technologie umožňují vyrábět nástroje z cermetu jak monolitní tak jako VBD. Další zlepšení tvrdosti a houževnatosti cermetových nástrojů lze dosáhnout aplikací tenkých vrstev. [1], [2], [5]



Obrázek 8. Cermetový výstružník firmy HAM – FINAL [17]



Obrázek 9. Výstružníky s cermetovými břity od firmy HAM – FINAL [7]

2 REŠERŠE SE ZAMĚŘENÍM NA VLIV ŘEZNÝCH PODMÍNEK PŘI VYSTRUŽOVÁNÍ NA KVALITU VYSTRUŽENÝCH DĚR

Výroba přesných děr je součástí mnoha výzkumných institutů po celém světě a zabývá se jí i spousta výrobních podniků. Tato problematika stále ještě není zcela probádána a existuje celá řada možností pro výzkum, jak zdokonalit a zproduktivnit výrobu přesných děr. Rešerše byla provedena z publikovaných článků v odborných časopisech a ze strojírenských konferencí.

2.1 Vystružování pomocí hlavice VVH – HAM – FINAL

Jednou z nejvýznamnějších rolí na trhu s vystružovacími nástroji hraje brněnská firma HAM – FINAL s.r.o. (nyní již FINAL TOOLS s.r.o.) Intenzivně se zabývá jak vývojem, tak produkcí nástrojů pro výrobu přesných děr. Zabývá se zejména výstružníky s břity z cermetu. Ty poskytují pro zákazníky výborný poměr cena a výkon neboť břity z cermetu dovolují obrábět vysokými řeznými rychlostmi při dlouhé trvanlivosti břitů ostří.

Použití cermetu na výstružníky se osvědčilo při testování výměnné vystružovací hlavice VVH, která byla tepelně upnuta v držáku. Z měření řezných sil a výsledků modelování procesu vystružování má tato vystružovací hlavice optimálně rozdělené zuby po obvodu. Díky tomu je chod nástroje klidný, bez škodlivých vibrací což má velmi příznivý vliv na výsledky obrábění (válcovitost, drsnost povrchu Ra a kruhovitost).



Obrázek 10. Vystružovací hlavice VVH firmy HAM – FINAL [7]

Tyto hlavice byly použity na vystružování děr v materiálu 15 131 dle ČSN, kde byly požadovány parametry válcovitosti 0,01 mm, drsnost obrobeného povrchu Ra do 0,8 μm . Nejdříve byly díry předvrtány vrtákem s VBD ze slinutého karbidu, poté vyvrtány vyvrtávací

tyčí s jedním břitem a poté následovala operace vystružování. Hlavice výstružníku měla 6 zubů.

Řezné podmínky pro vystružování:

Řezná rychlost v_c [m/min]	180
Posuv na otáčku f_{ot} [mm]	0,6
Hloubka řezu a_p [mm]	0,1

Tabulka 1. Řezné podmínky vystružování 1 HAM - FINAL [7]

Při těchto řezných podmínkách dosahovali výstružníky životnosti 35 metrů. Válcovitost vystružených děr byla 0,003 mm a drsnost povrchu děr se pohybovala v rozmezí 0,4 – 0,8 μm . [7]



Obrázek 111. VVH výstružník [7]

2.2 Vystružování nástrojem s utvářeči třísek HAM – FINAL 2

Aby byla operace vystružování prospěšná, musí být taky zaručen vhodný odchod třísky z místa řezu. Proto je důležitý také její správný tvar, který závisí například na plynulém nebo přerušovaném řezu, na zvolených řezných podmínkách (řezná rychlost, posuv, hloubka třísky), vlastnostech obráběného materiálu, geometrie výstružníku, procesní kapaliny. Pokud není tříska utvářena a odváděna z místa řezu optimálně, hrozí výrazné ovlivnění průběhu vystružování. Tím dochází k poškození nástrojů a nekvalitnímu obrobenému povrchu. Dalším problémem, pokud se tvoří nesprávný tvar třísky, je její namotávání na nástroj. Tyto třísky je nutné manuálně odstranit z nástroje. Tím ovšem může dojít k jeho poškození a prodlužuje s tím výrazně čas výroby.

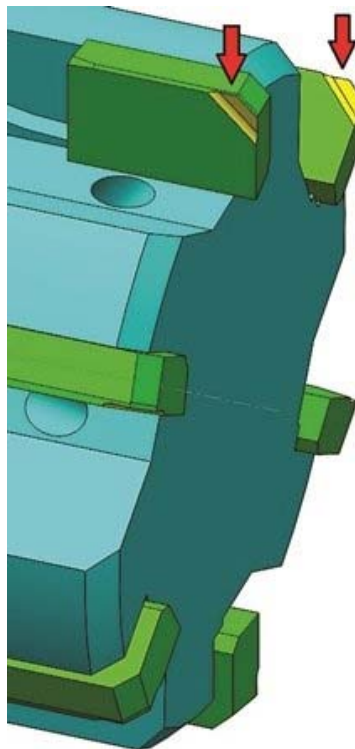
Společnost HAM – FINAL (nyní již FINAL TOOLS s.r.o.) nabízí cermetové výstružníky s utvářeči třísek, vyvinuté s uživateli při dlouhodobých testech obrábění díry o průměru 28,6 + 0,06 mm v délce 15 mm na dílci z materiálu 10 267 dle ČSN EN. Pro chlazení a odvod třísky byla použita procesní kapalina o tlaku 40 bar. Výstružník byl opatřen 6 břitovými destičkami z cermetu.

Řezné podmínky pro vystružování:

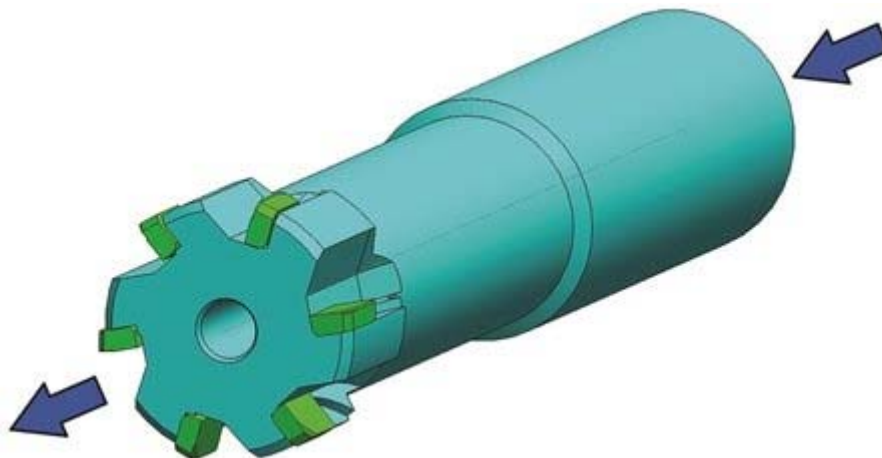
Řezná rychlost v_c [m/min]	158
Posuvová rychlost v_f [mm/min]	2 160

Tabulka 2. Řezné podmínky vystružování 2 HAM – FINAL 2 [8]

Při požadavcích na drsnost obrobenej plochy Rz 40 (Ra 6,3) μm došlo ke zkrácení času vystružování, kdy se celá operace 6x zrychlila, trvanlivost nástroje se zvýšila 3x na 450 m. Během celého testu se tvořila optimální krátká článkovitá tříska, která byla správně odváděna z místa řezu procesní kapalinou a nenamotávala se na nástroj. S tím souvisí úspora až 550 hodin za rok od čištění nástroje od dlouhých smotaných třísek, které ulpívaly na nástroji. [8]



Obrázek 122. Výstružník od HAM - FINAL s utvářeči třísek pro neprůchozí díry [8]



Obrázek 133. Výstružník od HAM - FINAL pro průchozí díry [8]

2.3 Vystružování nástrojem s lamači třísek - MAPAL

Problematikou tvorby vhodného tvaru a správného dělení třísek při dokončovací operaci vystružování se zabývá také firma MAPAL. Celý problém spočíval v tvorbě dlouhých a smotaných třísek, které se zachytávali uvnitř obráběných děr nebo na nástroji a upínači, ale také na podávacích mechanismech nástrojů či obrobků. Díky tomu docházelo k nepřesnému upínání nástrojů a špatnému napolohování obrobků. Při kombinaci těchto nepřesností může dojít k ohrožení zdraví pracovníků a k nekvalitní a neproduktivní výrobě.

Firma MAPAL vyvinula ve spolupráci se zákazníky z praxe nový vícebřítý výstružník s lamači třísek. Výstružník nese název HPR. Testování proběhlo při obrábění děr ojníc. Ojnice byly z materiálu C70 (ocel s vyšším obsahem uhlíku, obdoba oceli 12 050 dle ČSN) Vystružovaný průměr byl 33 N7 mm. Osmibřítý výstružník HPR110 s břity z cermetu měl navržený speciální lamač třísek.



Obrázek 14. Výstružník MAPAL HPR110 s břity z cermetu [9]

Řezné podmínky pro vystružování:

Řezná rychlost v_c [m/min]	130
Posuvová rychlost v_f [mm/min]	1 500

Tabulka 3. Řezné podmínky vystružování 3 MAPAL [9]

Výstružník při takových zvolených podmínkách vytvářel krátké a dělené třísky, které byly snadno odváděny z místa řezu, a nepoškrábali obrobek. Zároveň nebylo nutné přerušovat výrobu kvůli očištění nástroje od třísek. Aplikací tohoto moderního nástroje se zvýšila produktivita výroby a břity z cermetu dosahovali trvanlivosti v průměru až 10 000 kusů. [9]



Obrázek 15. Konstrukce výstružníku MAPAL s vyměnitelnými hlavicemi [9]

2.4 Výstružník pro neprůchozí díry GÜHRING 1

GÜHRING s.r.o. je firma zabývající se výrobou rotačních obráběcích nástrojů. Proto lze v jejím výrobním portfoliu nalézt také moderní výstružníky z cermetu. V rámci výzkumu a vývoje byly testovány výstružníky pro průchozí a neprůchozí díry.

Jako první byl testován výstružník s centrálním kanálem pro procesní kapalinu pro neprůchozí díry o průměru $18,08 +0,005 / +0,010$ mm. Materiálem obrobku byla ocel 18CrNi8 (16 326 dle ČSN). Hloubka vystružování 60 mm.

Řezné podmínky pro vystružování:

Řezná rychlost v_c [m/min]	120
Posuvová rychlost v_f [mm/min]	2 122

Tabulka 4. Řezné podmínky vystružování 4 GÜHRING 1 [10]

Při tomto experimentu byla dosažena drsnost obrobku Ra 0,4 – 0,8 μm . Naměřená kruhovitosť děr nepřesahovala 3 μm . Průměr děr se stabilně pohyboval v rozmezí 18,089 – 18,090 mm.

2.5 Výstružník pro průchozí díry GÜHRING 2

Dále byl podroben testování výstružník z cermetu pro průchozí díry o průměru 28 H7 mm. Materiálem obrobku byla ocel C45 (12 050 dle ČSN). Pro tento typ výstružníku bylo použito usměrněné chlazení procesní kapalinou do jednotlivých drážek profilu.

Řezné podmínky pro vystružování:

Řezná rychlost v_c [m/min]	120
Posuvová rychlost v_f [mm/min]	2 455

Tabulka 5. Řezné podmínky vystružování 5 GÜHRING 2 [10]

Průchozí díry po naměření dávali hodnoty drsnosti Ra 0,4 μm a kruhovitosti 3 – 4 μm .

V obou případech testování bylo využito výborných vlastností cermetu, a sice výborné stálosti rozměrů při minimálním opotřebením nástroje, použití vysokých hodnot řezných podmínek a kvalitní povrch s nízkou drsností.

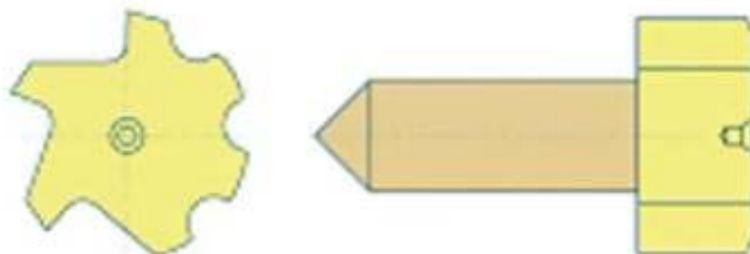
GÜHRING s.r.o. vyrábí také speciální cermetové výstružníky od průměru 6 mm s centrálním chladicím kanálem nebo usměrněným chlazením do drážek profilu. V zušlechtné oceli 15 142 dle ČSN dosahují tyto výstružníky trvanlivosti břitu 60 m. [10]



Obrázek 16. Cermetový výstružník s centrálním chladicím kanálem od firmy GÜHRING [10]

2.6 Vystružování pomocí hlavice MT3 HAM – FINAL 3

Velkou inovací v konstrukci vystružovacích nástrojů a v samotném obrábění přesných děr, byla vystružovací hlavice MT3 od firmy HAM – FINAL s.r.o (nyní již FINAL TOOLS s.r.o.). Tato hlavice z cermetu je výměnná a upíná se tepelně do držáku. Hlavice má tři řezné zuby, dvě vodítka a jednu válcovou plochu mezi vodítky, sloužící jako technologická základna a také pro kontrolu měření. Z měření řezných sil a z testování se zákazníkům vyplynulo speciální rozložení zubů a vodítek po celém obvodu nástroje. Toto rozložení zamezuje škodlivým vibracím při řezném procesu a poskytuje dostatečnou podporu zubů v řezu. Díky klidnému chodu vzniká po vystružení tímto nástrojem přesná díra s výbornou drsností povrchu, kruhovitostí a válcovitostí. Velkou výhodou této hlavice je, že umožňuje obrábět přesné díry ve stupních přesnosti IT 5 – IT 6.



Obrázek 17. Vystružovací hlavice MT3 - rozložení zubů [11]



Obrázek 18. Cermetová vystružovací hlavice MT3 od firmy HAM – FINAL [11]

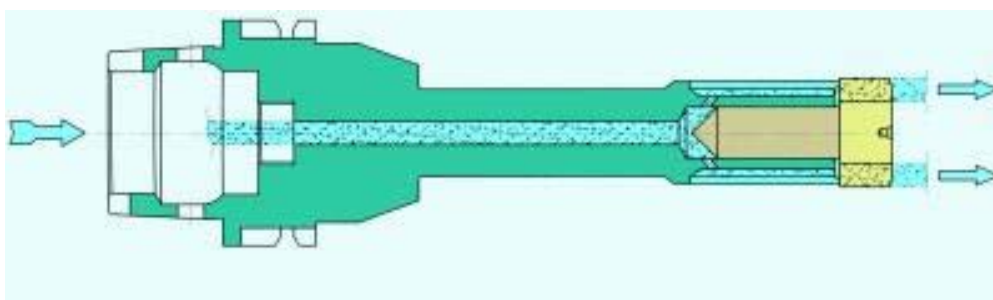
Testování v praxi probíhalo při obrábění hydraulického komponentu. Na vystružovací hlavici z cermetu byla nanášena tenká vrstva technologií PVD (Physical Vapour Deposition). Materiálem obrobku byla ocel 14 220 dle ČSN s pevností 1 000 MPa. Průměr obráběného otvoru byl $19,72^{+0,008}_{+0,037}$ mm. Délka vystružování byla 60 mm. Během vystružování byla použita procesní kapalina o tlaku 50 barů.

Řezné podmínky pro vystružování:

Řezná rychlost v_c [m/min]	200
Posuv na otáčku f_{ot} [mm]	0,4
Hloubka řezu a_p [mm]	0,08

Tabulka 6. Řezné podmínky vystružování 6 HAM – FINAL 3 [11]

Výsledkem tohoto testu bylo dosažení požadované hodnoty drsnosti R_a 0,4 μm a válcovitosti o hodnotě 0,01 mm. [11]



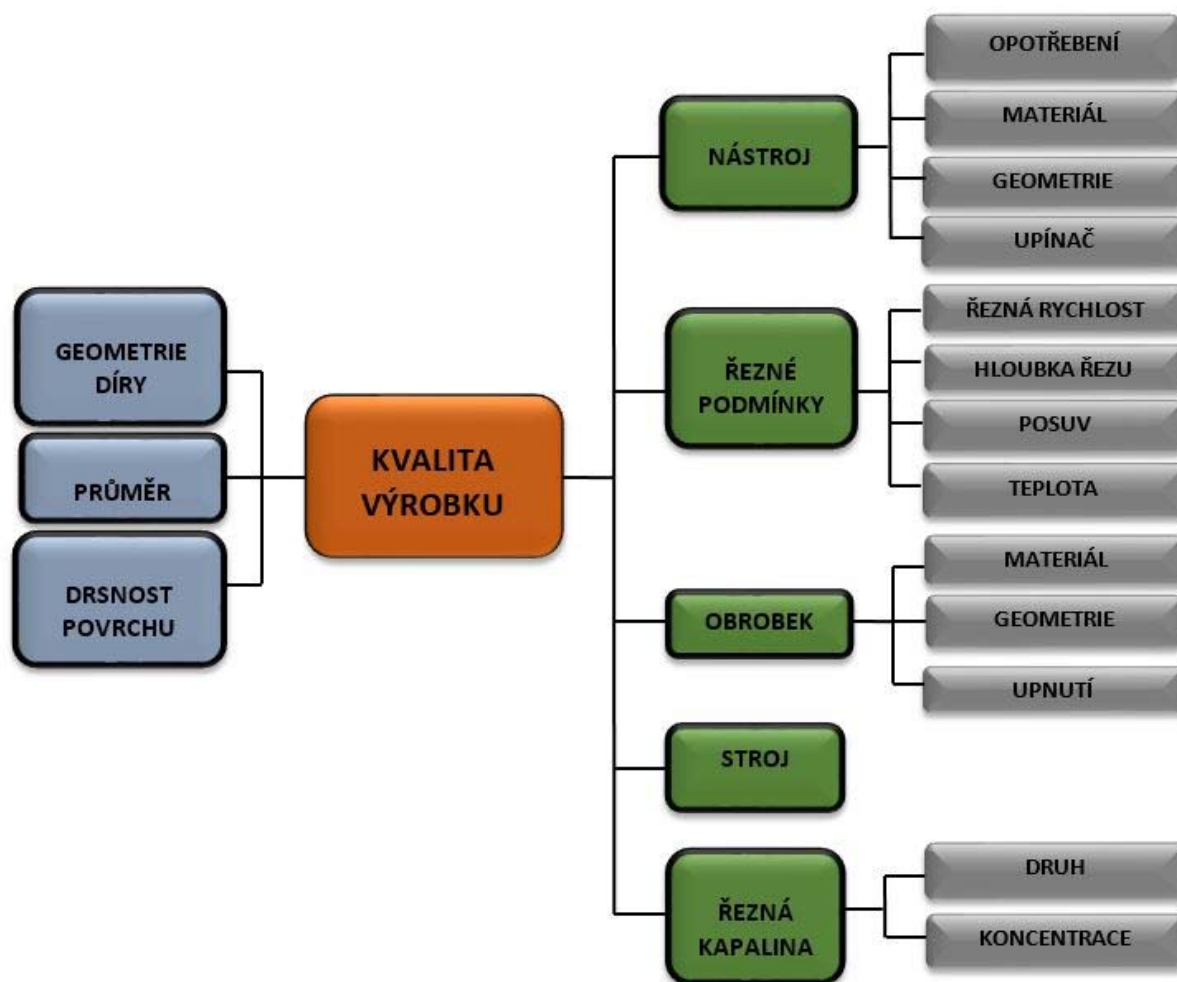
Obrázek 19. Schéma proudění procesní kapaliny přes upnutou hlavici MT3 [11]



Obrázek 20. Výstružník s tepelně upnutou hlavici MT3 [11]

2.7 Vystružování s proměnlivými faktory

Na Technické univerzitě v Kodani – Lyngby (DTU) v Dánsku se problémem výroby přesných děr také zajímali. Konkrétně jak nejlépe zlepšit tuto výrobu v reálných podmínkách, jaké lze dosáhnout přesnosti rozměru a drsnosti otvoru po operaci vystružování. Toho je možné dosáhnout správnou volbou a kombinací jednotlivých faktorů, které ovlivňují výrobu přesných děr.



Obrázek 21. Diagram faktorů ovlivňujících řezný proces [12]

Proto realizovali experiment, kdy vystružovali předvrtanou díru na rozměr 10,22 H7 mm. Předvrtaná díra byla rozměru 9,9 mm. Materiálem obrobku byla tyčovina z AISI 316L (17 349 dle ČSN austenitická nerezová ocel). Obrobky byly 15 mm vysoké. Experiment byl rozdělen na čtyři dny a na každý den připadlo vystružit 16 obrobků. Při experimentu bylo použito chlazení procesní kapalinou, která byla čistě minerální M a syntetická W1 (1%

koncentrace od firmy Rhenus). Výstružníky byly dva, oba z rychlořezné oceli se šesti zuby. Po každé sérii 16 obrobků s jedním výstružníkem byly dva obrobky vystruženy druhým výstružníkem za nejnižších řezných podmínek pro referenční účely a proto, že při těchto podmínkách se nejméně vyskytují nekontrolovatelné poruchy.

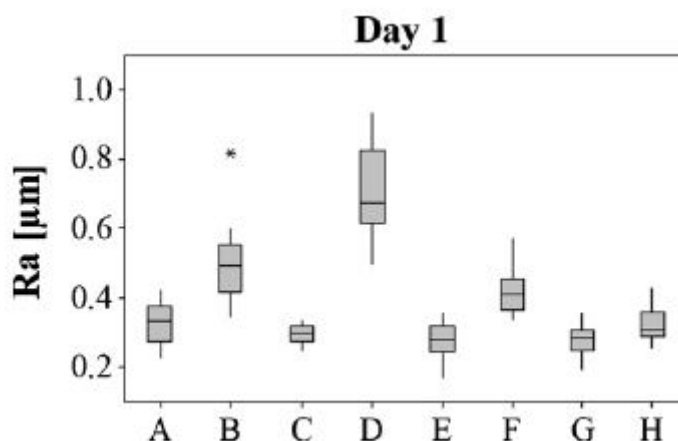


Obrázek 22. Výstružník z rychlořezné oceli

Řezné podmínky pro vystružování:

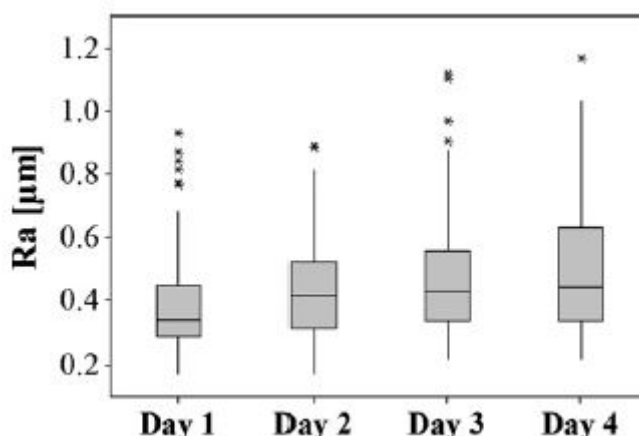
Proměnné faktory	-	+
Řezná rychlost v_c [m/min]	4,5	20,5
Posuv na otáčku f_{ot} [mm]	0,1	0,3
Procesní kapalina	W1	M

Tabulka 7. Řezné podmínky vystružování 7 DTU [12]



Obrázek 23. Proměnlivé hodnoty drsností vzorků během prvního dne experimentu - A = W1 - 0,1 - 4,5; B = W1 - 0,1 - 20,5; C = W1 - 0,3 - 4,5; D = W1 - 0,3 - 20,5; E = M - 0,1 - 4,5; F = M - 0,1 - 20,5; G = M - 0,3 - 4,5; H = M - 0,3 - 20,5 [12]

Na **Obrázku 23**. lze vidět srovnání hodnot drsností R_a jednotlivých vystružených vzorků v závislosti na zvolených kombinací faktorů při vystružování během prvního dne experimentu. Nejlepších hodnot drsností R_a bylo dosaženo při syntetickém chlazení, posuvu 0,3 mm/ot a řezné rychlosti 4,5 m/min. Naopak nejhorší drsnost R_a vykazovaly vzorky vyrobené při syntetickém chlazení, posuvu 0,3 mm/ot a řezné rychlosti 20,5 m/min.



Obrázek 24. Graf změn drsnosti vystružených vzorků v průběhu dnů [12]

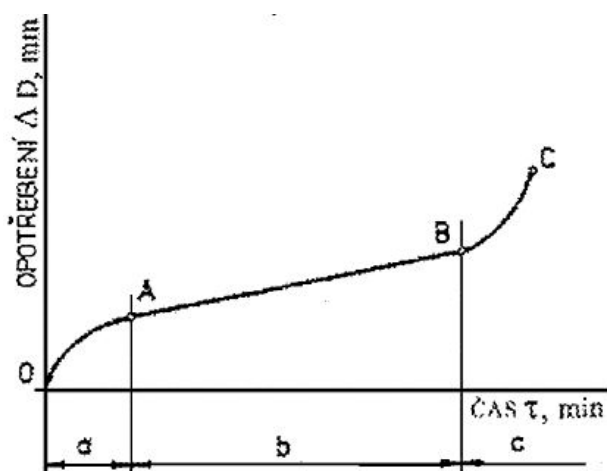
Obrázek 24. zobrazuje jak se v průběhu celého experimentu a všech čtyř dnů měnila drsnost Ra vystružených obrobků. Lze vidět, že s přibývajícím ujetou drahou výstružník hůře dokončoval povrch díry. Což je rozpoznatelné z rozšiřujícího se variačního rozpětí naměřených dat.

Nejmenší odchylka od průměru při nízké řezné rychlosti a posuvu a chlazení W1 byla 0,020 mm. Odchylka při vysoké řezné rychlosti a posuvu a stejném chlazení činila 0,025 mm.

Závěrem bylo řečeno, že současný stav operace vystružování přesných děr se sotva blíží k ideálu a je důležité, aby pokračoval výzkum v této oblasti. K základnímu poznání této operace postačí tři faktory. Tři proměnné, které je ale nutné ve správném rozsahu zvolit. Důležité je poté všechna naměřená data správně vyhodnotit. [12]

2.8 Vystružování pomocí hlavice MT3 HAM – FINAL 4

K výrobě přesných děr operací vystružování je důležité mít správně zvolené řezné podmínky a nástroje. Nelze ovšem okamžitě začít obrábět zcela novým nástrojem. Takový nástroj je nutné tzv. „zaříznout“. Tedy na zkušebních vzorcích ho opotřebovat do stavu, kdy bude velikost jeho opotřebování narůstat lineárně s časem řezání (**Obrázek 25.** - úsek křivky mezi body A a B). Nástroj poté mnohem přesněji zhotovuje požadované plochy.



Obrázek 25. Křivka opotřebování nástroje

K poznání, jak různě zaříznuté výstružníky dokončují obráběné plochy, byl ve spolupráci firmou HAM – FINAL s.r.o. (nyní již FINAL TOOLS s.r.o.) a externím zákazníkem navržen experiment, kdy za použití třech výstružníků s výměnou hlavicí MT3 s břity z cermetu, došlo ke zhotovení šesti přesných děr o průměru 17,8 mm. Každý výstružník byl jinak opotřebovaný. První výstružník byl zcela nový, druhý měl za sebou ujetou dráhu 58,932 m a třetí 117,864 m. S každým výstružníkem byly zhotoveny 2 díry. Obrobek měl rozměry 200 x 95 x 27 mm. Materiálem obrobku byla chrom – molybdenová ocel 42CrMo4 (15 142 dle ČSN) v zušlechtném stavu na 1 000 Mpa. Během experimentu byla použita procesní kapalina přiváděná vnitřkem nástroje s tlakem 40 bar. U vystružených děr se vyhodnocovala kruhovitost, válcovitost a drsnost obrobeného povrchu Ra.

Řezné podmínky pro vystružování:

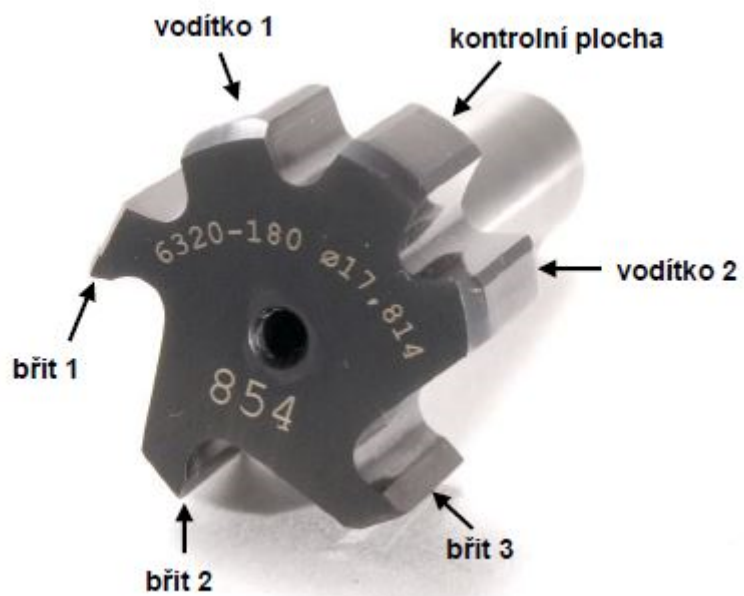
Řezná rychlost v_c [m/min]	200
Posuv na otáčku f_{ot} [mm]	0,42

Tabulka 8. Řezné podmínky vystružování 8 HAM – FINAL 4 [13]

Výsledky experimentu shrnuje následující tabulka.

Výstružník	Díra	Průměr [mm]	Průměrná kruhovitost [mm]	Válcovitost [mm]	Průměrná Drsnost Ra [μm]
1	1	17,8203	0,0033	0,0060	0,1735
	2	17,8209	0,0032	0,0061	0,1697
2	3	17,8118	0,0043	0,0089	0,1179
	4	17,8104	0,0044	0,0083	0,1229
3	5	17,8100	0,0037	0,0081	0,1403
	6	17,8114	0,0035	0,0066	0,1563

Tabulka 9. Naměřené hodnoty kruhovitosti, válcovitosti a drsnosti Ra po experimentu [13]



Obrázek 26. Vystružovací hlavice MT3 s břity z cermetu [13]

3 ANALÝZA A VYHODNOCENÍ REŠERŠNÍCH POZNATKŮ

Rešerše byla provedena se zaměřením na vliv řezných podmínek při vystružování. Dle klíčových slov byly vyhledávány články v elektronických informačních zdrojích, kde jsou v digitální podobě veškeré publikované články z odborných časopisů. Mezi články byly vybírány ty, které se zaměřují na vystružování a následné kvalitativní hodnocení vzniklé díry.

V největším zastoupení mezi vyhledanými články jsou ty, kde se vystružuje nástrojem z cermetu. Cermet je pro vystružování velmi vhodným materiálem, kombinuje tvrdost keramiky a houževnatost kovu a díky své tvrdé fázi vytváří při obrábění plochy s drsností Ra blíží se drsnosti po operaci broušení. Tím lze ušetřit na kvalitní dokončení obráběné plochy jednu operaci, šetří se čas a zároveň finanční prostředky na výrobu. Jak potvrdily články z rešerše, s cermetovým nástrojem bylo vždy dosaženo kvalitní a přesné obrobené plochy.

Dále si tento materiál udržuje vysokou stálost obráběných rozměrů, s narůstající ujetou drahou se málo opotřebovává a lze ho s úspěchem využít ve velkosériových a hromadných výroбах. Výstružníky z cermetu lze využívat i bez tenkých vrstev na břitech.

Cermet jako řezný materiál vyžaduje obrábění vysokými řeznými rychlostmi. Při takových podmínkách je schopný vytvářet kvalitní a přesný obrobený povrch s nízkou drsností Ra. Důležité je ovšem provádět takové vystružování na stroji, který je takových řezných podmínek schopný. Ze srovnání z *Tabulky 10*, vyplývá rozdíl řezných rychlostí pro nástroje z rychlořezné oceli a z cermetu. Pro cermet jsou řezné rychlosti až desetkrát vyšší. Nelze ovšem bezmyšlenkovitě zvolit řezné podmínky. S ohledem na obráběný materiál je volba správných řezných podmínek alfou a omegou celého průběhu vystružování, zejména pro tvorbu třísek. Je důležité, aby se tvořili krátké obloučkovité třísky, které lze snadno odstranit z místa řezu. Dlouhé stužkovité třísky často ulpívají na nástroji, mohou ho poškodit anebo jsou upěchovány na dno neprůchozí díry. Poté je nutné je manuálně odstranit, čímž může dojít k poškození obrobeného povrchu poškrábáním.

Řezná rychlost a posuv jsou pro vystružování nesmírně důležité faktory. Pokud obrábíme vyššími rychlostmi a posuvy je nezbytné použít procesní kapalinu. Ta nejen že má za úkol chladit nástroj v řezu, ale také odvádět vzniklé třísky z místa řezu tak, aby bezpečně opustili obráběnou díru a neznehodnotili již obrobený povrch. Podstatný je samotný způsob přívodu kapaliny do řezu. Pro vystružování, kdy je nástroj po celém svém obvodu obklopen obráběným materiálem je nejvhodnější způsob přívodu kapaliny vnitřkem nástroje a to buď středem nástroje v ose rotace nebo přímo na čela jednotlivých břitů nástroje. Procesní kapalina musí mít dostatečný tlak. Pro nástroje z cermetu je doporučená minimální hodnota 20 barů.

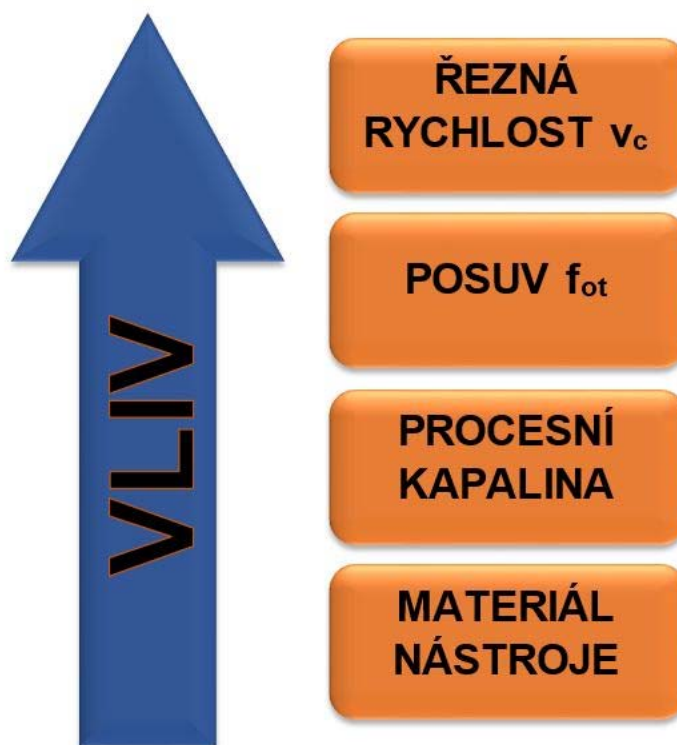
Z rešerše vyplývá, že nejvíce ovlivňujícími faktory na operaci vystružování jsou řezná rychlost a posuv. Právě tyto faktory totiž nejvíce rozhodují o výsledku celého vystružování přesných děr a výrazně se podepisují pod kvalitativní parametry díry. Konkrétně pod výslednou drsnost obrobeného povrchu Ra, kruhovitost, válcovitost a kolmost díry. Nastavení hodnot řezné rychlosti a posuvu před vystružováním musí proběhnout s ohledem na materiál nástroje a materiál obrobku, dále na zvoleném obráběcím stroji a jeho výkonovém rozsahu. Doporučené hodnoty řezných rychlostí a posuvů lze nalézt v katalozích výrobců řezných nástrojů.

Většina publikovaných článků se zabývá vystružováním různých druhů materiálů, testováním nových nástrojů, vystružováním atypických rozměrů děr a kvalitativním

hodnocením takto vystružených děr. Velmi často je hodnoceno opotřebení nástroje. Dosud nebyl publikován článek, který by se zabíral problematikou vystružování komplexně, tedy od počátku výroby díry. Od prvního upnutí obrobku do stroje, před-přípravou díry, vrtáním a následně vystružováním a dalšími okolnostmi, vstupujícími do této operace.

Faktor	HAM-FINAL VYH	HAM-FINAL 2	MAPAL	GÜHRING 1	GÜHRING 2	HAM-FINAL 3	DTU		HAM-FINAL 4
Řezná rychlost [m/min]	180	158	130	120	120	200	4,5	20,5	200
Posuv na otáčku [mm]	0,6	-	-	-	-	0,4	0,1	0,3	0,42
Posuvová rychlost [mm/min]	-	2 160	1 500	2 122	2 455	-	-	-	-

Tabulka 10. Srovnání řezných podmínek



Obrázek 27. Grafické znázornění vlivů jednotlivých faktorů na proces vystružování

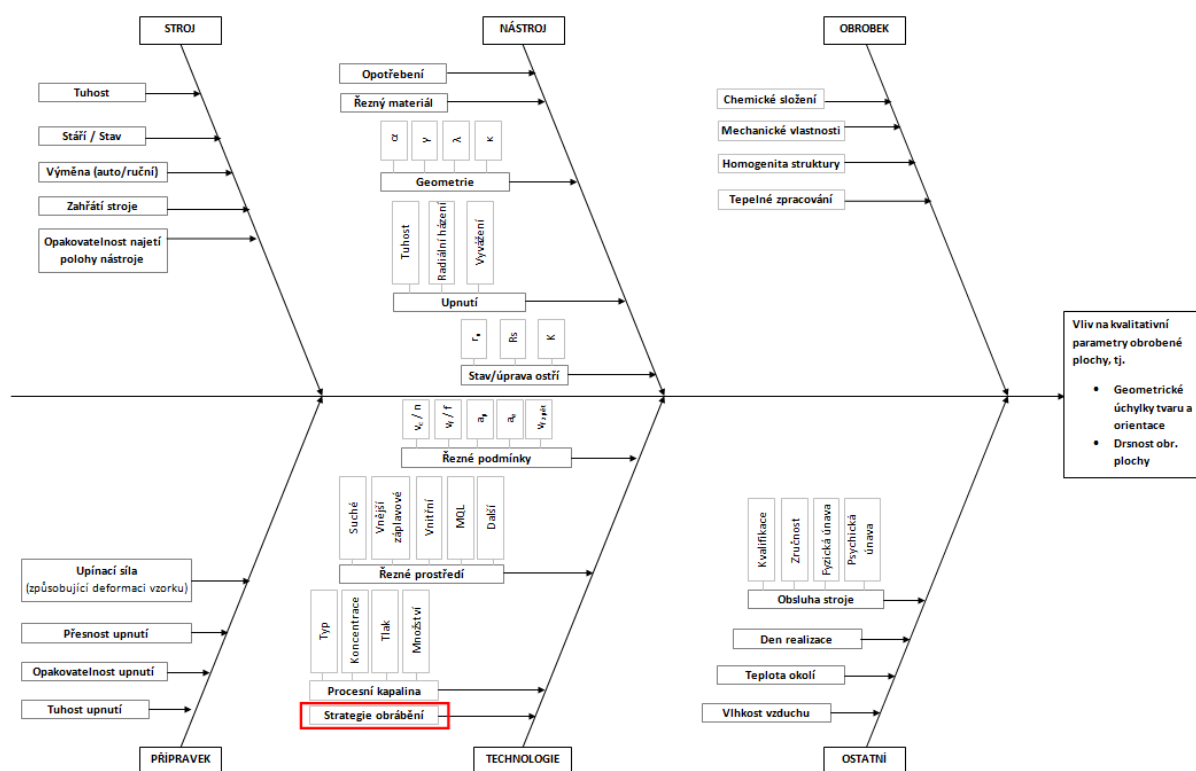
4 VLIV TECHNOLOGIE VRTÁNÍ NA KVALITU VYSTRUŽENÉ DÍRY

Nelze předpokládat, že vystružením jakékoliv vyvrtané díry lze dosáhnout nízké drsnosti povrchu Ra a nízkých hodnot válcovitosti, kolmosti a kruhovitosti. Při výrobě přesných děr velmi záleží, jak perfektně bude díra před vystružením zhotovena. Po vrtání je obrobený povrch díry velmi drsný, jsou na něm patrné stopy po nástroji a geometrické parametry jsou špatné. Výstružník je sice obráběcí nástroj, ale je uzpůsoben odebrat pouze malou hloubku třísky a nedokáže odstranit velké nedostatky po vrtáku (např. banánovitý tvar díry). Je tedy žádoucí, zvolit optimální strategii vrtání tak, aby díra po vystružení měla co nejlepší parametry. A právě tím se zabýval první experiment. Konkrétně tedy vyhodnotit dle naměřených dat nejlepší strategii vrtání a technologii před-přípravy díry.

Před experimentem byla provedena důkladná rešerše o vrtání. Taktéž byly vyhledávány dle klíčových slov články z elektronických informačních zdrojů. Cílem hledání bylo nalézt články, ve kterých bylo vrtáno nástrojem ze slinutého karbidu do oceli s použitím procesní kapaliny. Z každého vybraného článku proběhla analýza řezných podmínek a dosažených výsledků vrtání. [14]

Na základě znalostí z teorie obrábění a z informací z rešerše byl sestaven diagram příčin a následků (**Obrázek 27.**). V něm jsou na straně levé všechny možné faktory, které ovlivňují obráběcí proces. Na straně pravé jsou faktory, které budou po experimentu měřeny a vyhodnocovány. Tedy vlevo jsou všechny možné okolnosti (příčiny), které mají vliv na parametry (následky) vpravo.

V diagramu je červeně zvýrazněna položka Strategie obrábění. Právě na tu byl tento experiment zaměřen. Konkrétně na zvolení vhodné strategie vrtání díry před následným vystružením. [15]



Obrázek 28. Diagram příčin a následků [15]

4.1 Plán experimentu

Experiment byl rozdělen na dvě části. V první části došlo k vyvrtání díry do zkušebního vzorku vybranou strategií a v druhé části byl další nový vzorek vyvrtán stejnou strategií a následně i vystružen, aby se zjistil vliv zvolené strategie vrtání na vystružování. Značení vrtaných vzorků bylo DR01A a vystružovaných vzorků DR01B. Další podrobné značení dle jednotlivých strategií a technologií je v **Tabulce 11**.

Faktor	Úroveň			
	1.	2.	3.	4.
Před-příprava díry	Vrtání do plna	Navrtání středícího důlku		
	DR01A.0XX	DR01A.1XX		
Technologie vrtání	Pracovní posuv	Pracovní posuv s přerušením (L/D)	Snížený pracovní posuv pilotní (50%v 0,2xL/D) + pracovní posuv	Snížený pracovní posuv pilotní (50%v 0,2xL/D) + pracovní posuv s přerušením
	DR01A.X0X	DR01A.X1X	DR01A.X2X	DR01A.X3X

Tabulka 11. Plán experimentu s technologiemi před-přípravy a vrtání [15]

V kombinaci jednotlivých technologií před-přípravy a vrtání bylo zhotoveno 48 vzorků pouze vrtaných a 48 vrtaných a vystružených, celkově bylo zhotoveno během experimentu 96 vzorků. Všechny vzorky byly před měřením popisovány laserem.



Obrázek 29. Hotový vystružený vzorek popsáný laserem

4.2 Obrobek

Obrobkem pro tento experiment byla tyč o průměru 30h9 mm a délce 550 mm. Tyče byly z materiálu chrom – molybdenová ocel 42CrMo4 (15 142 dle ČSN) v zušlechtěném stavu s pevností v ose rotace 1 000 Mpa. Tyto polotovary byly upínány do tříčelistového sklíčovla soustruhu.

4.3 Vrtání

Jak vypovídá *Tabulka 11.* výše, vrtalo se čtyřmi strategiemi. Pracovním posuvem, pracovním posuvem s přerušením a sníženými pracovními posuvy s přerušením. Takto se vrtalo buď do plného materiálu, nebo byl předtím zhotoven navrtáním středící důlek.

Vrták byl monolitní ze slinutého karbidu s tenkou vrstvou TiAlN a byl upnutý v hydraulickém upínači. Průměr vrtáku byl 11,8 mm. Výrobce byla společnost Nachreiner. Během vrtání byla použita procesní kapalina o tlaku 100 barů, která byla přiváděna vnitřkem nástroje.

Řezné podmínky pro vrtání:

Řezná rychlost v_c [m/min]	80
Posuv na otáčku f_{ot} [mm]	0,19

Tabulka 12. Řezné podmínky pro vrtání experimentu 1

4.4 Vystružování

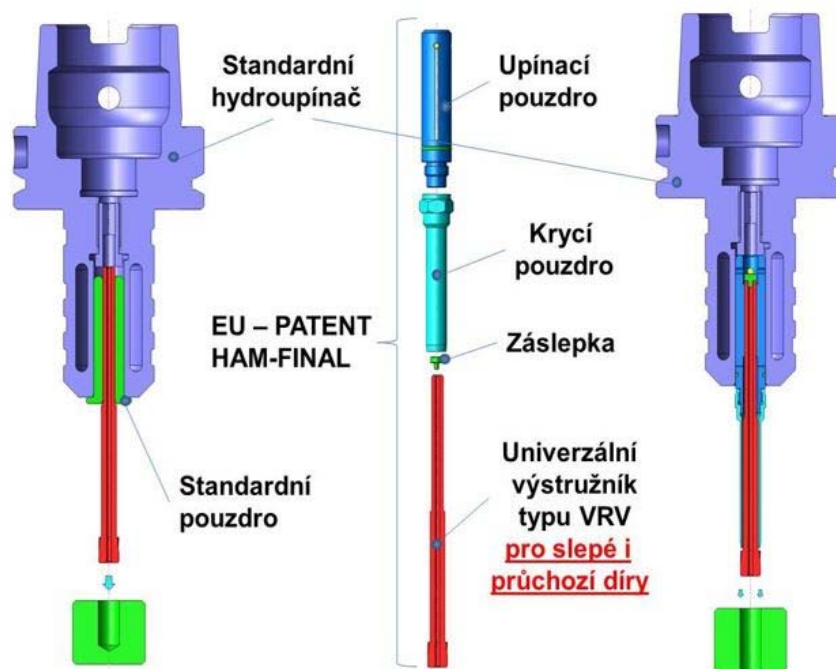
Při experimentu se vystružoval každý druhý vzorek. Nástrojem byl patentovaný vysokorychlostní výstružník (VRV) od firmy HAM – FINAL s.r.o. (nyní již FINAL TOOLS s.r.o.). Tento výstružník měl 6 zubů s pájenými břitovými destičkami z cermetu bez aplikace

tenké vrstvy. Výstružník byl pro umožnění excentricity upnutý v RC hydraulickém upínači. Poloměr zaoblení ostří výstružníku byl $8\ \mu\text{m}$ a radiální házení $2\ \mu\text{m}$. Při vystružování byla taktéž použita procesní kapalina, přiváděna do místa řezu vnitřkem výstružníku. Tlak kapaliny byl 30 barů.

Řezné podmínky pro vystružování:

Řezná rychlost v_c [m/min]	180
Posuv na otáčku f_{ot} [mm]	0,72

Tabulka 13. Řezné podmínky pro vystružování experimentu 1



Obrázek 30. Patentovaný VRV výstružník firmy HAM – FINAL [1]

4.5 Stroj





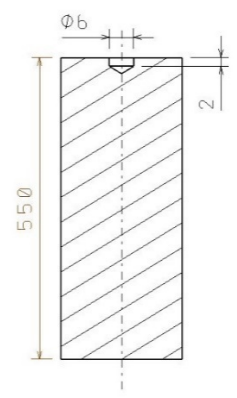
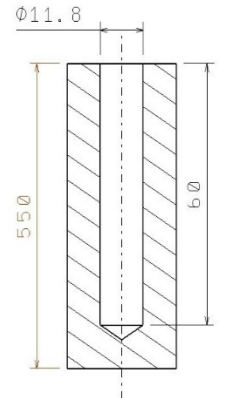
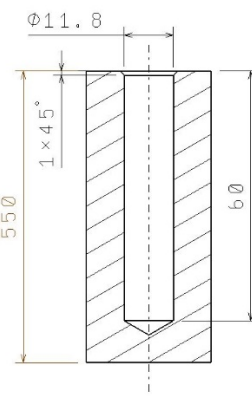
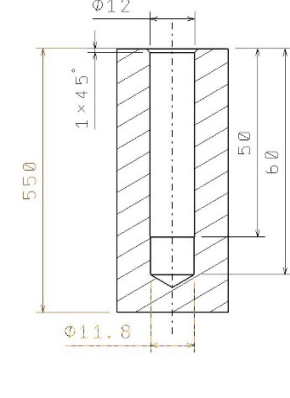
Experiment probíhal na multifunkčním soustružnickém obráběcím centru od DMG.



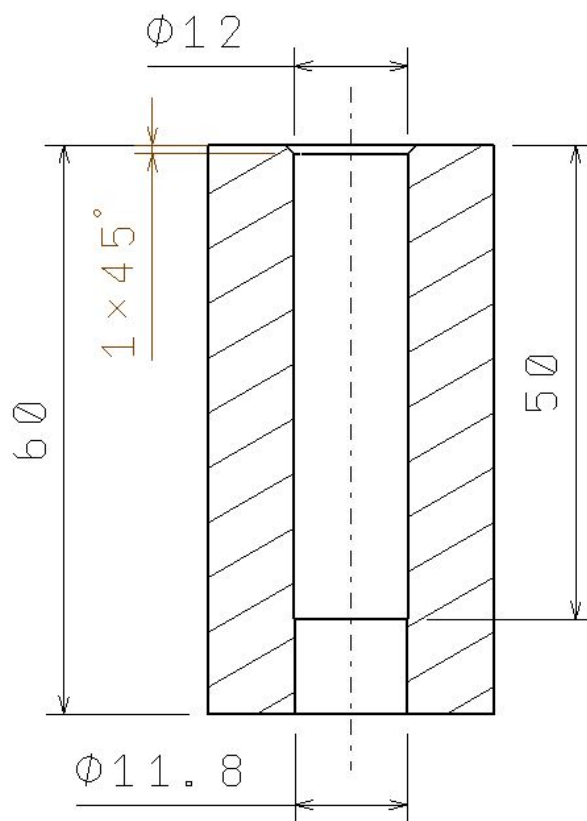
Obrázek 31. Soustružnické centrum DMG Mori CTX beta 1250 TC 4A

4.6 Průběh experimentu

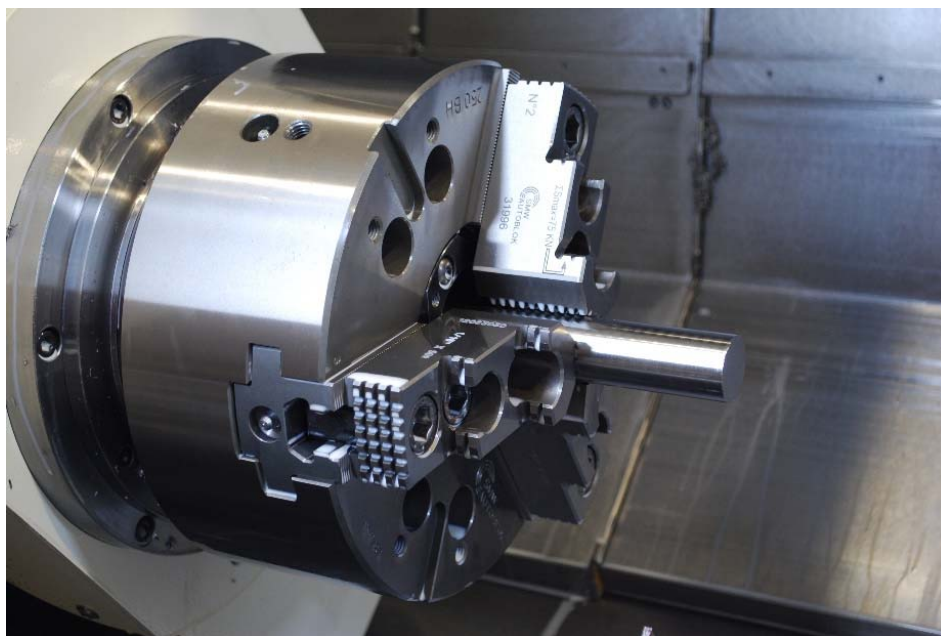
Před započítím samotného experimentu proběhlo zaříznutí vrtáku a výstružníku. Tyčové polotovary byly upínány do tříčelistového sklíčidla soustruhu. Výměna a upínání nástrojů probíhala ručně, a to do frézovacího vřetene multifunkčního soustruhu. Důvodem ručního upínání a výměny nástrojů bylo vyloučení chyby opakovaného najetí polohy frézovacího vřetene do osy rotace sklíčidla s obrobkem. Poté následovalo samotné vrtání díry nebo popřípadě, dle zvolené strategie před-přípravy, navrtání středícího důlku. Vrtala se díra do osy rotace obrobku o průměru 11,8 mm v délce 60 mm. Vystružovala se díra na průměr 12H7 mm do délky 50 mm. Po operaci vrtání, byla každému vzorku srážecem sražena hrana díry. Dalším krokem bylo upíchnutí vzorku z tyčoviny. K tomu bylo zapotřebí druhé sklíčidlo soustruhu, které plynule při otáčkách uchopilo obrobek, a následně v revolverové nástrojové hlavě upnutý upichovací nůž upíchl vzorek o délce 60 mm. Jako poslední operací před začátkem dalšího obráběcího cyklu bylo zarovnání čela tyče soustružnickým nožem.

Druh stroje: ➤ Soustružnické centrum DMG Mori CTX beta 1250 TC 4A		Chlazení: Vnitřní/Vnější		Materiál obrobku: 42CrMo4 (15 142 dle ČSN)
		Typ díry: Průchozí		Pevnost: 1 000 [MPa]
OPERACE:	Navrtání	Vrtání	Sražení hrany	Vystružování
NÁSTROJ:	Sředicí vrták	Vrták $\phi 11,8$	Jednobřítý srážec	VRV $\phi 12H7$
MAT. NÁSTROJE:	SK + povlak	SK + povlak TiAlN	VBD	Cermet
UPNUTÍ NÁSTROJE:	Hydraulický upínač	Hydraulický upínač	Hydraulický upínač	RC Hydraulický upínač
NÁSTROJ:				
ZNÁZORNĚNÍ:				
Počet břitů:	2	2	1	6
v_c [m/min]	-	80	-	180
n [1/min]	1 725	2 158	-	4 774
f_{ot} [mm/ot]	-	0,19	-	0,72
v_f [mm/min]	100	410	-	3 437

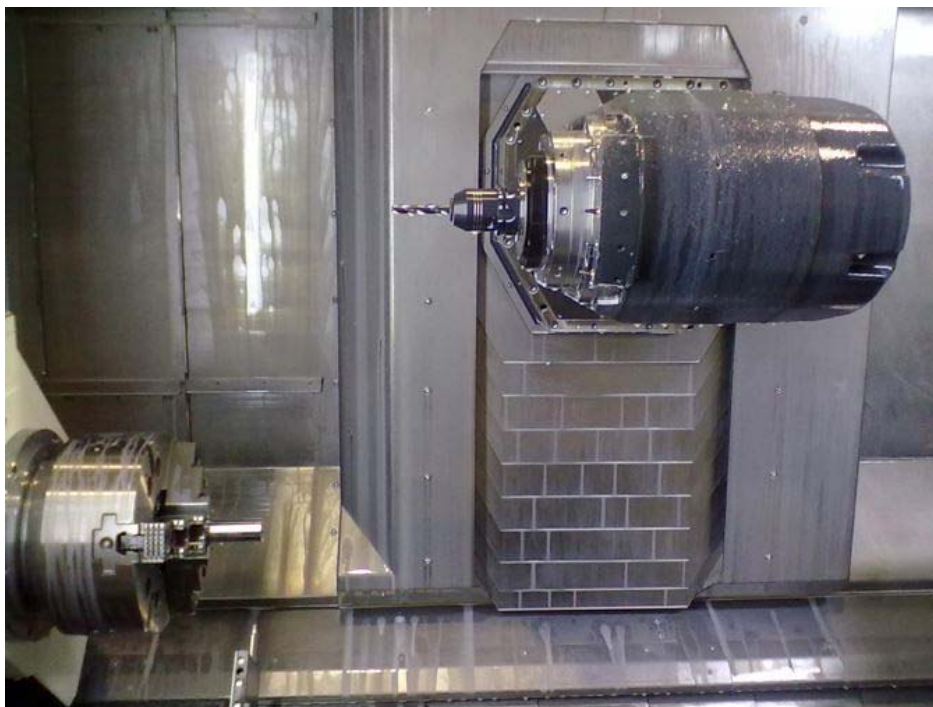
Tabulka 14. Technologický postup experimentu



Obrázek 32. Hotový vzorek po upíchnutí



Obrázek 33. Obrobek upnutý ve sklíčidle soustruhu



Obrázek 34. Situace ve stroji před vrtáním



Obrázek 35. Použité nástroje s upínači pro experiment - zleva navrtávák, srážecí hran, vrták a výstružník

4.7 Měření vzorků

Na vrtaných i vystružených zkušebních vzorcích se měřila drsnost povrchu Ra na drsnoměru Hommel Etamic T8000.



Obrázek 36. Drsnoměr Hommel Etamic T8000 [444]

Na kruhoměru Taylor Hobson Talyrond 585 Lt se měřila válcovitost, kruhovitost a kolmost jak vrtaných, tak i vystružených děr.



Obrázek 37. Kruhoměr Taylor Hobson Talyrond 585 Lt [444]

4.8 Vyhodnocení

Vyhodnocení naměřených dat proběhlo dvěma způsoby. První způsob byly grafy vyjadřující polohu střední hodnoty s ohledem na variační rozpětí naměřených dat. Na grafech je vždy srovnání zvoleného parametru ve dvou verzích před-přípravy díry (vrtání do plna, navrtání středícího důlku). Vodorovné čáry grafu znázorňují jednotlivé stupně přesnosti od IT

5 až po IT 10. Svislé čáry grafu znázorňují variační rozpětí naměřených dat jednotlivých strategií vrtání pro vrtané vzorky a pro vystružované. Na těchto čarách je také vyznačena poloha střední hodnoty naměřených dat.

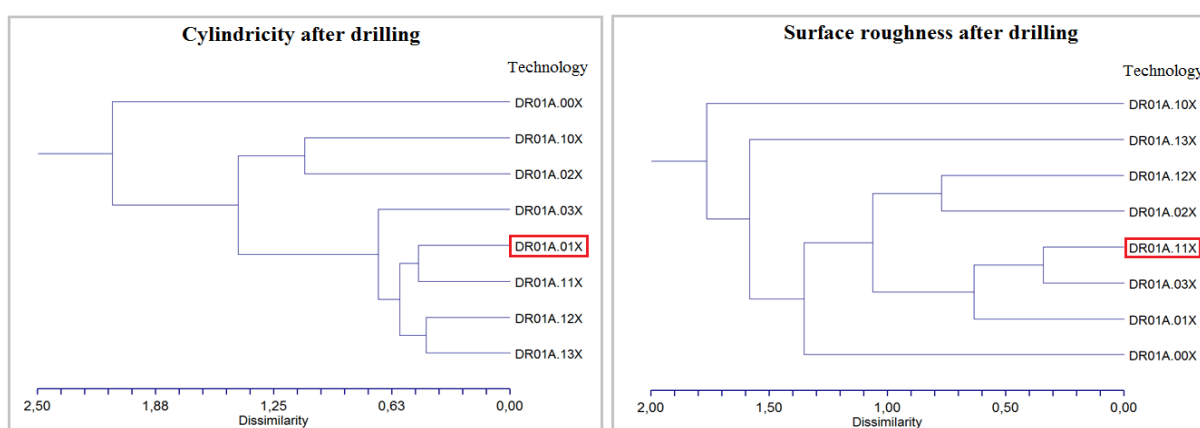
Ze srovnání grafů válcovitosti (viz **Příloha č. 2, Graf 1. a Graf 2.**) vyplývá, že technologie před-přípravy díry pomocí navrtání středícího důlku zlepšila válcovitost vrtaných děr. Následným vystružením těchto děr se výrazně zlepšila válcovitost a to konkrétně ze stupně přesnosti IT 9 na stupeň IT 6.

Jako nejvhodnější varianta z hlediska válcovitosti vychází technologie **vrtání do plna, pracovním posuvem s přerušením**. Tento výběr je závislý nejen na dosažené střední hodnotě vrtaných a vystružených vzorků, ale zejména také na variačním rozpětí naměřených dat, které je právě u této technologie nejmenší.

Z grafů drsnosti (viz **Příloha č. 2, Graf 1. a Graf 2.**) je patrné, že technologie před-přípravy navrtání středícího důlku poměrně výrazně snížila variační rozpětí naměřených dat oproti před-přípravě vrtání do plna. Dále je možné vyzorovat z variačních rozpětí, že vystružník vždy dokázal reagovat na nedostatky díry po vrtání.

Nejvhodnější varianta byla vybrána technologie **vrtání s navrtáváním, pracovním posuvem s přerušením**. Při této technologii bylo dosaženo nejužšího variačního rozpětí naměřených dat a střední hodnota je v tomto případě nejnižší.

Druhým způsobem vyhodnocení byla shluková analýza. Tato analýza patří mezi statistické metody. Shluková analýza třídí jednotky do skupin tak, aby si jednotky, které náleží do stejné skupiny, byly více podobné než jednotky ve skupinách jiných. Výstupem z této analýzy jsou tzv. dendrogramy. V těchto dendrogramech na spodní vodorovné ose je míra podobnosti. Tím pádem čím více se nacházíme v dendrogramech vpravo, tím více jsou si jednotlivé skupiny podobné.



Graf 1. Dendrogramy válcovitosti a drsnosti Ra

Z pohledu válcovitosti jsou si nejvíce podobné technologie před-přípravy vrtání do plna a vrtání s navrtáváním středícího důlku, obojí strategií pracovním posuvem s přerušením (DR01A.01X a DR01A.11X). Technologie vrtání s navrtáváním středícího důlku, strategiemi sníženým pracovním posuvem a sníženým pracovním posuvem s přerušením (DR01A.12X a

DR01A.13X) si jsou sice více podobné, ale nedosahují uspokojivých výsledků z hlediska válcovitosti díry pouze vrtané.

Co se týká drsnosti, je z dendrogramu jasné, že nejvíce podobné jsou si technologie vrtání s navrtáním středícího důlku, strategií pracovním posuvem s přerušením a vrtání do plna strategií sníženým pracovním posuvem s přerušením (DR01A.11X a DR01A.03X).

Červeně jsou v dendrogramech vyznačeny technologie, které byly zvoleny jako nejvhodnější pro vrtání před vystružováním. Jsou to **vrtání do plna pracovním posuvem s přerušením a vrtání s navrtáním středícího důlku pracovním posuvem s přerušením (DR01A.01X a DR01A.11X)**.

Z experimentu lze vyvodit několik závěrů. Válcovitost vrtaných děr se pohybovala ve stupních přesnosti IT 9 až IT 10 a drsnost obrobeného povrchu Ra těchto vrtaných děr byla 0,2 – 0,8 μm . Válcovitost děr vystružených byla v rozmezí stupně přesnosti IT 6 – IT 7 a drsnost povrchu Ra 0,15 – 0,4 μm . Dále z experimentu vyplývá a z grafů lze tuto skutečnost potvrdit, že pomocí navrtání středícího důlku se snižuje variační rozpětí naměřených dat.

Experiment vyvrátil myšlenku o přímé úměře mezi vrtanými a vystruženými otvory. Neplatí, že čím vyšší přesnost vrtaných děr, tím vyšší přesnost vystružených děr. Vysvětlení tohoto zjištění plyne z výstružníku samotného, neboť ten dokázal vždy reagovat na vzniklé nedostatky díry po předchozím vrtání.

Větší vliv na kvalitu vystružené díry má samotná zvolená strategie vrtání a až poté ovlivňuje kvalitu díry technologie před-přípravy díry.

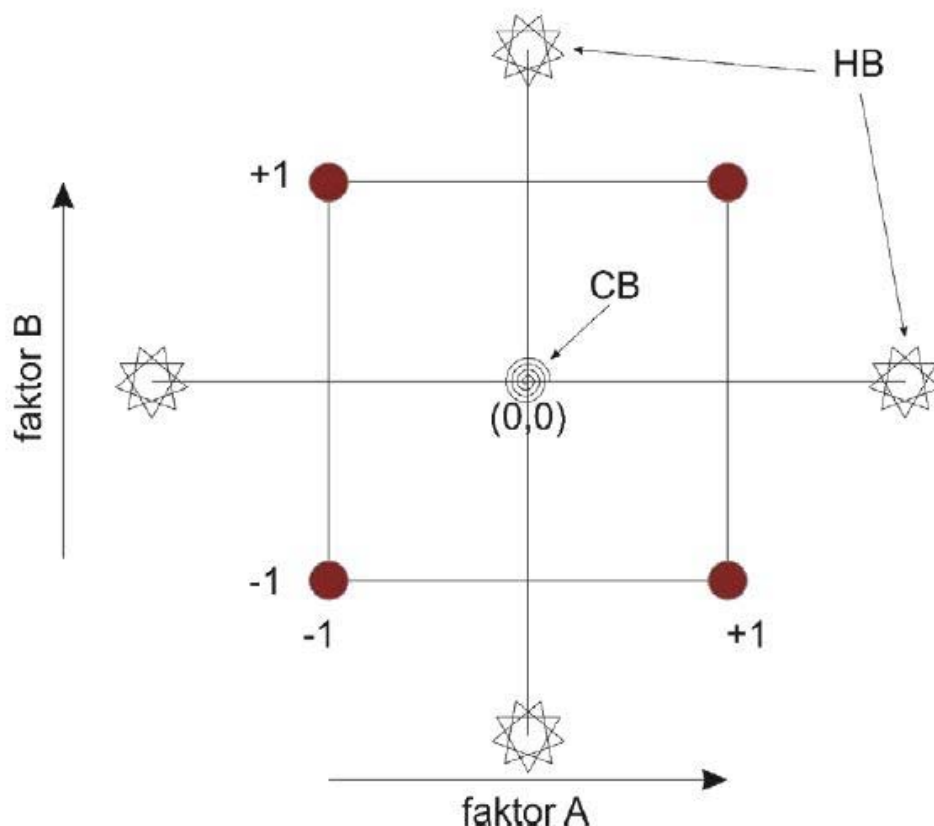
5 NÁVRH A REALIZACE EXPERIMENTÁLNÍHO STUDIA, VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ

K důkladnému poznání celého procesu vystružování přesných děr nestačí pouze znalosti z teorie obrábění, ale též poznatky z literární rešerše a studium všech ovlivňujících technologických faktorů, které do tohoto procesu vstupují. Podstatné před každým experimentem je provést důkladnou rozvahu o tom, co bude předmětem zkoumání, co by mělo být jeho výstupem a podle toho nastavit podmínky experimentu, aby výstup z něj byl co nejvíce jednoznačný. Operace vystružování, kterou dokončujeme přesné díry, je z hlediska možností výzkumu stále ještě neprobádanou oblastí. Proto byl sestaven plán experimentu, díky kterému by mělo dojít ke shromáždění informací o jednotlivých ovlivňujících parametrech vystružování.

Jedná se o první ze série experimentů o vystružování. Je možné jej označit jako pre-experiment. Na jeho výsledcích budou postaveny další experimentální činnosti.

5.1 Plán experimentu

Aby bylo možné z experimentu vyvodit závěry o tom, jak jednotlivé zvolené faktory více či méně ovlivňují operaci vystružování, byl pro naplánování experimentu zvolen tzv. Centrální ortogonální kompozitní plán.



Obrázek 38. Ortogonální centrálně kompozitní plán experimentu

HB – hvězdicové body

CB – centrální bod (bod ve středu plánu)

Tento typ plánu experimentu je schopen odhalit i nelineární vztahy. **Obrázek 38.** zobrazuje grafický náčrt tohoto plánu experimentu. Ten má 5 úrovní. Standardní centrální bod 0 (CB), uzlové body -1 a 1 a k nim jsou ještě přidány hvězdicové body HB.

Pro tento experiment byl podstatný výběr samotných faktorů, které ovlivňují vystružování přesných děr a které budou během experimentu variovány. V tomto případě to byly řezná rychlost, posuv, zpětný posuv a excentricita výstružníku.

Jelikož se jedná o pre-experiment, byly vybrány právě tyto faktory, které vyplynuly jak z rešerše, tak z úvahy o ovlivňujících faktorech vystružování. V další experimentální činnosti by mělo dojít k zúžení výběru faktorů, popřípadě k doplnění o nové skutečnosti, které vyvstanou právě z tohoto pre-experimentu.

Kód faktoru	Označení faktoru	Jednotka faktoru	Úroveň faktoru				
			- α	-1	0	+1	+ α
x ₁	v _c (řezná rychlost)	[m/min]	150	160	180	200	210
x ₂	f _{ot} (posuv)	[mm/ot.]	0,60	0,64	0,72	0,8	0,84
x ₃	v _{f zpět} (zpětný posuv)	[m/min]	15	20	30	40	45
x ₄	excentricita	[μ m]	2	4	8	12	14

Tabulka 15. Nastavení experimentu

V tabulce jsou pod úrovněmi - α a + α označeny hvězdicové body HB z náčrtu centrálně kompozitního plánu.

Hodnoty jednotlivých faktorů byly zvoleny dle tabulek a možností stroje a cermetového nástroje. Výhodou Centrálně ortogonálního kompozitního plánu je malý počet zhotovených vzorků. Konkrétně v tomto případě postačí 26 vzorků, které budou zhotoveny kombinacemi řezných podmínek a excentricit z **Tabulky 15.**

Pořadové číslo	v_c [m/min]	f_{ot} [mm/ot.]	v_f zpět [m/min]	excentricita [μm]
4	180	0,72	30	2
1	200	0,64	20	4
6	160	0,8	40	4
9	160	0,64	40	4
10	200	0,8	20	4
11	200	0,64	40	4
16	200	0,8	40	4
22	160	0,8	20	4
25	200	0,64	20	4
2	180	0,72	45	8
3	150	0,72	30	8
7	180	0,72	15	8
12	180	0,84	30	8
19	180	0,72	30	8
20	210	0,72	30	8
21	180	0,6	30	8
26	180	0,72	30	8
5	160	0,64	20	12
8	160	0,84	40	12
13	200	0,8	40	12
14	200	0,64	20	12
15	200	0,8	20	12
17	160	0,64	40	12
18	160	0,8	20	12
24	200	0,64	40	12
23	180	0,72	30	14

Tabulka 16. Kombinace řezných podmínek pro experiment

Pořadí v *Tabulce 16.* je seřazeno dle excentricity. Je to z důvodu nastavování excentricity, které je složité a dle pořadových čísel by docházelo k neustálému přenastavování, což by bylo velmi časově náročné. Takto došlo k nastavení hodnoty excentricity výstružníku a ta byla pravidelně kontrolována v průběhu zhotovování vzorků.

5.2 Obrobek

Obrobky byly z materiálu 42CrMo4 (chrom – molybdenová ocel, 15 142 dle ČSN), která byla v zušlechtěném stavu s pevností v ose rotace 1 000 MPa. Znovu se jednalo o tyčové polotovary o průměru 30h9 v délce 90 mm.



Obrázek 39. Obrobek

5.3 Stroj

Experiment proběhl na multifunkčním 5ti osém frézovacím centru od firmy DMG.



Obrázek 40. DMU 65 monoblock

5.4 Navrtávání

Z experimentu, který se zabýval vlivem technologie vrtání na kvalitu vystružené díry, byla vybrána nejvhodnější strategie vrtání s navrtáváním, pracovním posuvem s přerušením. Tedy každému vzorku před vrtáním byl navrtáváním zhotoven středící důlek. Navrtávák byl upnutý v hydraulickém upínači.

Řezné podmínky pro navrtávání:

Otáčky za minutu n [1/min]	1 725
Posuvová rychlost v_f [mm/min]	100

Tabulka 17. Řezné podmínky pro navrtávání

5.5 Vrtání

Jak bylo zmíněno výše, z předchozího experimentu byla vybrána nejvhodnější strategie vrtání. U tohoto experimentu byly použity stejné řezné podmínky pro vrtání a stejné vrtáky.

Vrtáky byly monolitní ze slinutého karbidu s tenkou vrstvou TiAlN. Průměr vrtáků byl 11,8 mm. Přerušení řezu bylo vždy řešeno odskokem nástroje v díře po 1D. Vrtáky byly upínány do hydraulického upínače.

Řezné podmínky pro vrtání:

Řezná rychlost v_c [m/min]	80
Posuv na otáčku f_{ot} [mm]	0,19

Tabulka 18. Řezné podmínky pro vrtání



Obrázek 41. Vrták upnutý v hydraulickém upínači

5.6 Vystružování

Při vystružování bylo variováno nejvíce parametrů řezného procesu. U každého zhotoveného vzorku se měnila řezná rychlost, zpětný i pracovní posuv a také excentricita výstružníku.

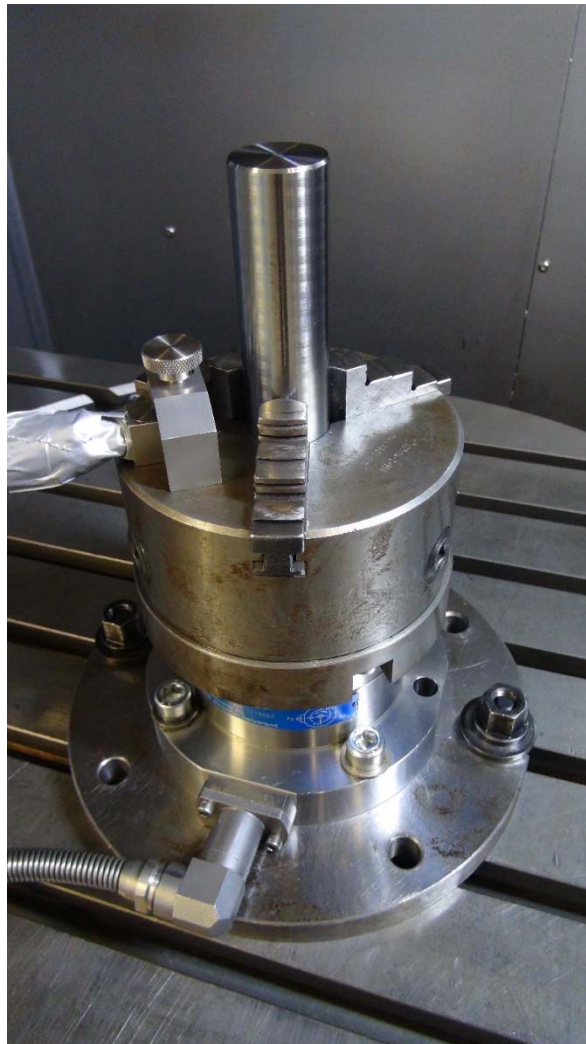
Výstružník byl vysokorychlostní (VRV) z cermetu s šesti břity, bez tenké vrstvy od firmy FINAL TOOLS. Byl upnutý v RC hydraulickém upínači, který právě umožňuje regulaci a nastavování excentricity. Průměr výstružníky byl 12,014 mm.



Obrázek 42. VRV výstružník upnutý RC hydroupínači

5.7 Upínání obrobků

Během experimentu byly měřeny řezné síly při vystružování děr. Z toho důvodu se obrobky upínaly do soustavy dynamometru s tříčelistovým sklíčidlem. Utahování obrobků probíhalo ručně pomocí klíčky.



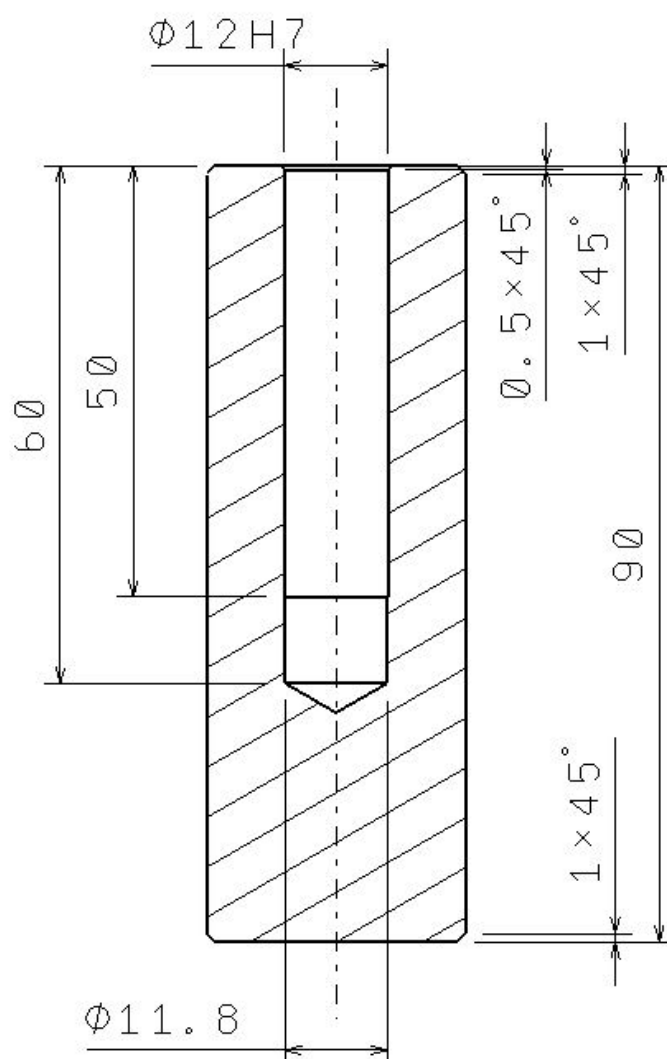
Obrázek 43. Upínací soustava sklíčidla a dynamometru

5.8 Průběh experimentu





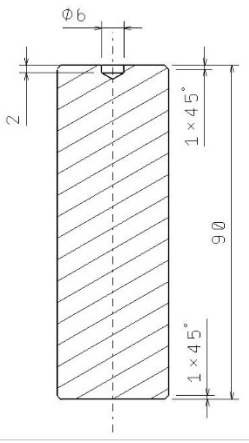
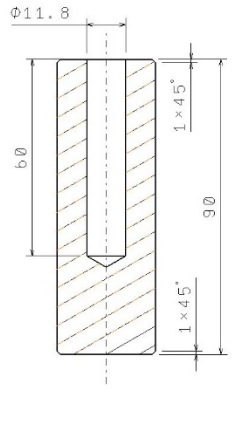
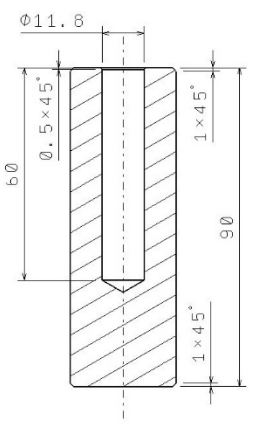
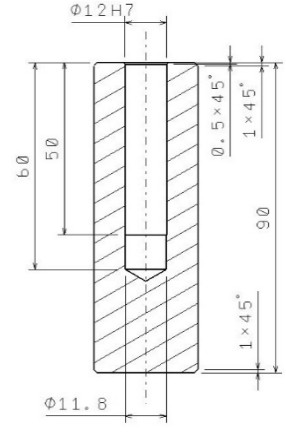
První fází experimentu bylo nutné zaříznutí vrtáků. Výstružník již zaříznutý byl. Ještě před započítím zařezávání byly všechny použité nástroje zaměřeny s použitím laserového zaměřovače přímo ve stroji. Obrobky byly vkládány do soustavy sklíčidla s dynamometrem a ručně upínány. Po každém upnutí nového polotovaru došlo k jeho změření nástrojovou dotykovou sondou. Veškeré operace probíhaly ve svislé poloze. Nástroje byly měněny strojně a ukládány do zásobníku stroje. Pro kontrolu břitů vrtáku a výstružníku byly vždy vyjmuty ze zásobníku nástrojů.

První operací bylo navrtání středícího důlku do osy rotace polotovaru. Následovalo vrtání díry o průměru 11,8 mm v délce 60 mm pracovním posuvem s přerušením po 1D. Po vrtání byl použit srážecí hran pro vytvoření sražení na díře pro vstup výstružníku. Poslední operací bylo vystružování díry na rozměr 12 H7 v délce 50 mm.

Koncentrace použité procesní kapaliny byla 8% a tlak 40 barů. Kapalina byla do místa řezu přiváděna vnitřkem nástrojů.

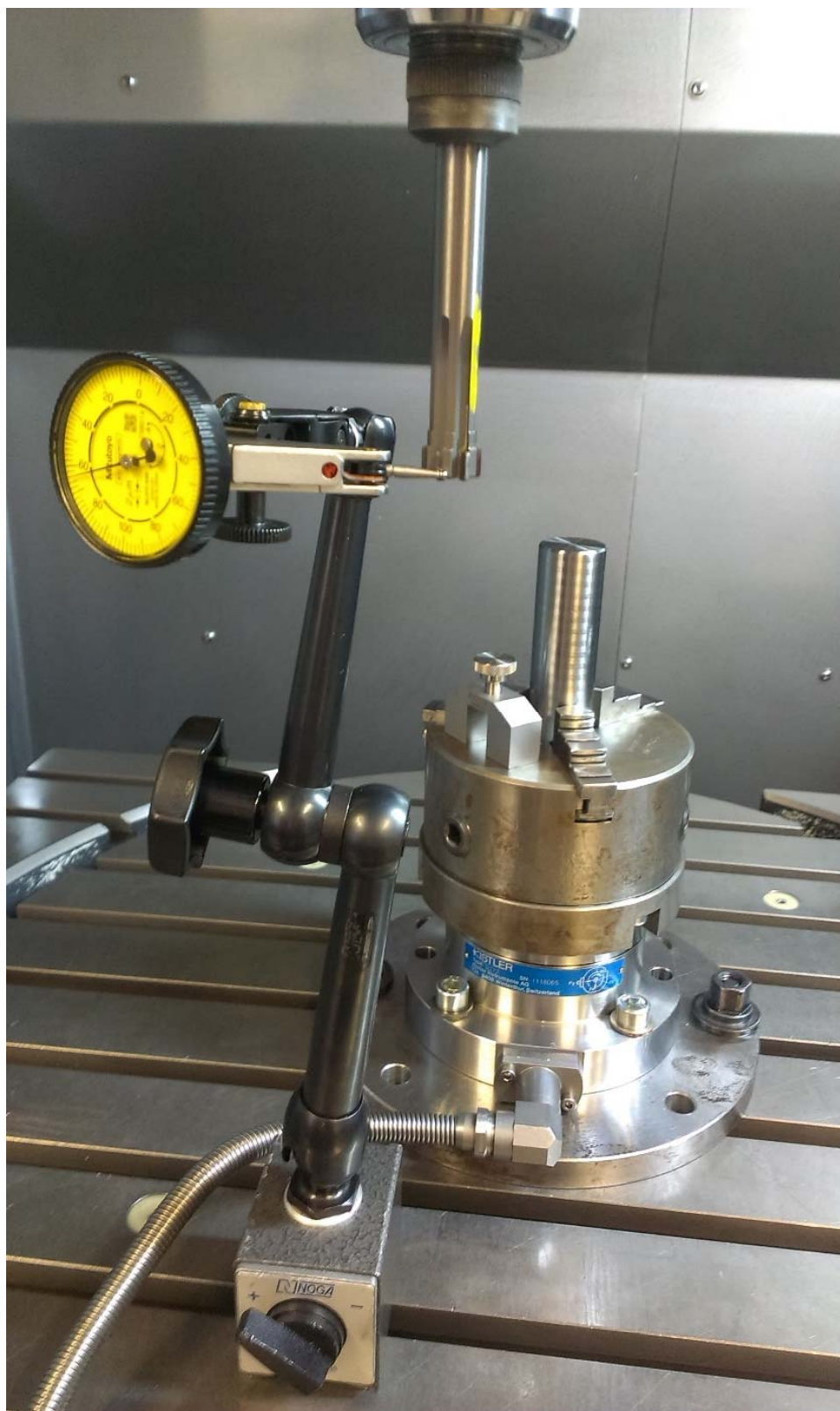


Obrázek 44. Hotový vzorek

Druh stroje: Obráběcí centrum DMU 65 - monoBLOCK		Chlazení: Vnitřní		Materiál obrobku: 42CrMo4 (15 142 dle ČSN)
		Typ díry: Neprůchozí		Pevnost: 1 000 [MPa]
OPERACE:	Navrtání	Vrtání	Sražení hrany	Vystružování
NÁSTROJ:	Středicí vrták	Vrták $\phi 11,8$	Jednobřítý srážeč	VRV $\phi 12H7$
MAT. NÁSTROJE:	SK + povlak	SK + povlak TiAlN	VBD	Cermet
UPNUTÍ NÁSTROJE:	Hydraulický upínač	Hydraulický upínač	Hydraulický upínač	RC Hydraulický upínač
NÁSTROJ:				
ZNÁZORNĚNÍ:				
Počet břitů:	2	2	1	6
v_c [m/min]	-	80	-	150 - 210
n [1/min]	1 725	2 158	-	3 978 - 5 570
f_{ot} [mm/ot]	-	0,19	-	0,60 - 0,84
v_f [mm/min]	100	410	-	2 386 - 4 678
Zpětný posuv [mm/min]	-	-	-	15 000 - 45 000

Tabulka 19. Technologický postup zhotovení vzorku

Excentricita výstružníku byla nastavována a v průběhu celého experimentu pravidelně kontrolována pomocí páčkového číselníkového úchylkoměru, který byl upnut v magnetickém stojánku umístěném na pracovním stole frézky.



Obrázek 45. Nastavování excentricity páčkovým číselníkovým úchylkoměrem

5.9 Měření

Měření zhotovených vzorků znovu proběhlo v metrologické laboratoři na univerzitě. Byl zachován stejný postup a stroje jako u předchozího experimentu.

Řezné síly během vystružování byly měřeny za pomoci čtyř složkového dynamometru od firmy KISTLER. Dynamometr měří 3 složky řezné síly (F_x , F_y , F_z) a točivý moment M_z .



Obrázek 46. Dynamometr KISTLER 9272 [20]

Pro zaznamenávání průběhů řezných sil byla využita měřící aparatura sestávající se ze zesilovače signálu, přívodního kabelu s pancéřovou ochranou a notebookem s programem pro záznam.

5.10 Vyhodnocení

Před každým důkladně plánovaným experimentem je potřeba provést klasifikaci faktorů, které do něj vstupují a ovlivňují jeho průběh či výsledky. Zaměřeno bylo zde na parametry kontrolované, které se během experimentu variovaly, některé faktory byly prohlášeny za dočasné konstanty a v průběhu experimentu se mohly objevit faktory náhodné. Z toho všeho po experimentu vychází parametry, které jsou následně podrobeny vyhodnocení.

Experiment lze nazvat jakousi „černou skříňkou“ ve které dochází ke kombinaci všech faktorů. Ať už těch, které byly zvoleny, ale může se objevit i vliv faktorů náhodných i vliv faktorů, které jsou pokládány za konstantní. Toto nelze ovlivnit, neboť žádný proces není prozkoumán tak podrobně, aby ho neovlivnili nečekané proměnné faktory.

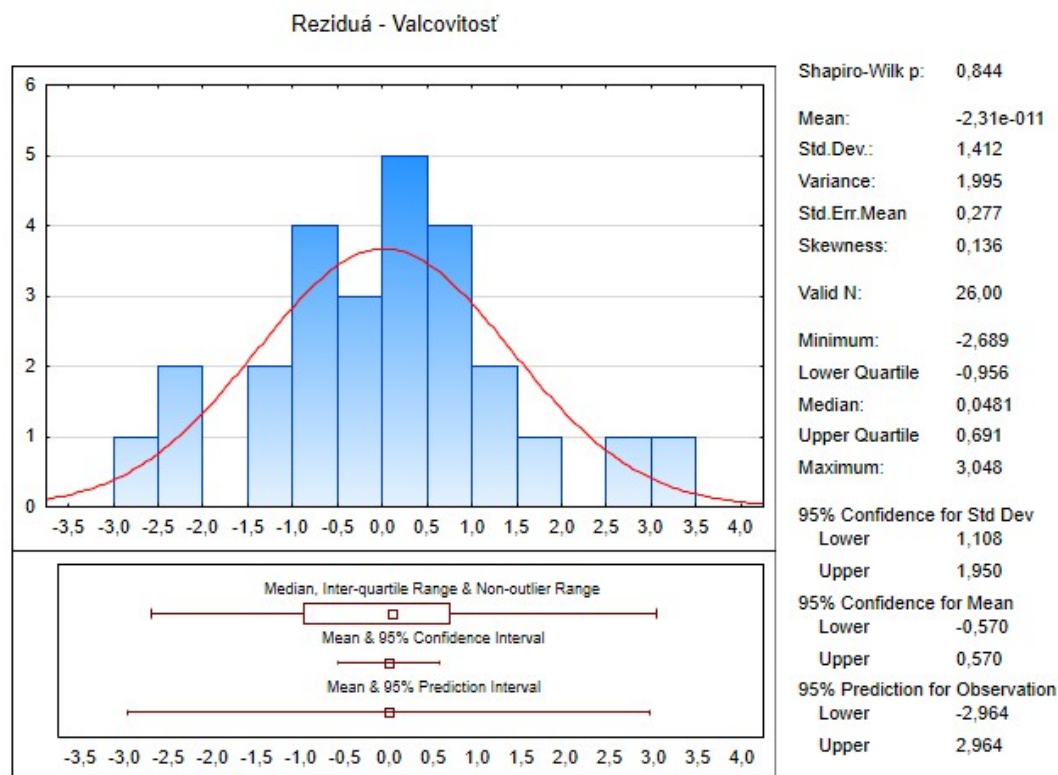


Obrázek 47. Obecné schéma experimentu

Ortogonalní centrální kompozitní plán, podle kterého byl experiment absolvován, umožňuje z naměřených dat po statistickém vyhodnocení odhalit vzájemné závislosti zvolených faktorů a také odhalit nelineární vztahy mezi nimi. Tento plán je platný pouze ve zvoleném rozsahu kontrolovaných faktorů.

Aby mohla být naměřená data podrobena statistickému vyhodnocení, je třeba nejdříve z nich vyloučit hrubé chyby, které by mohly významně ovlivnit výsledky. Naměřená data by také měla odpovídat Gaussovu normálnímu rozdělení. Dále lze určit vhodnost použitého modelu. To se zjišťuje pomocí upraveného indexu determinace, který představuje podmiňující míru vysvětlení variability naměřených dat. Analýzou rozptylu (ANOVA) je zjišťováno, zda variabilita způsobená náhodnými chybami je menší, než variabilita naměřených hodnot vysvětlených modelem experimentu a hodnota dosažené hladiny významnosti poukazuje na adekvátnost použití tohoto modelu. V tomto případě se pracuje s hodnotou významnosti 5%.

5.11 Válcovitost



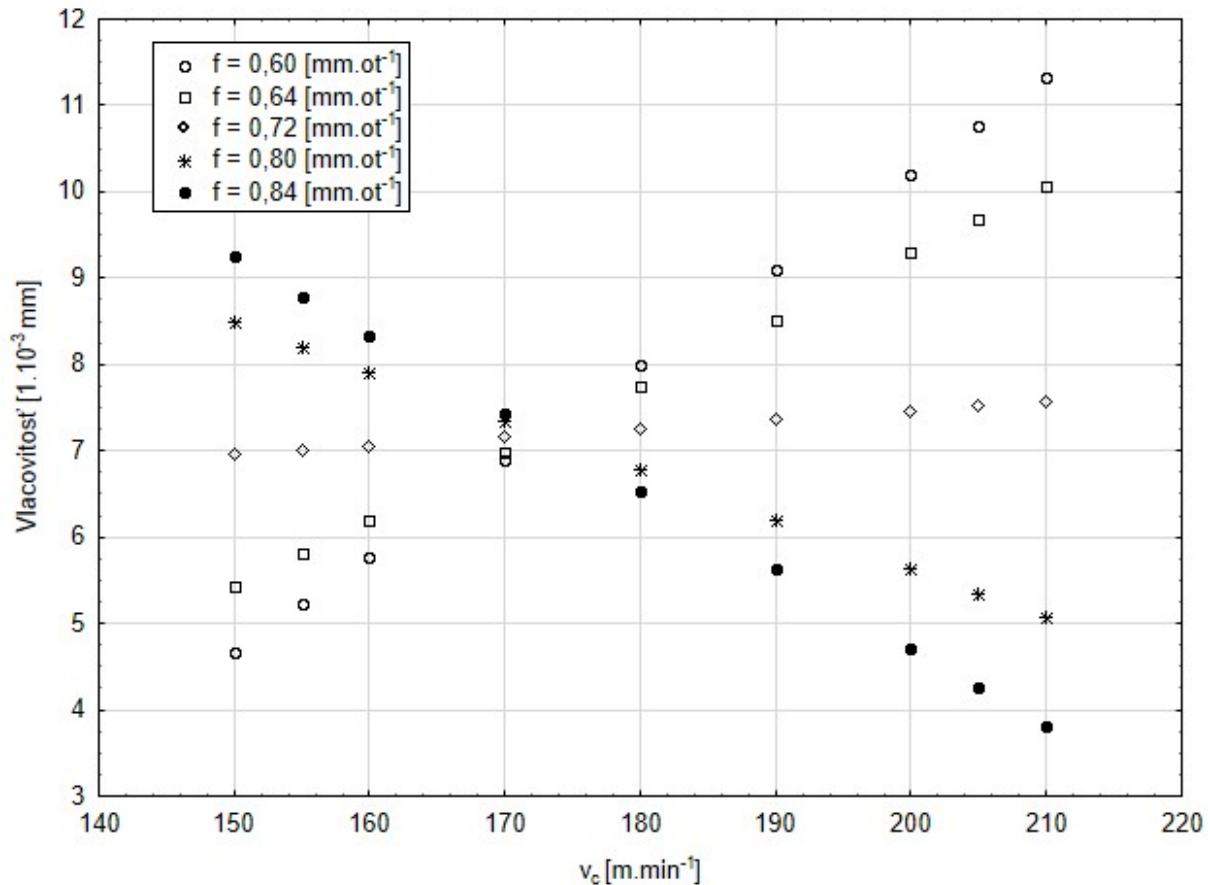
Obrázek 48. Rozložení hodnot válcovitosti dle Gaussova normálního rozložení

Z **Obrázku 48.** vyplývá, že naměřené hodnoty válcovitosti vystružených děr odpovídají Gaussovu normálnímu rozložení. Upravený index determinace dosahuje hodnoty 55%! To znamená, že model nedokáže vysvětlit 45% variability naměřených hodnot válcovitosti po vystružení. Válcovitost vystružených děr v tomto případě ovlivňují i další náhodné faktory i ty faktory, které byly považovány za konstantní, které ovšem nebyly modelem experimentu kontrolovány.

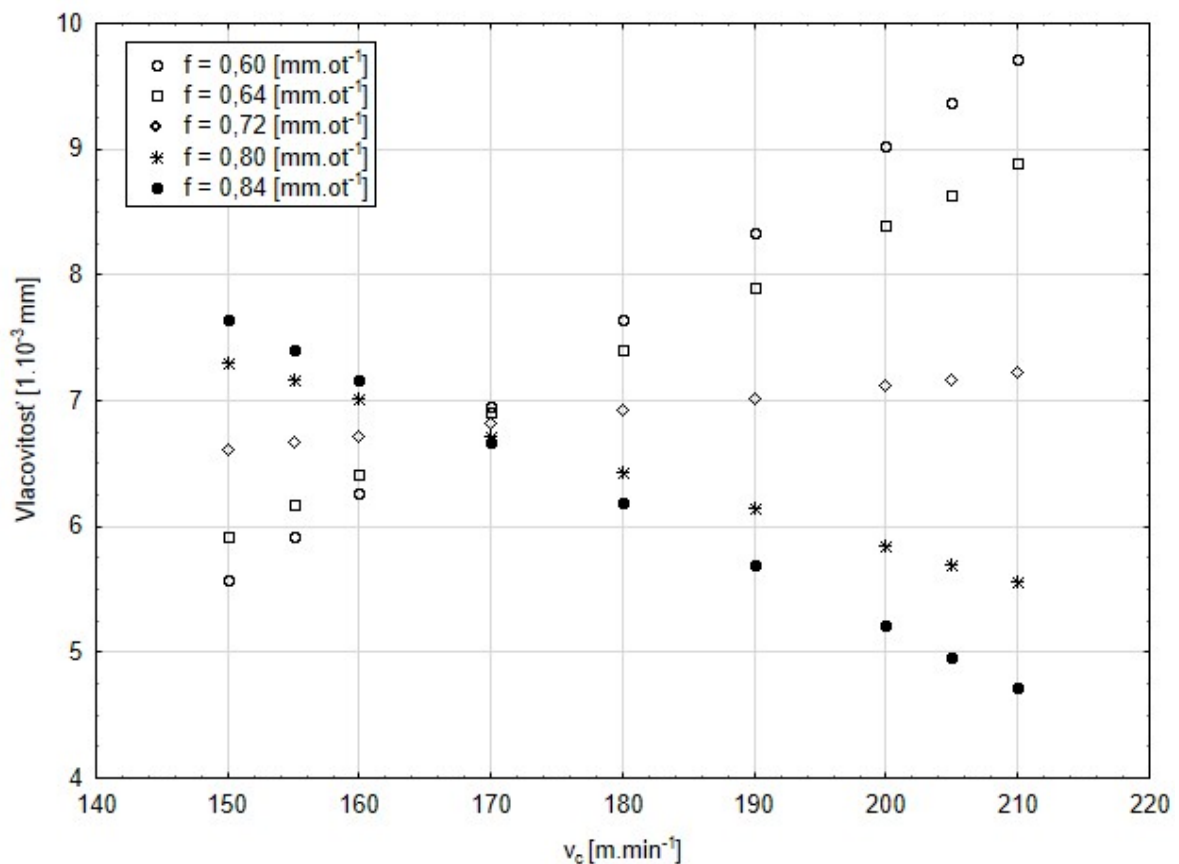
Na zvolené hladině významnosti (5%) nejvíce ovlivňuje válcovitost tzv. absolutní člen, tedy vše, co bylo v experimentu zanedbáno, ale i další náhodné faktory a chyby. Poté válcovitost ovlivňuje posuv, dále interakce mezi posuvem a řeznou rychlostí a nakonec interakce posuvu, řezné rychlosti a zpětného posuvu. Excentricita výstružníku jako taková samostatně válcovitost neovlivňuje a nevstupuje ani do interakcí s ostatními faktory. Zajímavou skutečností je, že se zvyšováním hodnoty posuvu klesá válcovitost vystružené díry. Stejně se tomu děje i při zvyšování posuvu a řezné rychlosti. Absolutní člen, z hlediska procentuálního vyjádření, ovlivňuje válcovitost vystružených děr až na 66%! Tedy 66% celkové variability naměřených hodnot válcovitosti vystružených děr ovlivňují jiné faktory, než které byly použity v experimentu. Interakce posuvu a řezné rychlosti ovlivňuje válcovitost na 13%, posuv, řezná rychlost a zpětný posuv pak na 9%. Samotná řezná rychlost válcovitost ovlivňuje ze 3%, posuv z 6% a zpětný posuv ze 3%.

5.11.1 Vliv řezné rychlosti

Jak bylo poznamenáno výše, řezná rychlost jako samostatný faktor významně statisticky válcovitost vystružených děr neovlivňuje. Ale významně ji ovlivňuje v interakcích s posuvem a s posuvem a zpětným posuvem.



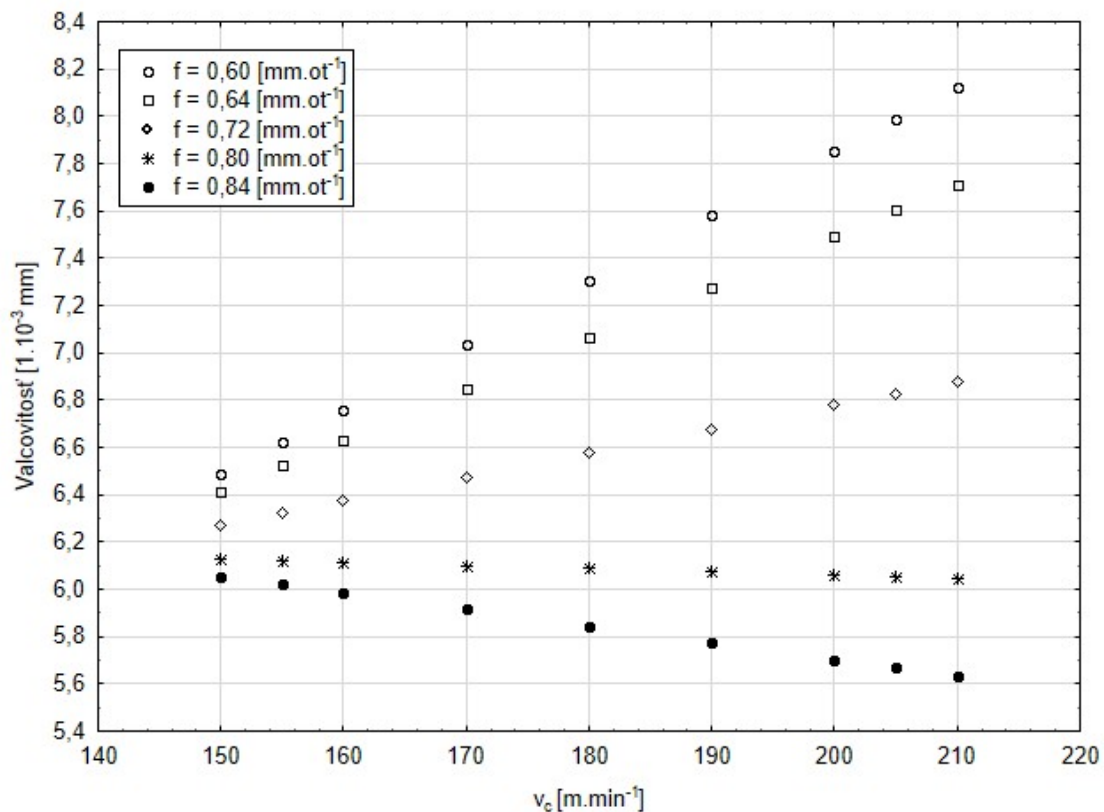
Obrázek 49. Závislost změny válcovitosti na změně řezné rychlosti při zpětném posuvu $v_{f-zpět} = 15$ [m/min]



Obrázek 50. Závislost změny válcovitosti na změně řezné rychlosti při zpětném posuvu $v_{f\text{zpět}} = 30$ [m/min]

Z uvedených obrázků (**Obrázek 49. a 50.**), které zobrazují změnu válcovitosti při změně řezné rychlosti při zpětných posuvech 15 a 30 m/min vyplývá, že pro pracovní posuvy na otáčku 0,60 a 0,64 mm dochází se zvyšující se řeznou rychlostí k růstu hodnot válcovitosti díry. Stejný efekt vyjadřuje i posuv na otáčku s hodnotou 0,72, ale v tomto případě nedochází k rapidnímu růstu válcovitosti. Naopak se válcovitost snižuje se zvyšující se řeznou rychlostí pro pracovní posuvy 0,80 a 0,84 mm/ot.

Nejmarkantnější pokles hodnot válcovitosti je patrný při pracovním posuvu 0,84 mm/ot současně se zvyšující se řeznou rychlostí od 150 po 210 m/min jak při zpětném posuvu 15, tak i 30 m/min. V prvním případě, při zpětném posuvu 15 m/min se zlepšuje válcovitost až o 5 μm . U zpětného posuvu se válcovitost zlepšila o přibližně 3 μm .

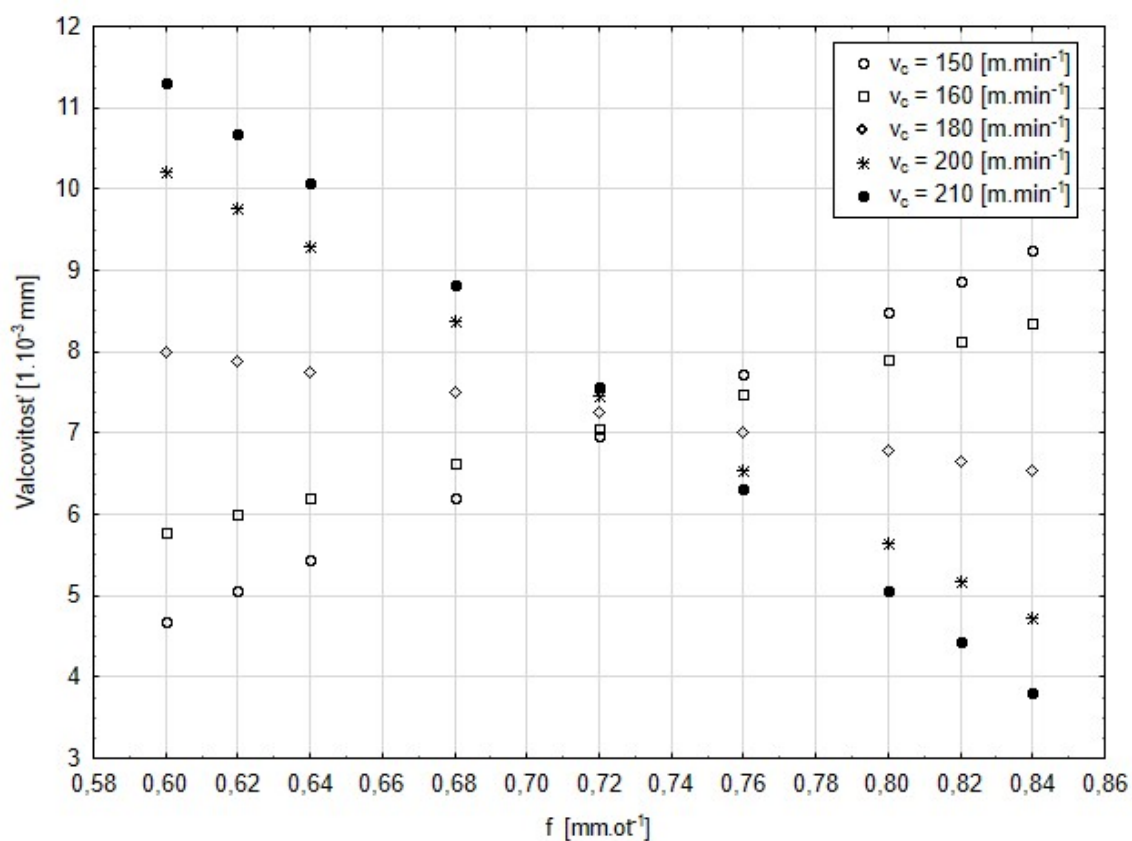


Obrázek 51. Závislost změny válcovitosti na změně řezné rychlosti při zpětném posuvu $v_{f-zpět} = 45$ [m/min]

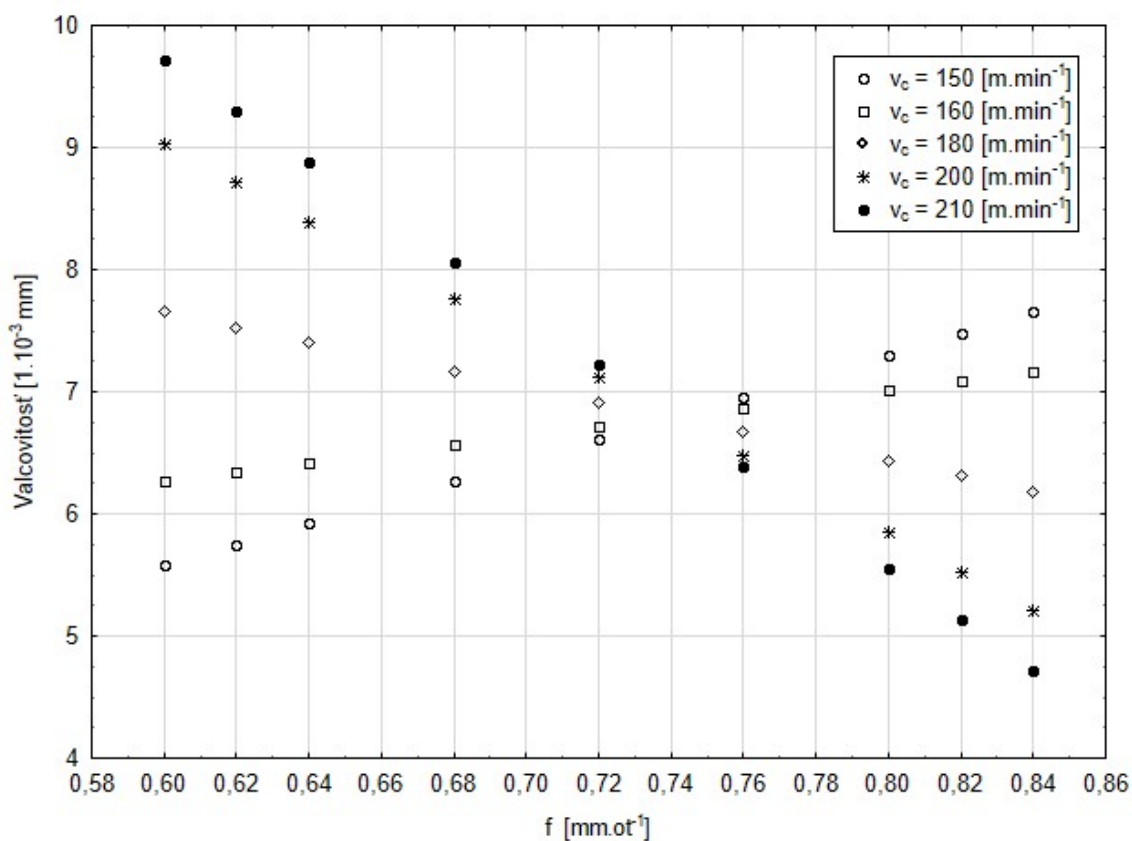
Na tomto obrázku (**Obrázek 51.**) je vidět podobný trend jako u předcházejících. Znovu dochází pro nejnižší tři hodnoty pracovních posuvů, zároveň s rostoucí řeznou rychlostí ke zvýšení hodnot válcovitosti díry. Zlepšení válcovitosti nastává pro posuvy 0,80 a 0,84 mm/ot. Je ovšem patrné, že pro zpětný posuv 45 m/min je nejmenší rozptyl hodnot nejvyšší a nejnižší válcovitosti díry. Tento rozptyl se snižuje s narůstajícím zpětným posuvem od 15 po 45 m/min.

5.11.2 Vliv posuvu

Posuv ovlivňuje válcovitost jako samostatný faktor. Míra ovlivnění válcovitosti díry pouze samotným posuvem je 6%. Výrazný vliv má také v interakcích s řeznou rychlostí a také s řeznou rychlostí a zpětným posuvem.



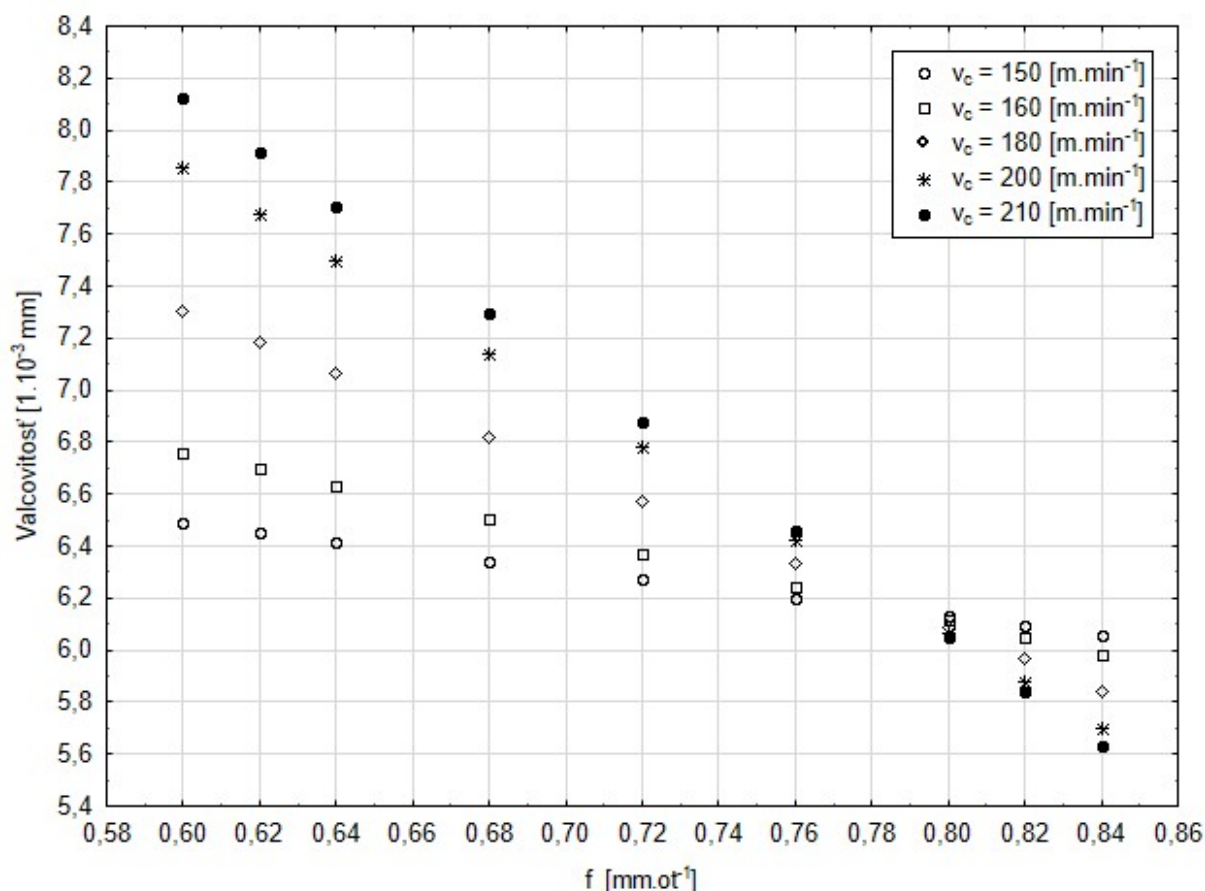
Obrázek 52. Závislost změny válcovitosti na změně posuvu při zpětném posuvu $v_{fzpět} = 15$ [m/min]



Obrázek 53. Závislost změny válcovitosti na změně posuvu při zpětném posuvu $v_{fzpět} = 30$ [m/min]

Závislosti změn válcovitosti na změně posuvu se zároveň zvyšující se řeznou rychlostí mají pro zpětné posuvy 15 a 30 m/min stejný trend (**Obrázek 52. a 53.**). Pro hodnotu řezné rychlosti 150 m/min se zvyšujícím se pracovním posuvem a zpětným posuvem výstružníku 15 m/min roste válcovitost více, než pro řeznou rychlost 160 m/min. S dosahem hodnoty řezné rychlosti 180 m/min se situace obrací a válcovitost se při zvyšování posuvu z 0,60 na 0,84 mm/ot zlepšuje. Toto zlepšení válcovitosti je více znatelné při řezné rychlosti 200, popřípadě nejvíce při 210 m/min. Právě pro nejvyšší řeznou rychlost 210 m/min, zvyšující se pracovní posuv a zpětný posuv válcovitost klesá až o 7 μm .

U závislosti se zpětným posuvem 30 m/min (**Obrázek 53.**) je největší zlepšení hodnoty válcovitosti za současně zvyšujícího se posuvu opět při řezné rychlosti 210 m/min. Zde se válcovitost zlepšila přibližně o 5 μm .

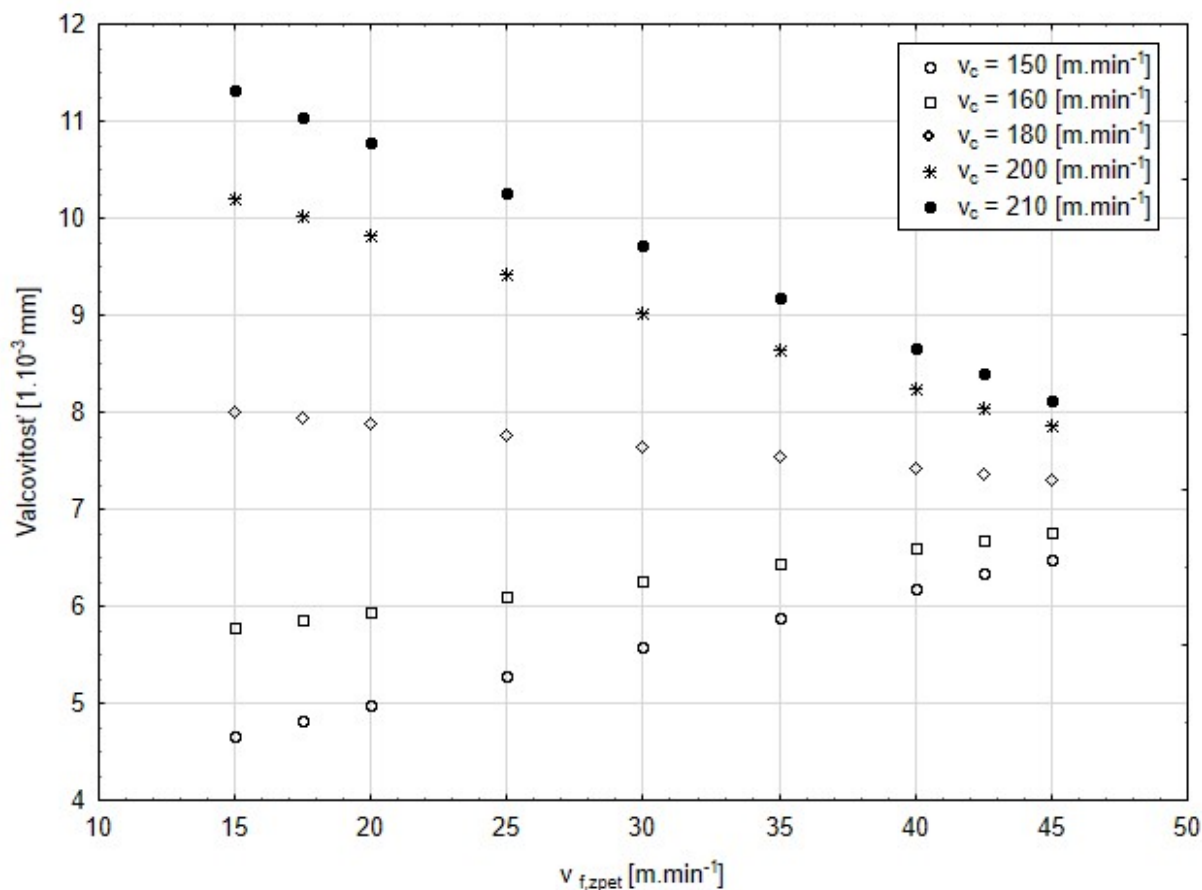


Obrázek 54. Závislost změny válcovitosti na změně posuvu při zpětném posuvu $v_{f-zp\acute{e}t} = 45$ [m/min]

Změna nastává u závislosti válcovitosti na změně posuvu při zpětném posuvu 45 m/min (**Obrázek 54.**). Zde zvyšování pracovního posuvu výstružníku způsobuje pokles hodnoty válcovitosti díry v celém intervalu řezných rychlostí od 150 po 210 m/min. Jak se řezná rychlost zvyšuje, je pokles válcovitosti výraznější. Hodnota válcovitosti vystružené díry klesá při řezné rychlosti 150 m/min se zvyšujícím se posuvem o 6,67%, při 160 m/min pak o 11,48%. Tento pokles pokračuje u řezné rychlosti 180 m/min o 20,02% a u 200 m/min o 27,38%. Nakonec u řezné rychlosti 210 m/min se zvyšujícím se posuvem je pokles hodnoty válcovitosti až o 30,69%.

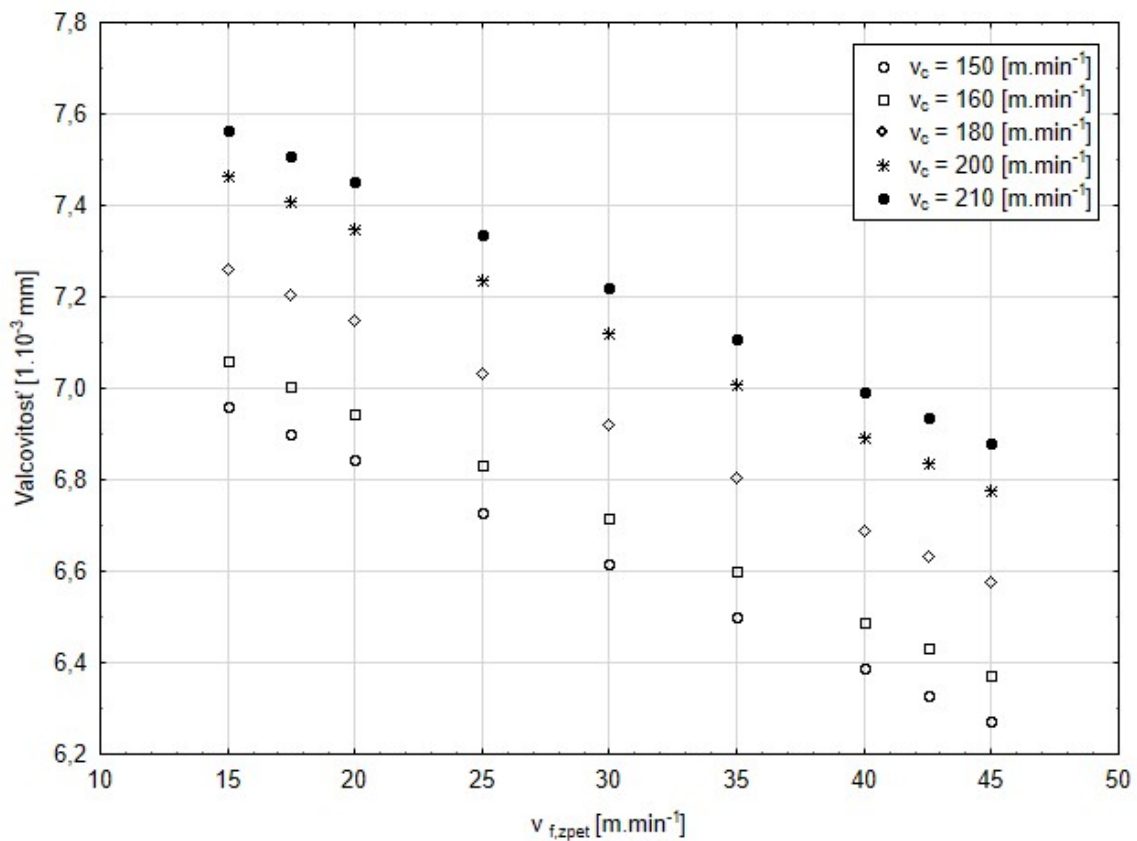
5.11.3 Vliv zpětného posuvu

Zpětný posuv samostatně statisticky na hodnotu válcovitosti vystružené díry významně nepůsobí. Jeho vliv je však v interakci s řeznou rychlostí a posuvem. **Obrázek 55. – 57.** zobrazuje grafický průběh změny válcovitosti na změně zpětného posuvu při současné řezné rychlosti. Průběh změny válcovitosti na změně zpětného posuvu při současném pracovním posuvu je vyobrazen na **Obrázku 58. – 60.**

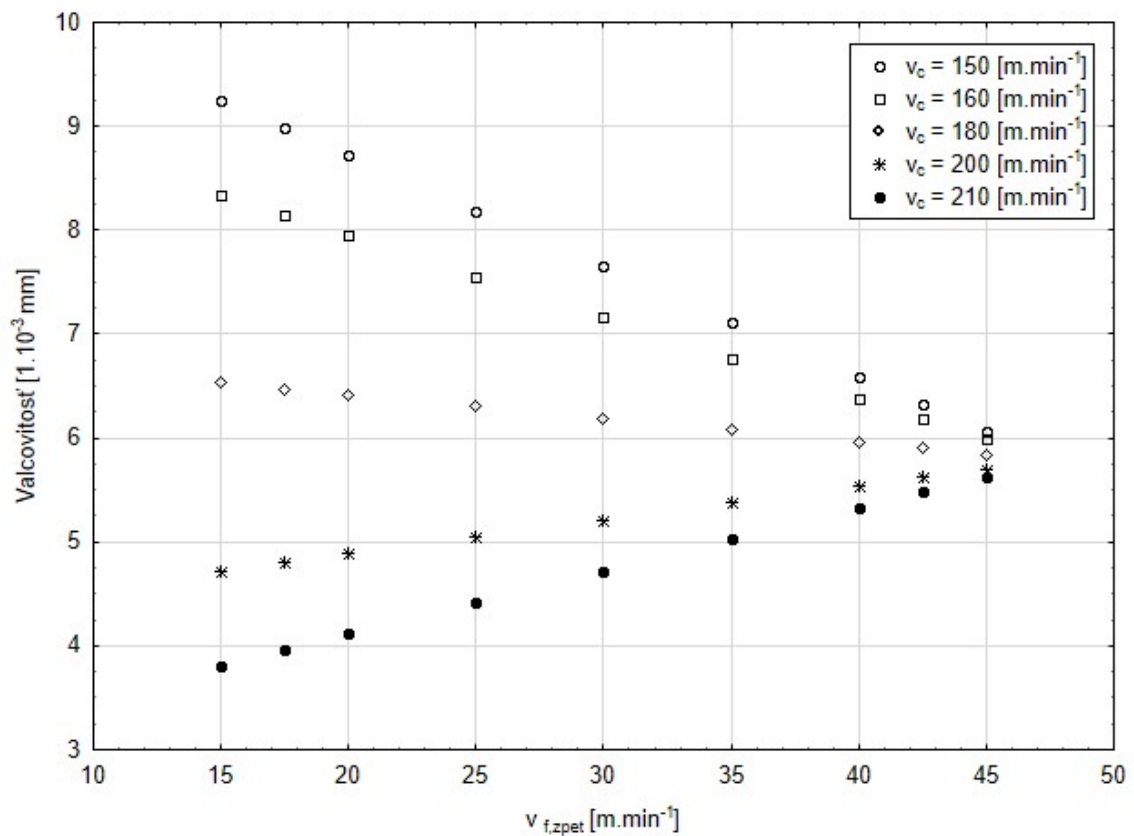


Obrázek 55. Závislost změny válcovitosti na změně zpětného posuvu při posuvu $f = 0,60$ [mm/ot]

Při sledování závislosti změny válcovitosti na změně zpětného posuvu při pracovních posuvech 0,60 mm/ot, 0,72 mm/ot a 0,84 mm/ot, lze konstatovat tyto závěry. Na **Obrázku 55.** je patrné, že při řezné rychlosti 150 m/min a i následném zvýšení na hodnotu 160 m/min dochází se zvyšující se hodnotou zpětného posuvu k nárůstu válcovitosti díry. Dalším zvyšováním na řeznou rychlost 180 m/min se trend mění a válcovitost se za zvyšování zpětného posuvu zlepšuje. Zvýšením řezné rychlosti až na 210 m/min dojde ke snížení válcovitosti díry přibližně o 4 μm .



Obrázek 56. Závislost změny válcovitosti na změně zpětného posuvu při posuvu $f = 0,72$ [mm/ot]

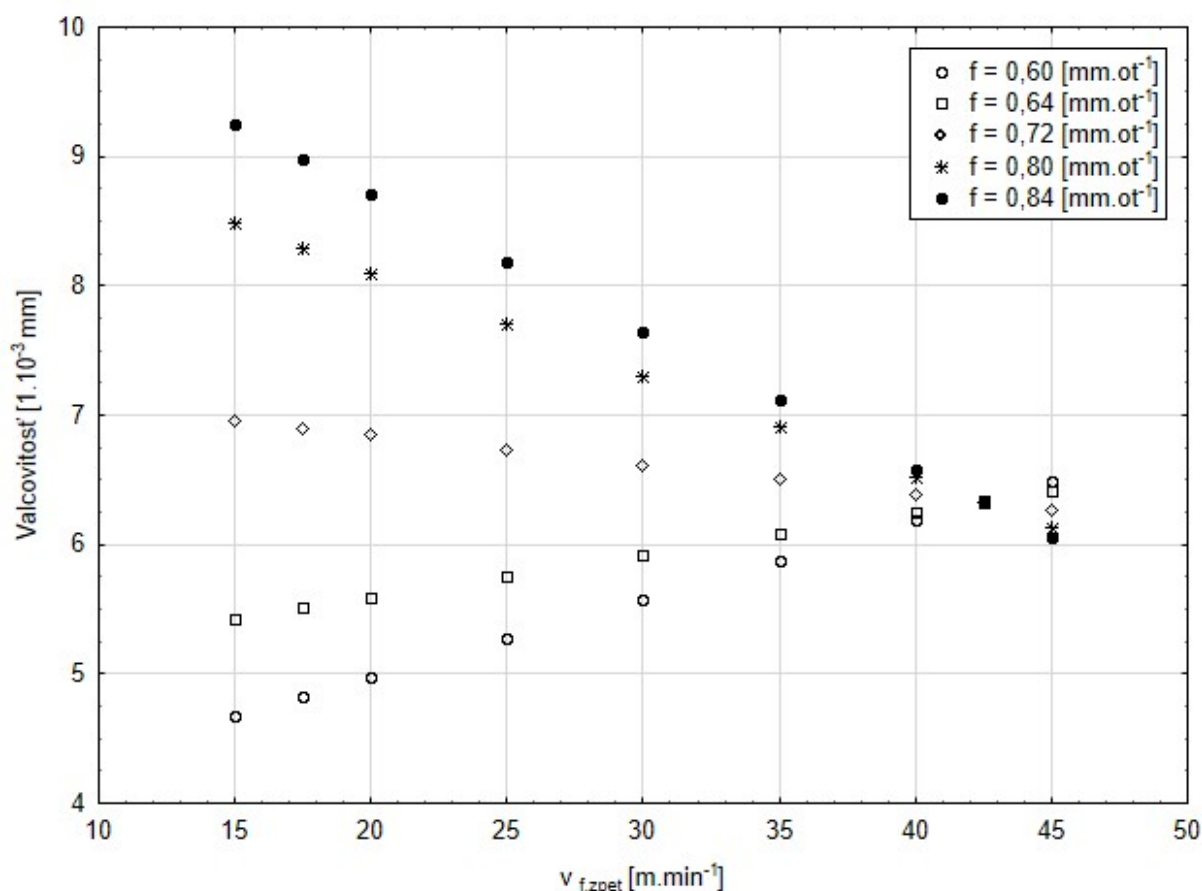


Obrázek 57. Závislost změny válcovitosti na změně zpětného posuvu při posuvu $f = 0,84$ [mm/ot]

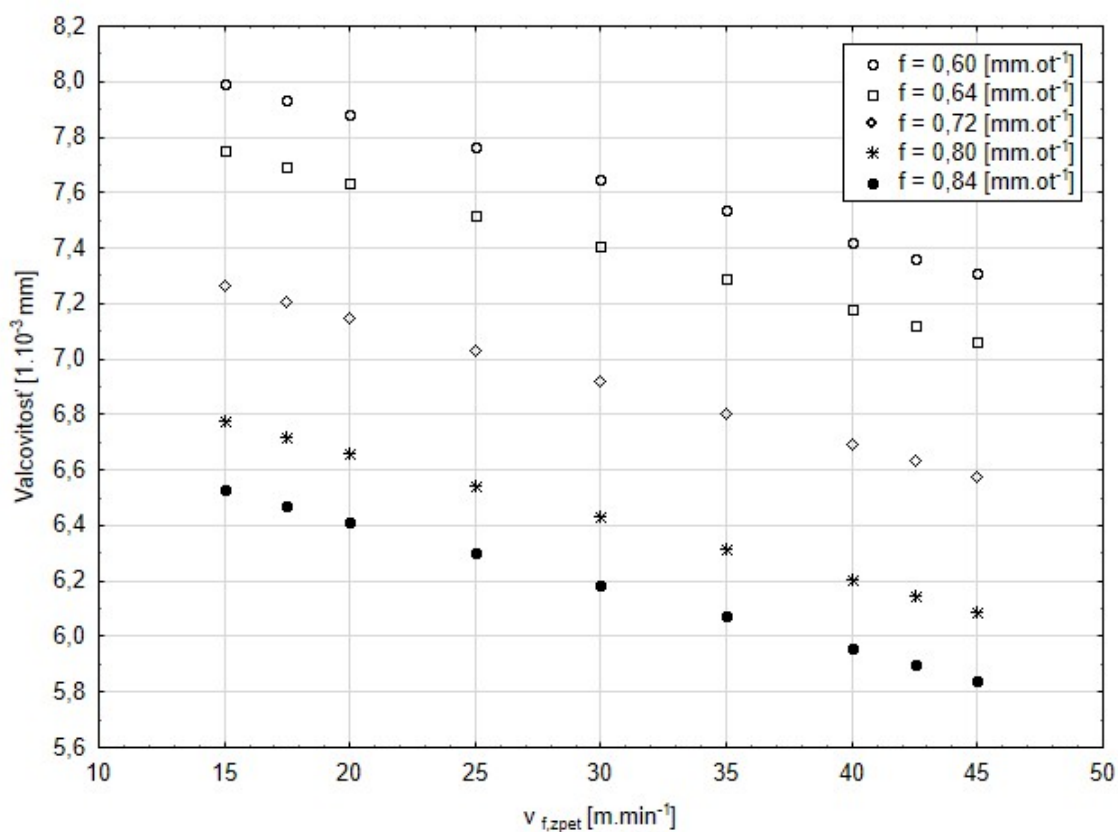
Zvýšením pracovního posuvu výstružníku na hodnotu 0,72 mm/ot a zároveň se zvyšujícím se zpětným posuvem se válcovitost díry snižuje a to v celém rozsahu nastavení hodnot řezných rychlostí, tedy od 150 po 210 m/min (viz **Obrázek 56.**). Je zajímavé, že při tomto nastavení pracovního posuvu se nejnižší válcovitosti dosáhne s řeznou rychlostí 150 m/min a zpětným posuvem 45 m/min.

Zcela jiný průběh má závislost změny válcovitosti na změně zpětného posuvu při pracovním posuvu 0,84 mm/ot (viz **Obrázek 57.**). Zde dochází se zvyšujícím se zpětným posuvem k zhoršení válcovitosti pro nejvyšší řezné rychlosti 200 a 210 m/min. Naopak pro řezné rychlosti z dolní části intervalu 150 až 180 m/min se válcovitost se zvyšujícím se zpětným posuvem zlepšuje. Ale nejlepší hodnota válcovitosti vystružené díry u pracovního posuvu 0,84 mm/ot byla dosažena s řeznou rychlostí 210 m/min a zpětným posuvem 15 m/min.

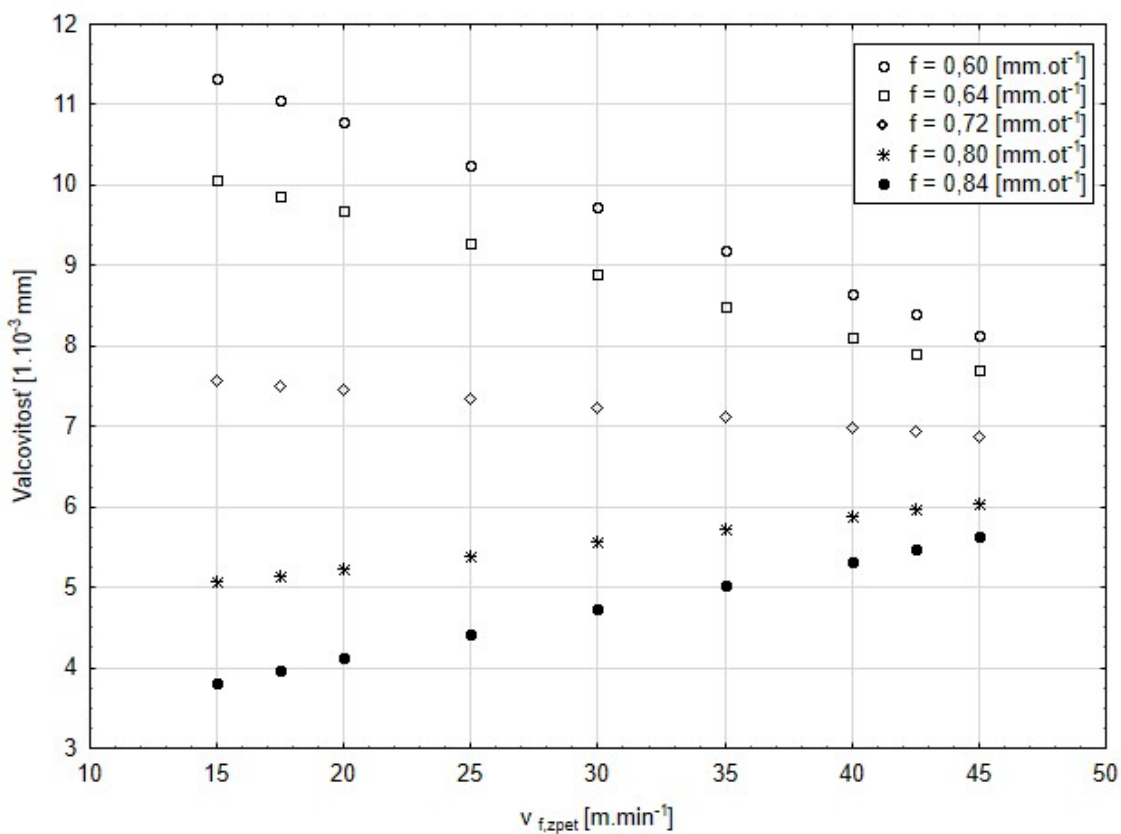
Závislost změny válcovitosti na změně zpětného posuvu tentokrát při řezné rychlosti 150 m/min (**Obrázek 58.**) vykazuje, že pro hodnoty pracovních posuvů z kraje zvoleného intervalu 0,60 a 0,64 mm/ot se válcovitost zároveň s rostoucí hodnotou zpětného posuvu zvyšuje. Při překročení hodnoty pracovního posuvu 0,72 mm/ot až na horní hranici intervalu 0,84 mm/ot, dojde zvyšováním zpětného posuvu ke snižování hodnoty válcovitosti.



Obrázek 58. Závislost změny válcovitosti na změně zpětného posuvu při posuvu $v_c = 150$ [m/min]



Obrázek 59. Závislost změny válcovitosti na změně zpětného posuvu při posuvu $v_c = 180$ [m/min]



Obrázek 60. Závislost změny válcovitosti na změně zpětného posuvu při posuvu $v_c = 210$ [m/min]

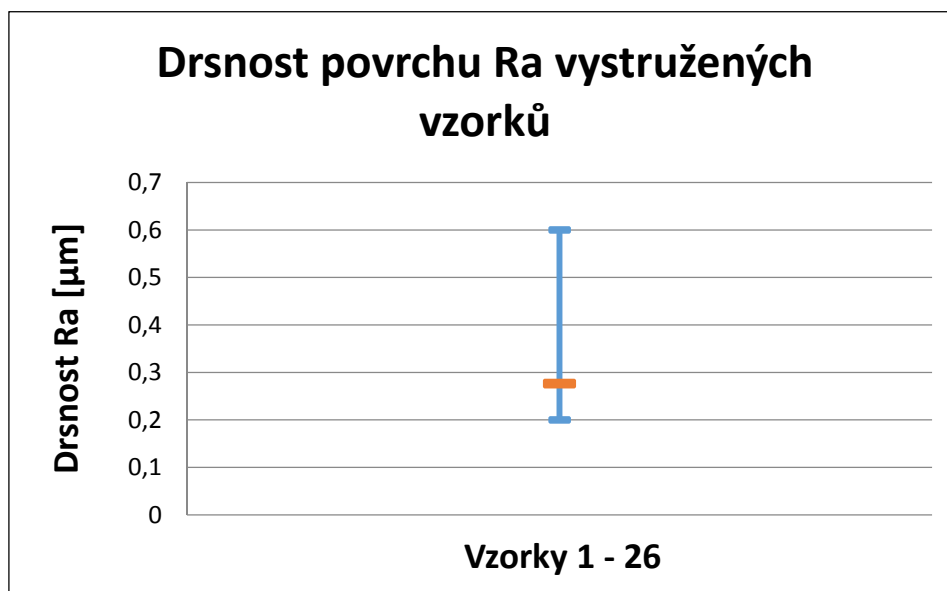
Zvyšování zpětného posuvu u řezné rychlosti 180 m/min (**Obrázek 59.**) způsobí snižování hodnoty válcovitosti vystružené díry a to v celém rozsahu intervalu pracovních posuvů. Přičemž nejnižší hodnota válcovitosti je dosažena za pracovního posuvu 0,84 mm/ot a zpětného posuvu 45 m/min.

Pokud se zvýší řezná rychlost na 210 m/min, klesá hodnota válcovitosti s posuvy 0,60 mm/ot, 0,64 mm/ot a 0,72 mm/ot za zvyšujícího se posuvu zpětného dle průběhu na **Obrázku 60.** Při pracovním posuvu 0,72 mm/ot je tento pokles válcovitosti přibližně o 0,6 μm . Naproti tomu se válcovitost díry zvyšuje s narůstajícím zpětným posuvem při posuvech 0,80 mm/ot a 0,84 mm/ot. Nejlepší válcovitost 3,8 μm byla v tomto případě dosažena za zpětného posuvu 15 m/min, řezné rychlosti 210 m/min a pracovním posuvu 0,84 mm/ot.

5.12 Střední aritmetická hodnota drsnosti – drsnost povrchu Ra

Upravený index determinace v případě drsnosti Ra dosáhl hodnoty pouze 2,2%! To znamená, že zvolený model experimentu nedokáže vysvětlit 97,8% variability hodnot drsnosti díry po vystružení. Z tohoto hlediska by nebylo možné tento model použít. Ovšem je potřeba zdůraznit, že naměřené hodnoty drsnosti Ra u všech 26 vzorků dosáhli velmi malých odchylek a tím pádem povrch těchto vystružených děr lze považovat za homogenní. Drsnost povrchu Ra byla v rozmezí 0,2 – 0,6 μm .

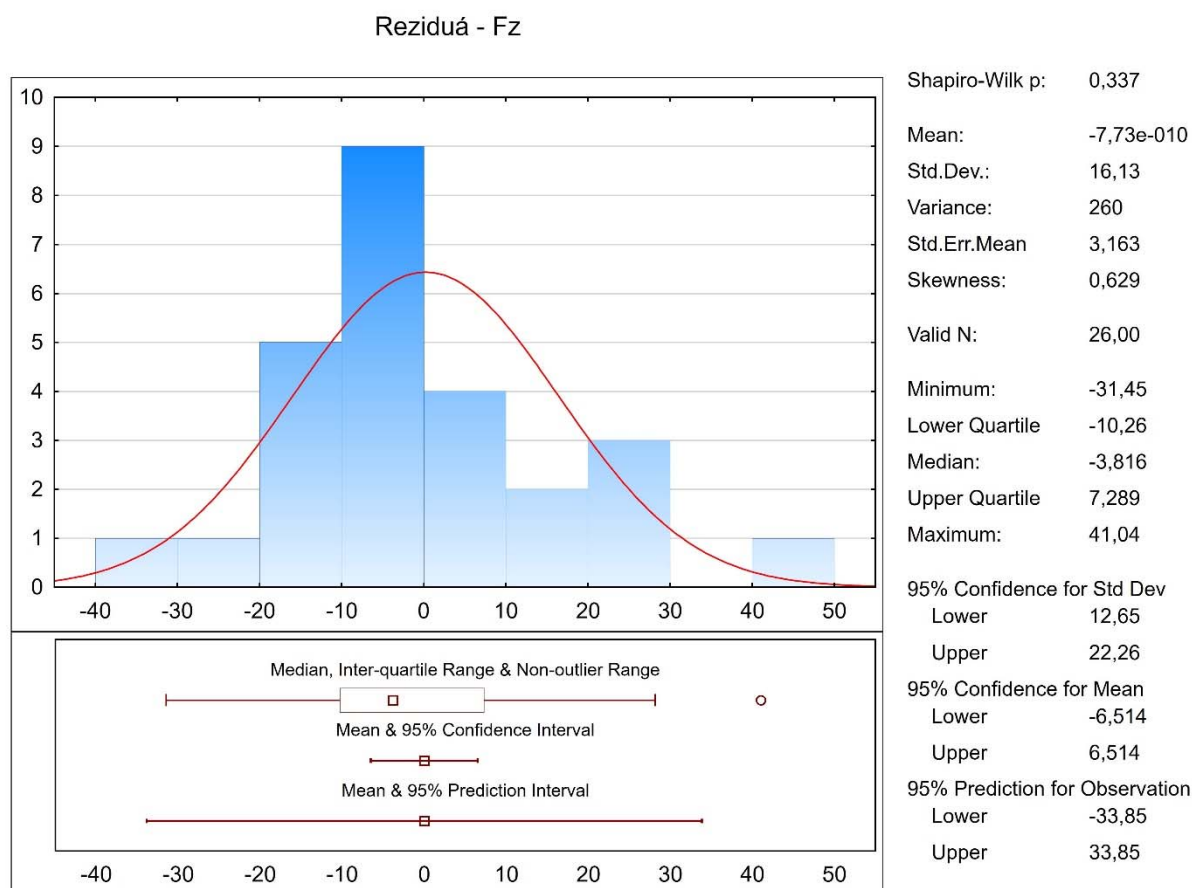
Vysvětlení tohoto tvrzení spočívá v použitém vystružovacím nástroji. Výstružník s břitovými destičkami z cermetu při zvolených řezných podmínkách dokázal vždy vyrobít kvalitní povrch díry. Právě při vysokých řezných rychlostech a posuvech a za použití procesní kapaliny pracuje cermetový výstružník nejspolehlivěji.



Graf 2. Drsnost povrchu Ra vystružených vzorků s polohou střední hodnoty drsnosti

5.13 Složka řezné síly F_z

Tato složka řezné síly je nazývána tako posuvová složka a značí se F_f neboť působí ve směru posuvu. Naměřené hodnoty složky řezné síly F_z odpovídají Gaussovu normálnímu rozložení (viz **Obrázek 61.**) Upravený index determinace dosahuje hodnoty 59%. Což znamená, že model experimentu nedokáže vysvětlit 41% variability naměřených hodnot vystružených děr.



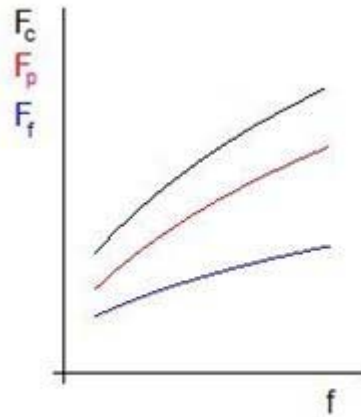
Obrázek 61. Gaussovo normální rozložení naměřených hodnot F_z

Sílu F_z nejvíce statisticky významně ovlivňuje absolutní člen, tedy všechny různé konstantní a náhodné faktory, použité intervaly a další různé vlivy a chyby. Dále je to excentricita a její druhá mocnina, interakce excentricity a posuvu a interakce posuvu a zpětného posuvu. Řezná rychlost jako samostatný faktor neovlivňuje posuvovou složku řezné síly a nevstupuje statisticky významně ani do interakcí s ostatními faktory.

Podle procentuálního vyjádření je vliv absolutního členu na složku řezné síly F_z až 60,67%. Excentricita má podíl 14,51% a druhá mocnina excentricity 8,92%. Interakce excentricity a posuvu s podílem 7,90%, interakce posuvu a zpětného posuvu 7,99%. Z toho vyplývá, že 60,67% celkové variability hodnot posuvové složky řezné síly při vystružování ovlivňují jiné faktory než ty, které byly v experimentu použity.

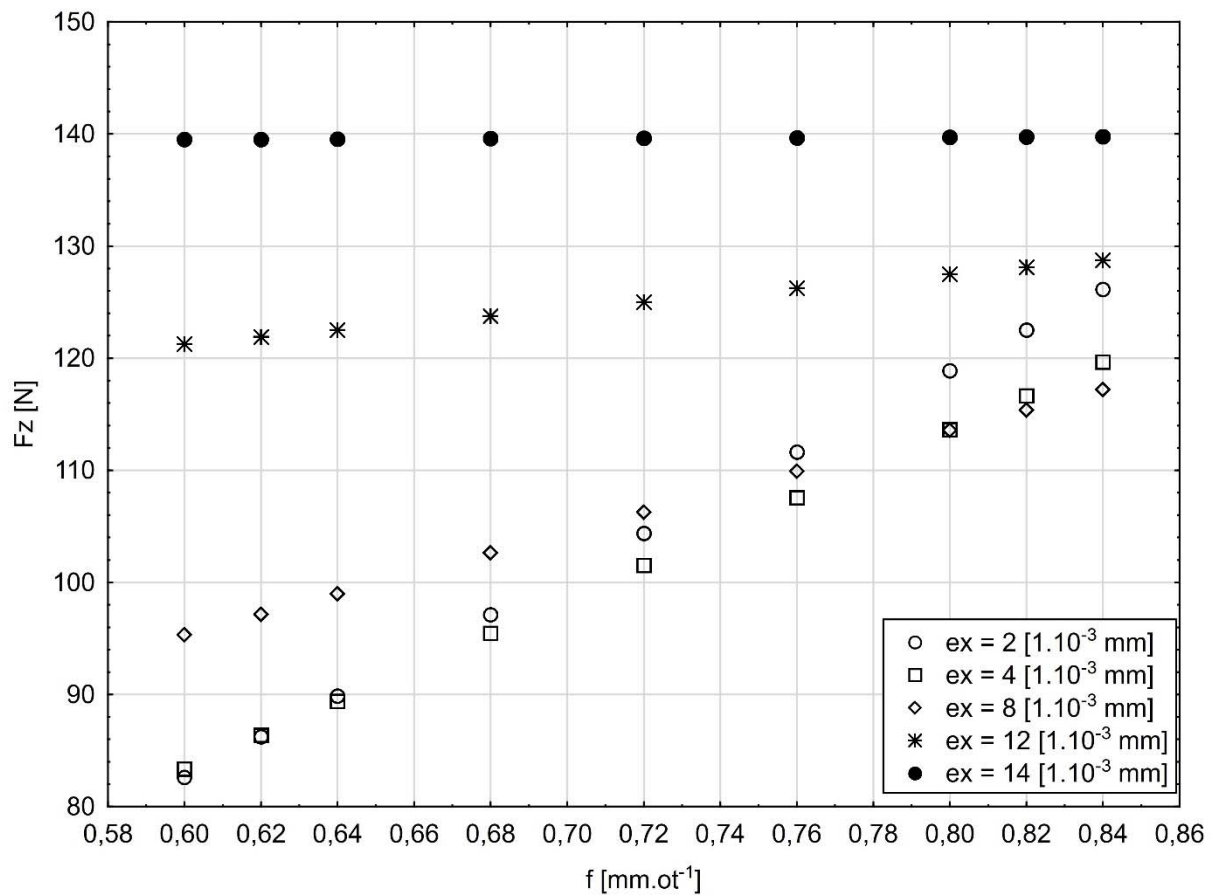
Na tomto místě je potřeba poukázat na vyhodnocené výsledky a jejich závadějící vypovídající hodnotu. Složka řezné síly F_z , neboli posuvová složka, je při obrábění nejvíce ovlivněna velikostí pracovního posuvu nástroje či obrobku. A jelikož pracovní posuv byl

v experimentu zahrnut a variován, jsou tyto výsledky statistického vyhodnocení nevěrohodné a rozporují teorii obrábění.



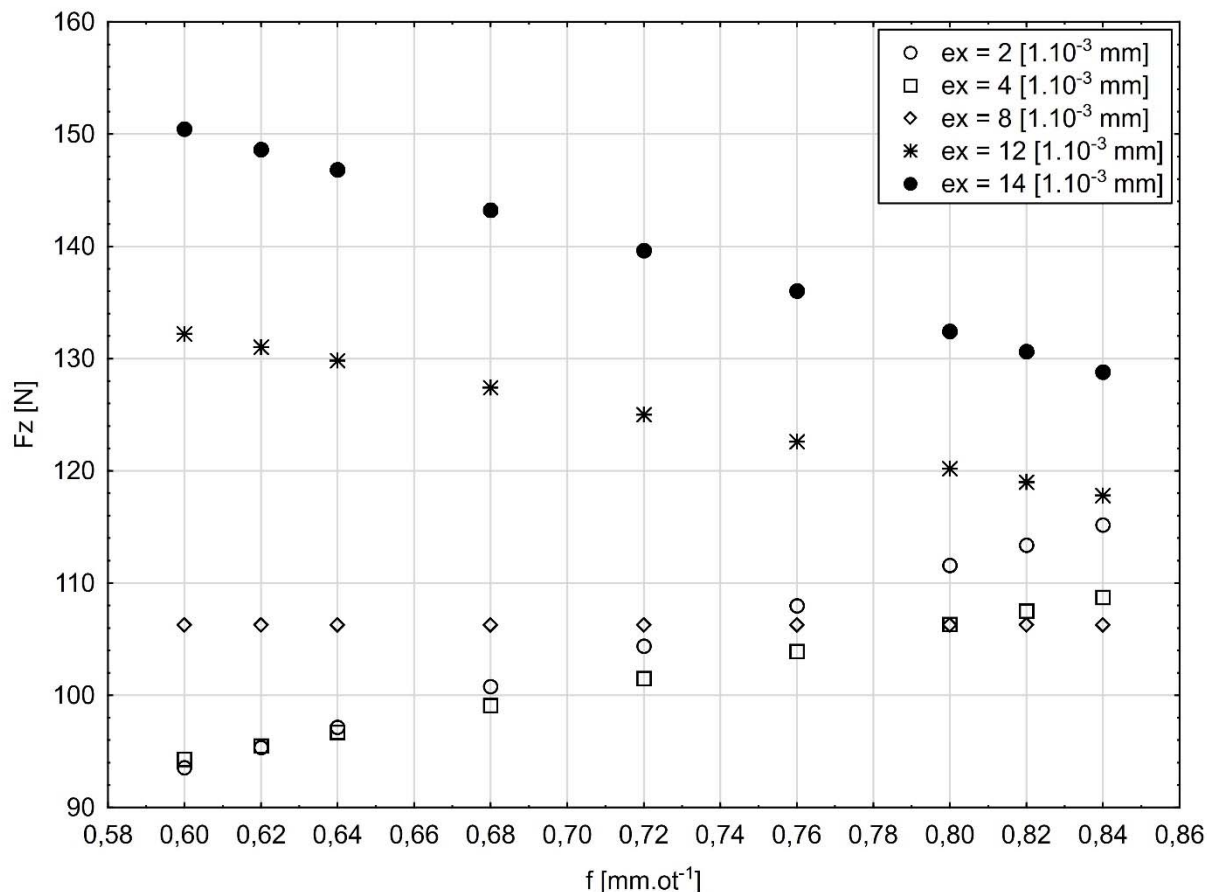
Obrázek 62. Graf vlivu posuvu na složky řezné síly [16]

Zde na **Obrázku 62.** je patrné, jak s narůstajícím posuvem se zvyšuje hodnota složky řezné síly F_f (F_z).



Obrázek 63. Závislost změny síly F_z na změně posuvu při $v_{fz-přet} = 15$ [m/min]

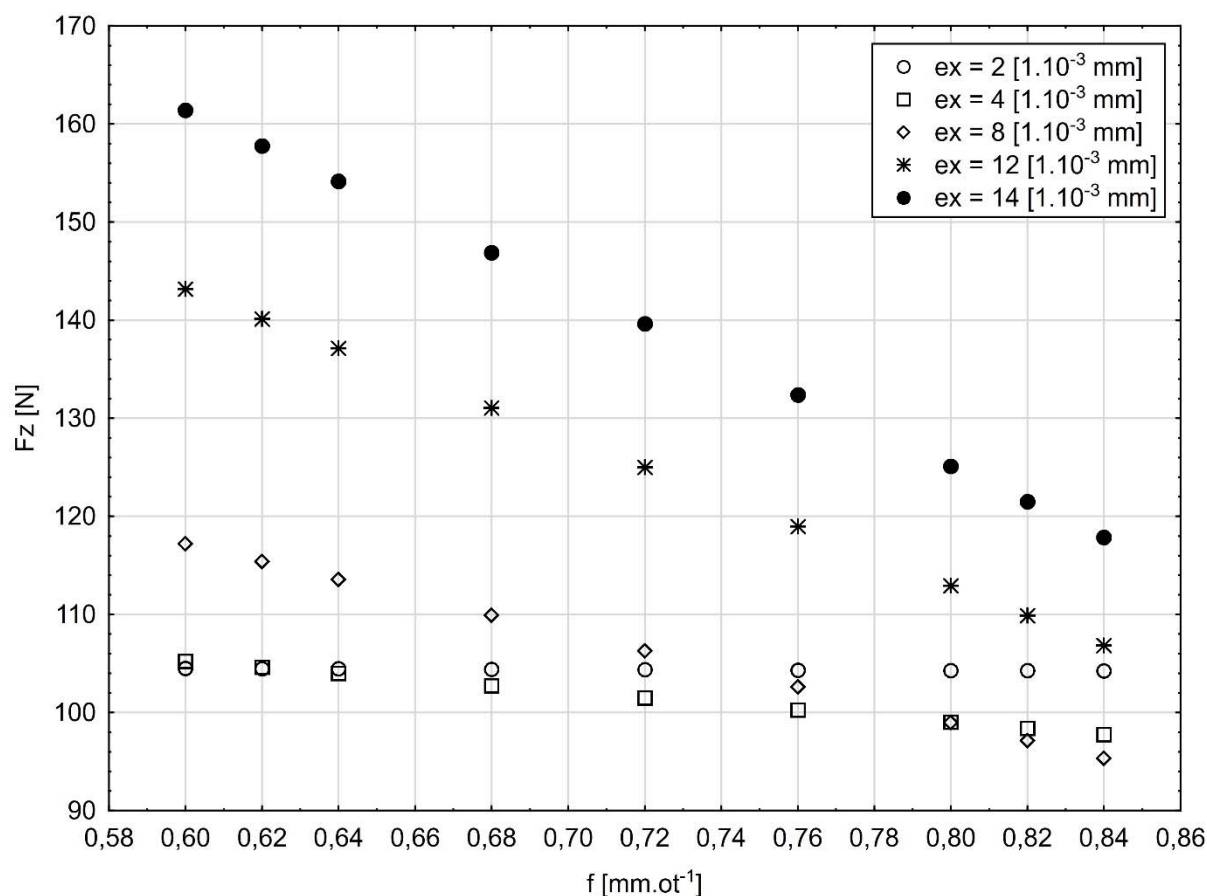
Obrázek 63. znázorňující závislost změny hodnoty síly F_z na změně pracovního posuvu při zpětném posuvu 15 m/min, má s růstem hodnoty posuvu stoupající trend hodnoty síly F_z . Tedy se zvyšujícím se posuvem se zvyšuje i hodnota síly. Ovšem jak se zvyšuje excentricita od 2 až po 14 μm , toto stoupání se vyrovnává a při excentricitě 14 μm se za zvyšujícího se pracovního posuvu nástroje hodnota síly F_z nemění.



Obrázek 64. Závislost změny síly F_z na změně posuvu při $v_{fzp} = 30$ [m/min]

Další rozporuplný průběh je znázorněn na **Obrázku 64**. Zde velikost síly F_z se zvyšujícím se posuvem narůstá pouze pro excentricitu 2 a 4 μm . Pro ostatní hodnoty excentricit se buďto hodnota síly F_z nemění anebo klesá.

Největší rozpor mezi teorií obrábění a obráběním skutečným vzbuzuje průběh složky řezné síly F_z na změně posuvu na **Obrázku 65**, kde pro všechny hodnoty excentricity s narůstajícím pracovním posuvem, klesají hodnoty síly. Tento průběh naprosto odporuje teorii obrábění a nabízí se myšlenka o správnosti měření a také vhodnosti experimentálního modelu z hlediska vyhodnocení posuvové složky řezné síly. Dalším možným vysvětlením je procentuální velikost variability naměřených hodnot vystružených děr. Z více jak 60% je síla F_z ovlivněna faktory, které nebyly během experimentu uvažovány, popřípadě byly uvažovány jako konstanty. Zcela vyloučit nelze ani chybu měřicí soustavy s dynamometrem a zesilovačem signálu.

Obrázek 65. Závislost změny síly F_z na změně posuvu při $v_{fzpět} = 45$ [m/min]

5.14 Doporučení pro další experimentální studium

Vzhledem k výsledkům statistického vyhodnocení se nabízí určité změny pro další experimenty. Jako první možnost je, vyměnit tříčelistové sklíčidlo za svěrák s prizmatickou čelistí. Zůstává znovu dotyk ve třech bodech plus ustavení čela na rovinou plochu svěráku. Určitý vliv může představovat materiál obrobku. Materiál 15 142 dle ČSN je ve stavu po zušlechťení a je tvořen bainitickou mikrostrukturou s velkým množstvím sulfidických vměstků. Možností jak dojít k příznivějším výsledkům je také použití vyvrtávacího nástroje po vrtání. Vrtákem vyvrtat otvor, poté použitím přesného vyvrtávacího nástroje zpřesnit otvor po vrtání a nakonec díru vystružit výstružníkem.

Změny se nemusí týkat jen materiálu, upnutí, nástrojů a strojů. Další možnost je rozšíření intervalů řezných podmínek (řezné rychlosti a posuvu).

Ovšem pro odhalení, jaký z faktorů měl největší vliv na nízkou věrohodnost výsledků, je nutné provést vždy jen jednu změnu, jeden zásah do přípravy experimentu. Například změnit upnutí obrobku a opakovat celý experiment při dosavadních řezných podmínkách a znovu experiment statisticky vyhodnotit. A takto postupovat dál, dokud se nedosáhne hladiny variability naměřených dat minimálně 75%.

6 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Každý inženýrský projekt či výzkumná činnost musí obsahovat také ekonomické hodnocení. Jelikož se dnes v průmyslové výrobě dbá na snižování nákladů, je toto ekonomické hodnocení velice důležité.

Tato diplomová práce stojí na principu základního výzkumu, kdy dopředu nelze očekávat konkrétní výsledky. V případě vystružování nebylo řešeno opotřebením nástrojů, ani strojní čas. Řešil se pouze vliv zvolených faktorů na vystružování. Nelze se tedy zde konkrétními ekonomickými postupy dopočítat ekonomického přínosu. Proto bude toto zhodnocení vedeno formou jistého doporučení optimálních řezných podmínek pro vystružování přesných děr. Všech 26 zhotovených a proměřených vzorků bude podrobeno srovnání s předepsanými tolerancemi danými normou z hlediska dosažené válcovitosti díry po vystružení. Dalším možným porovnáním by byla drsnost povrchu Ra, ale jak bylo zmíněno výše, výstružník u všech vzorků vyhotovil kvalitní povrch s nízkou hodnotou drsnosti Ra s minimálními odchylkami. Tudíž z hlediska drsnosti jsou všechny vzorky vyhovující.

Hodnoty dosažené válcovitosti vystružených vzorků budou porovnávány dle **Tabulky 23**. (viz **Příloha č. 3**) Zde pro průměr díry 12 mm a podle stupně přesnosti IT 7, je dovolená tolerance válcovitosti 8 μm . Jak je možné vidět v **Tabulce 20**, tak pouze u 7 z 26 vystružených vzorků se nepodařilo dosáhnout válcovitosti na stupni přesnosti IT 7. Nejlepší válcovitosti vystružené díry bylo dosaženo u vzorku s pořadovým číslem 15. při řezné rychlosti 200 m/min, pracovním posuvu 0,8 mm/ot, zpětném posuvu 20 m/min a excentricitě výstružníku 12 μm . Hodnota válcovitosti u tohoto vzorku je přibližně 3 μm , což je možné klasifikovat stupněm přesnosti IT 5.

Doporučení ohledně řezných podmínek je tedy ve velkém rozsahu. Celkem lze devatenácti způsoby nastavení řezných podmínek dosáhnout válcovitosti vystružené díry ve stupni přesnosti IT 7. Je ale nutné brát v úvahu použité nástroje. Monolitní vrták ze slinutého karbidu a vysokorychlostní výstružník s pájenými břitovými destičkami z cermetu s tenkou vrstvou TiAlN. Nelze opomenout ani materiál obrobku, jež byla ocel 15 142 dle ČSN a také stroj, 5ti osé frézovací centrum od firmy DMG.

Pořadové číslo vzorku	v_c [m/min]	f_{ot} [mm/ot]	$V_{f\ zpet}$ [m/min]	excentricita [μm]	Válcovitost [μm]	
1	160	0,64	20	4	4,72758	VYHOVUJE
5	160	0,64	20	12	4,74313	VYHOVUJE
9	160	0,64	40	4	5,35244	VYHOVUJE
17	160	0,64	40	12	6,41136	VYHOVUJE
22	160	0,8	20	4	9,93781	NEVYHOVUJE
18	160	0,8	20	12	8,29114	NEVYHOVUJE
6	160	0,8	40	4	3,85709	VYHOVUJE
8	160	0,8	40	12	6,72615	VYHOVUJE
25	200	0,64	20	4	11,23281	NEVYHOVUJE
14	200	0,64	20	12	12,48695	NEVYHOVUJE
11	200	0,64	40	4	10,73082	NEVYHOVUJE
24	200	0,64	40	12	5,70695	VYHOVUJE
10	200	0,8	20	4	5,26191	VYHOVUJE
15	200	0,8	20	12	3,05678	VYHOVUJE
16	200	0,8	40	4	6,46137	VYHOVUJE
13	200	0,8	40	12	4,67270	VYHOVUJE
3	150	0,72	30	8	6,95741	VYHOVUJE
20	210	0,72	30	8	4,67960	VYHOVUJE
21	180	0,6	30	8	7,08183	VYHOVUJE
12	180	0,84	30	8	5,87204	VYHOVUJE
7	180	0,72	15	8	7,55562	VYHOVUJE
2	180	0,72	45	8	9,45745	NEVYHOVUJE
4	180	0,72	30	2	6,58823	VYHOVUJE
23	180	0,72	30	14	5,62644	VYHOVUJE
19	180	0,72	30	8	7,52806	VYHOVUJE
26	180	0,72	30	8	8,87491	NEVYHOVUJE

Tabulka 20. Dosažené hodnoty válcovitosti s porovnáním s předepsanou válcovitostí

7 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala vlivem technologických faktorů obrábění na integritu povrchu přesných děr, vyráběné pomocí technologie vystružování. Prvním úkolem bylo provést rešerši z publikovaných odborných článků a vybrat nejvíce ovlivňující faktory na vystružování. Články byly vyhledány z elektronických informačních zdrojů dle klíčových slov. Z článků byly vybrány čtyři faktory. A sice řezná rychlost, posuv, materiál nástroje a použití procesní kapaliny.

Dalším úkolem, na základě poznatků z rešerše, bylo navržení vlastního experimentálního studia. To bylo rozděleno na dvě části. V první byl zpracován experiment na vliv technologie vrtání na kvalitu vystružené díry. Šlo o výběr optimální strategie vrtání před vystružením díry tak, aby díra měla co nejvyšší kvalitu. Z tohoto experimentu byla vybrána strategie vrtání s navrtáním středícího důlku, pracovním posuvem s přerušením. Tato strategie byla poté použita v druhé experimentální činnosti. V té bylo úkolem zjistit vliv zvolených faktorů obrábění na integritu povrchu přesných děr. Na základě rešerše byly jako faktory vybrány řezná rychlost, posuv, zpětný posuv a excentricita výstružníku. Experiment byl naplánován pomocí ortogonálního centrálně kompozitního plánu proto, aby bylo možné po statistickém vyhodnocení naměřených dat určit vliv jednotlivých zvolených faktorů vystružování právě na kvalitu povrchu přesných děr.

Právě statistické vyhodnocení po experimentu odhalilo určité nedostatky. Například variabilita výsledků válcovitosti byla pouhých 55%, tudíž experiment, tak jak byl sestaven, ovlivňují z 45% další faktory, které ovšem nebyly během experimentu variovány, či se objevili náhodně. A to přesto, že většina ze zhotovených vzorků se pohybovala ve stupni přesnosti válcovitosti IT 7 a menší. U všech zhotovených děr byla naměřena drsnost povrchu Ra pohybující se okolo 0,2 μm . Tím bylo dokázáno, že výstružník s břity z cermetu pracoval spolehlivě v daných nastavených řezných podmínkách. Další vyhodnocovanou veličinou z experimentu byla posuvová složka řezné síly. Právě u jejích výsledků vznikly největší rozpaky. Jednotlivé grafické průběhy této posuvové síly při vystružování odporovaly samotné teorii obrábění, kdy při zvyšování hodnoty pracovního posuvu docházelo ke snižování velikosti posuvové síly. Závěrem vyhodnocení bylo doporučení změn pro další experimentální činnost, navazující na tento pre-experiment.

Poslední částí bylo technicko-ekonomické zhodnocení. Zde bylo vyneseno doporučení týkající se volby řezných podmínek pro vystružování přesných děr za dosažení optimálních parametrů válcovitosti a drsnosti povrchu Ra. Proto byly vybrány takové řezné podmínky, kterými byly zhotoveny vzorky s válcovitostí ve stupni přesnosti IT 7 a menší.

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] FIALA, S., KOUŘIL, K., ŘEHOŘ, J., a kol. Výzkum a vývoj vysoce přesných produktivních řezných nástrojů nové generace s využitím inovativních technologií a progresivních materiálů. Průběžná zpráva k projektu TA02010236 za rok 2012, HAM-FINAL s.r.o., Brno, 2012.
- [2] HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Praha, MM publishing, s.r.o. 2008. 240 s. ISBN 978-80-254—2250-2
- [3] ŘEHOŘ, J., FULEMOVÁ, J., KOUŘIL, K., MATOUŠ, P. Současné trendy středění nástrojů pro výrobu přesných děr. Plzeň, Strojírenská technologie 2015
- [4] KRÍŽ, D. Moderní metody výroby děr v kovových materiálech: Bakalářská práce. Brno, VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013.
- [5] KRÍŽ, A. CERMET: Přednášky předmětu MO. Plzeň, ZČU v Plzni, Fakulta strojní, 2016.
- [6] ZETEK, M. Obrobitelnost materiálů: Přednášky předmětu ST. Plzeň, ZČU v Plzni, Fakulta strojní, 2016.
- [7] KOUŘIL, K., VANĚK, V. Dokončovací operace vystružování. MM Spektrum 2006 / 6, 14. 06. 2006 Trendy / Obrábění, Strana 32
- [8] FIALA, S., KOUŘIL, K. Cermetové výstružníky s utvářeči třísek. MM Spektrum 2016 / 9, 07. 09. 2016 Výroba / Obrábění, Strana 116
- [9] WINTER, M. Výstružník se speciální geometrií. MM Spektrum 2012 / 11, 14. 11. 2012 Výroba / Obrábění, Strana 70
- [10] PLÁNIČKA, F. Výstružníky ze špičkových materiálů zvyšují produktivitu. MM Spektrum 2007 / 4, 24. 04. 2007 Trendy / Obrábění, Strana 26
- [11] FIALA, S., KOUŘIL, K. Moderní nástroje pro dokončování děr. MM Spektrum 2007 / 4, 25. 04. 2007 Trendy / Obrábění, Strana 42
- [12] MÜLLER, P., GENTA, G., BARBATO, G., DE CHIFFRE, L., LEVI, R. Reaming proces improvement and control: An application statistical engineering. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 5 2012, 12. 08. 2012, Pages 196 - 201
- [13] HAVLÍK, L. Integrita povrchu při vystružování s využitím vystružovací hlavice MT3. Brno 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Pp. 88. Annexe 3 pcs. Vedoucí práce: Ing. Karel Kouřil, Ph.D.
- [14] POKORNÁ, V., ROUB, J., ŘEHOŘ, J., FULEMOVÁ, J. Research study on influence of predefined factors on drilling produced hole before reaming. ERIN, The 10th International Conference for Young Researchers and PhD Students, May 10-12, 2016, Liptovský Ján, Slovak Republic
- [15] FULEMOVÁ, J., POKORNÁ, V., ŘEHOŘ, J., KUTLWAŠER, J. Významné vlivy technologie před-přípravy na kvalitu vystružené díry. 2016, Regionální Technologický Institut, Fakulta strojní, Západočeská univerzita v Plzni
- [16] ŘEHOŘ, J. TEORIE OBRÁBĚNÍ: Přednášky předmětu TO. Plzeň, ZČU v Plzni, Fakulta strojní, 2016.

Webové stránky

[17] [online]. [cit. 2016 – 12 - 10] Dostupné z:

<http://www.mmspektrum.com/clanek/vystruzovani-presnych-der-v-hydraulickych-komponentech.html>

[18] [online]. [cit. 2016 – 12 - 10] Dostupné z: <https://www.bo-import.cz/vrtaky/vrtaky-do-kovu/vrtaky-do-kovu-tvrdokovove/>

[19] [online]. [cit. 2016 – 12 - 10] Dostupné z:

<http://www.mmspektrum.com/clanek/specialni-nastroje-jako-cesta-k-produktivite.html>

[20] [online]. [cit. 2017 – 01 - 03] Dostupné z: <http://www.kto.zcu.cz>

[21] [online]. [cit. 2017 – 04 - 04] Dostupné z:

www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova.../MOP_vlastnosti_42CrMo4

Normy

[22] ČSN 01 4405 [cit. 2017 – 05 - 10], str. 5

9 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 - Materiálová list oceli 42CrMo4 [21]

Příloha č. 2 Grafy z experimentu Vliv technologie vrtání na kvalitu vystružené díry

Příloha č. 3 Tabulka tolerancí válcovitosti děr [22]

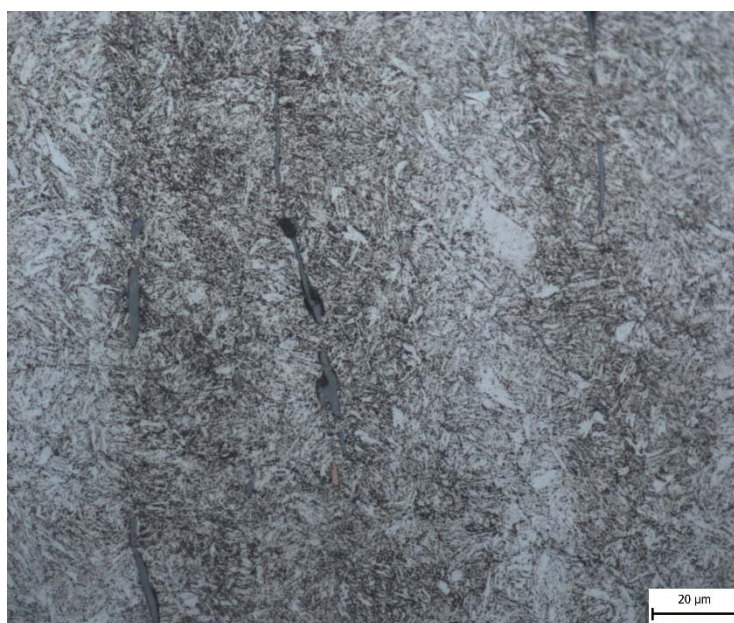
Příloha č. 1 - Materiálový list oceli 42CrMo4 [21]**Materiál:** Nízkolegovaná ušlechtilá chrom – molybdenová ocel k zušlechtění**Označení:** 42CrMo4 (15 142 dle ČSN), ČSN EN 10 083-3:2007, Wr.Nr. 1.7225**Polotovary:** Ø30 x 550 mm**Teplota kalení:** 820 – 860 [°C]**Kalicí prostředí:** syntetické polymery a olej (z důvody náchylnosti k trhlinám)

C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	P [%]	S [%]
0,38 – 0,45	0,50 – 0,80	0,17 – 0,37	0,90 – 1,20	max 0,50	0,15 – 0,30	max 0,035	max 0,035

Tabulka 21. Chemické složení 42CrMo4

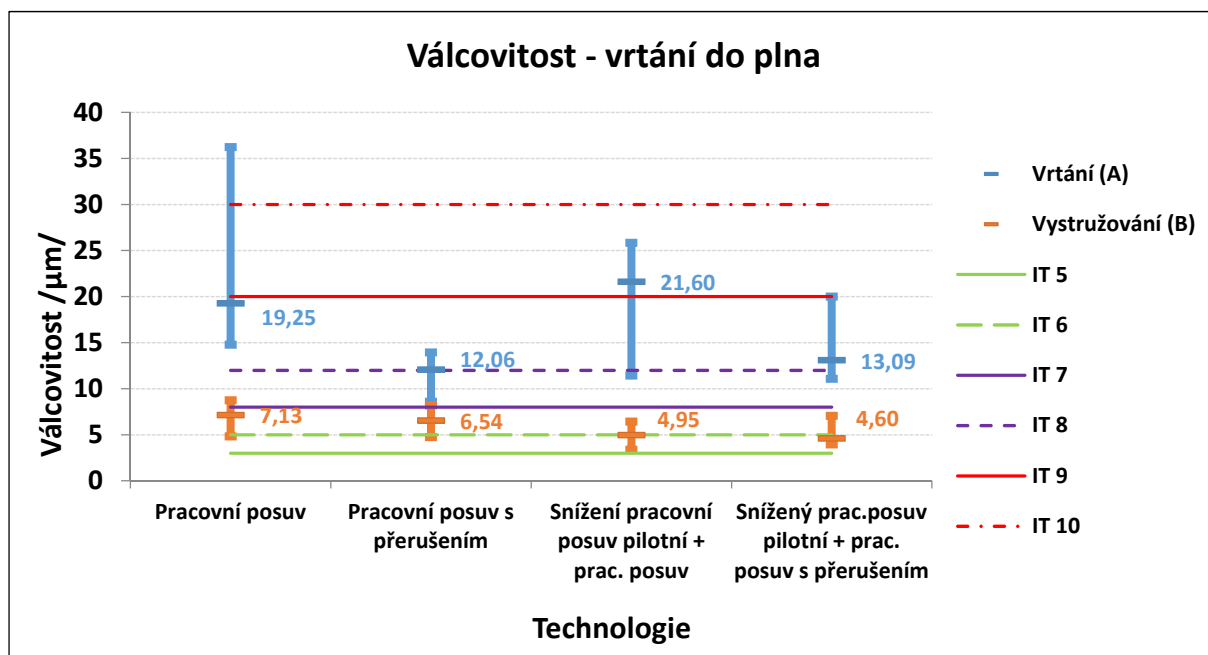
Mez kluzu Rp0,2 [MPa]	750
Mez Pevnosti Rm [MPa]	1 000 – 1 200
Tažnost A [%]	11
Kontrakce [%]	45
Modul pružnosti E [MPa]	216
Modul pružnosti ve smyku G [MPa]	83

Tabulka 22. Mechanické vlastnosti oceli 42CrMo4 v zušlechtěném stavu

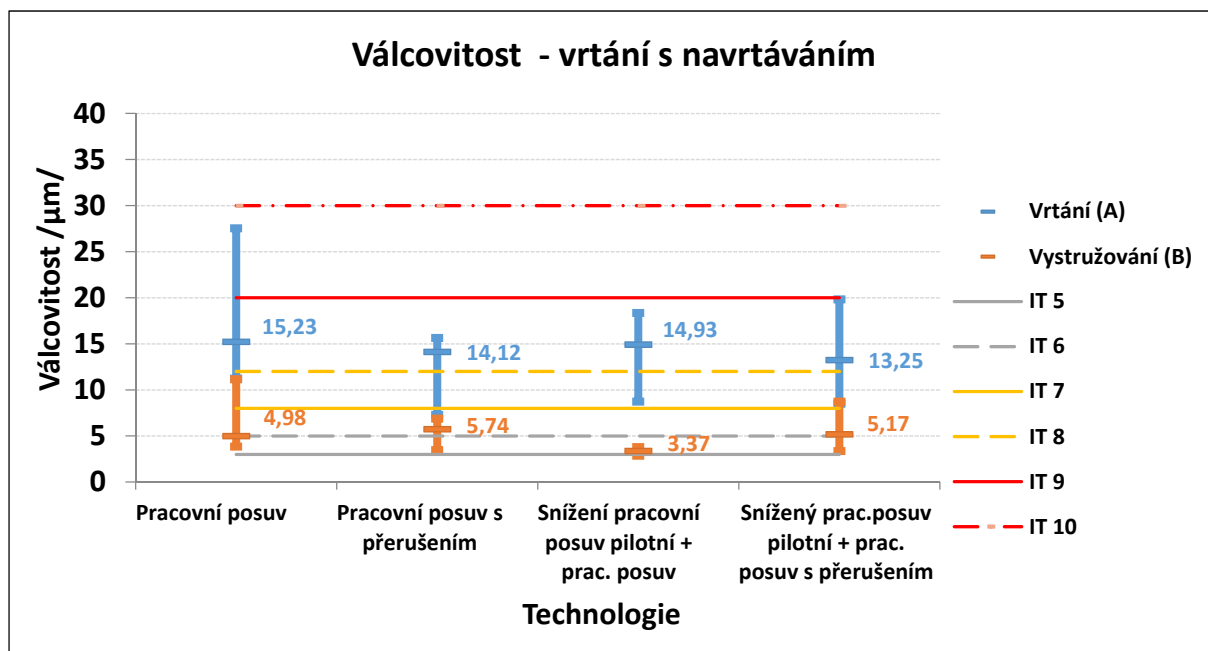


Obrázek 66. Struktura materiálu 42CrMo4 v ose rotace se sulfidickými vměstky

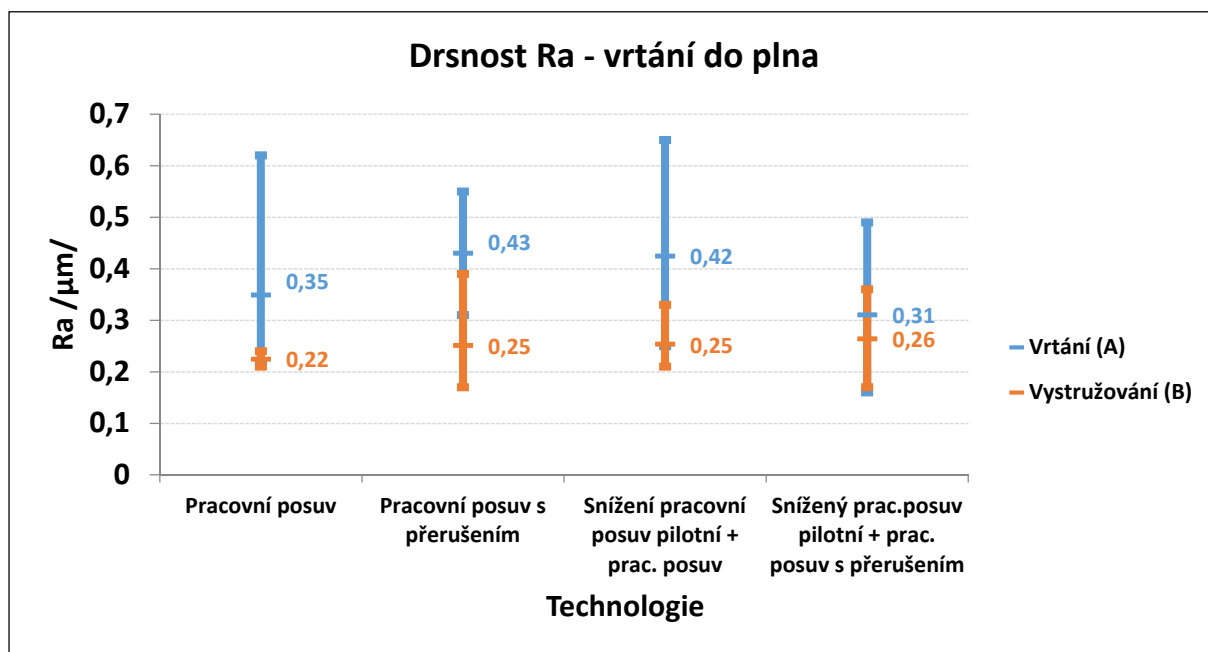
Příloha č. 2 - Grafy z experimentu Vliv technologie vrtání na kvalitu vystružené díry



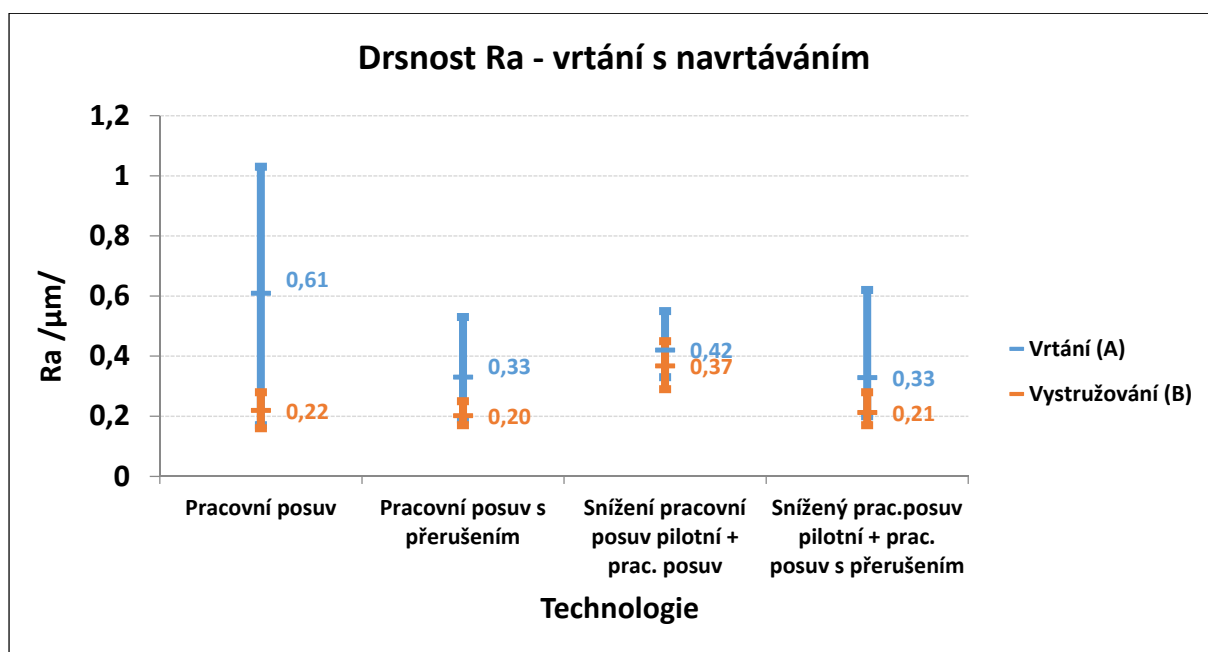
Graf 3. Válcovitost - vrtání do plna



Graf 4. Válcovitost - vrtání s navrtáváním



Graf 5. Drsnost Ra - vrtání do plna



Graf 6. Drsnost Ra - vrtání s navrtáváním

Příloha č. 3 - Tabulka tolerancí válcovitosti děr [22]

Rozsahy jmenovitých rozměrů v mm		Stupeň přesnosti																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
		μm												mm				
přes	do	3	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	12	20	30	50	0,08	0,12	0,2	0,3
3	10	0,4	0,6	1	1,6	2,5	4	6	10	16	25	40	60	0,1	0,16	0,25	0,4	
10	18	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	12	20	30	50	80	0,12	0,2	0,3	0,5	
18	30	0,6	1	1,6	2,5	4	8	10	16	25	40	60	100	0,16	0,25	0,4	0,8	
30	50	0,8	1,2	2	3	5	8	12	20	30	50	80	120	0,2	0,3	0,5	0,8	
50	120	1	1,6	2,5	4	6	10	16	25	40	60	100	160	0,25	0,4	0,6	1	
120	250	1,2	2	3	5	8	12	20	30	50	80	120	200	0,3	0,5	0,8	1,2	
250	400	1,6	2,5	4	6	10	16	25	40	60	100	160	250	0,4	0,6	1	1,6	
400	630	2	3	5	8	12	20	30	50	80	120	200	300	0,5	0,8	1,2	2	
630	1000	2,5	4	8	10	16	25	40	60	100	160	250	400	0,6	1	1,6	2,5	
1000	1600	3	5	8	12	20	30	50	80	120	200	300	500	0,8	1,2	2	3	
1600	2500	4	6	10	16	25	40	60	100	160	250	400	600	1	1,6	2,5	4	

Tabulka 23. Tolerance válcovitosti