

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Oficiální zadání diplomové práce

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svou práci na téma Zlepšení kvality ploch v oblasti průřezů vysokotlakých kanálů čerpadla CP3 vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne:

podpis:

Děkuji vedoucímu práce Prof. Ing. Janu Mádlovi, CSc. za vedení, rady a připomínky při psaní této diplomové práce. Děkuji rovněž Ing. Markovi Gergelymu a jeho kolegům ze společnosti Bosch Diesel za rady, informace, poskytnuté materiály a realizaci experimentů, které mi pomohly k vypracování této práce.

ANOTACE

Cílem diplomové práce je nalézt řešení, které povede ke zlepšení kvality obráběných ploch v oblasti tělesa čerpadla CP3, která je označována jako pozice 5. Při obrábění jsou kladeny vysoké nároky na kvalitu přechodů průníků vysokotlakých kanálů kvůli zachování vlastností z hlediska únavy materiálu. Sledované parametry jsou přesnost pozic kanálů, kvalita obrobených povrchů otvorů a eliminace otřepů v průniku kanálů.

Práce se skládá z popisu původního stavu, teoretického rozboru problematiky, z návrhu a realizace experimentů a jejich vyhodnocení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vysokotlaké čerpadlo CP3, kvalita plochy, řezný proces, obráběcí nástroje, tvorba nárůstku, vibrace nástroje.

ANNOTATION

This diploma thesis looks for solution of the soft machining process problems on CP3 pump. It contains two parts – surface quality of the suction valve hole and surface quality of the edge of high pressure canal. The production process requests high quality surfaces to reach the highest endurance against material fatigue.

The thesis contains description of original processes, theory of machining and its application in tests. Tests are evaluated in conclusion of the thesis.

KEY WORDS

High pressure pump CP3, surface quality, cutting process, machining tools, build up edge, tool vibration.

Obsah

1. Úvod	3
1.1 Společnost Bosch Diesel	3
1.2 Téma práce	3
1.3 Common Rail system	4
1.4 Čerpadlo CP3	4
2. Rozbor a popis původního stavu	5
2.1 Výrobní linka	5
2.2 Stroj	6
2.3 Nástroje T5026 a T6018	7
2.3.1 Nástroj T5062	7
2.3.2 Nástroj T6018	8
2.4 Těleso čerpadla CP3	9
2.5 Pozice 5 tělesa CP3	10
2.6 Výroba kanálů pozice 5	11
2.7 Problémy výroby kanálů pozice 5	12
2.8 Vyhodnocování kvality ploch kanálů	13
2.9 Důsledky nekvalitně obrobených ploch	15
3. Teoretický rozbor řešených situací	16
3.1 Mechanika řezného procesu	16
3.2 Tvorba nárůstku	20
3.3 Tepelné jevy	22
3.4 Vliv geometrie nástroje na řezný proces	23
3.5 Povlakování nástroje	25
3.6 Opotřebení nástroje	25
3.7 Vibrace nástroje	32
3.7.1 Eliminace kmitání dle doporučení výrobců nástrojů	36

4. Návrhy na zlepšení a jejich vyhodnocení	39
4.1 Plocha odlehčení sacího ventilu	39
4.1.1 Návrh 1.1 – Zvyšování řezné rychlosti	39
4.1.2 Návrh 1.2 – Zvyšování řezné rychlosti	42
4.1.3 Návrh 1.3 – Zvyšování řezné rychlosti	45
4.1.4 Zhodnocení testů na zlepšení kvality SV	48
4.1.5 Návrh 2.1 – Optimalizace řezných podmínek obrábění SV	50
4.1.6 Návrh 2.2 – Optimalizace řezných podmínek obrábění SV	52
4.1.7 Shrnutí a navržená opatření z návrhů na zlepšení ploch odlehčení sacího ventilu.....	54
4.2 Lokální zafrézování	56
4.2.1 Návrh 1 – Změna počtu zubů a úprava řezných podmínek.....	56
4.2.2 Návrh 2 – Změna počtu zubů, zaoblení ostří a úprava řezných podmínek	58
4.2.3 Návrh 3 – Změna pořadí úkonů OP60	60
4.2.4 Návrh 4 – Změna profilu zubu na plný profil obráběné plochy.....	62
4.2.5 Návrh 5 – Změna natočení nástroje vůči ose sacího ventilu	64
4.3 Revize nástroje T6018	66
5. Závěr	70
Použité symboly	72
Použité zdroje.....	73
Seznam obrázků	74

1. Úvod

1.1 Společnost Bosch Diesel

Společnost Bosch Diesel s.r.o. vznikla v roce 1993 a sídlí v Jihlavě. Produkce je soustředěna do tří závodů, ve kterých jsou zaměstnány zhruba čtyři tisíce lidí. V závodě 1 probíhá sériová oprava starších typů čerpadel, závod 2 vyrábí vysokotlaké zásobníky a DRV ventily a v závodě 3 na Pávově se vyrábí vysokotlaká čerpadla CP3, CP4 a CP5. [1]



Obrázek 1 - Závody společnosti Bosch Diesel Jihlava a výrobní program [1]

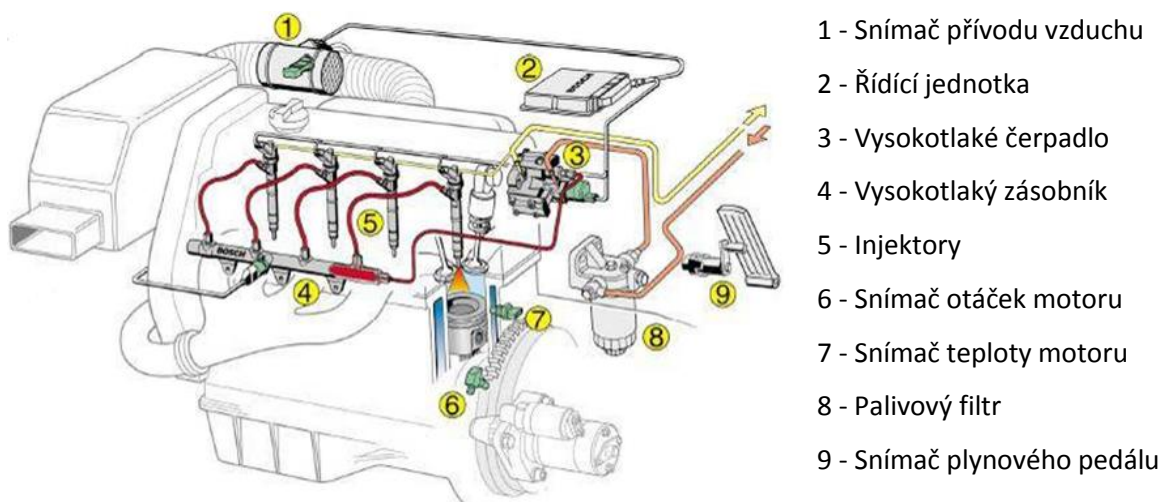
1.2 Téma práce

Při obrábění těles čerpadel CP3 jsou kladeny vysoké nároky na kvalitu přechodů průníků vysokotlakých kanálů, jejichž kvalita má vliv na únavovou pevnost. Zvláštní požadavky jsou kladeny na přesnost pozic kanálů, na kvalitu obrobenejších povrchů těchto otvorů a eliminace otřepu po obrábění. Zvyšování kvality znamená i zvyšování nákladů vzhledem k měnícím se řezným podmínkám, životnosti nástrojů a celkové produktivitě stroje, resp. obráběcí linky. Cílem práce je zlepšení sledovaných parametrů a odstranění vznikajících potíží při zachování životnosti nástrojů a produktivity výroby.

Práce se zabývá dvěma případy, oba se vztahují k průniku vysokotlakých kanálů (sací ventil a vysokotlaký kanál redukčního ventilu \varnothing 2,2 mm), který se označuje jako pozice 5. Pozice 5 a s ní související terminologie je uvedena v kapitole 2.5 a 2.6.

1.3 Common Rail system

Obrázek 2 zobrazuje schéma zapojení systému Common Rail. Po sešlápnutí plynového pedálu vyšle snímač plynového pedálu signál do řídicí jednotky. Ta vyšle signál do snímače přívodu vzduchu a do vysokotlakého čerpadla. Vysokotlaké čerpadlo nasaje integrovaným zubovým čerpadlem nebo přidavným elektrickým čerpadlem palivo z nádrže přes palivový filtr, který zabraňuje přítomnosti nečistot v systému. V čerpadle se zvýší tlak paliva a putuje do vysokotlakého zásobníku. Odtud je dávkováno pomocí injektorů do komor motoru. Aby byla zajištěna správná funkce celého systému, je třeba snímat teplotu motoru a otáčky vačkové hřídele.

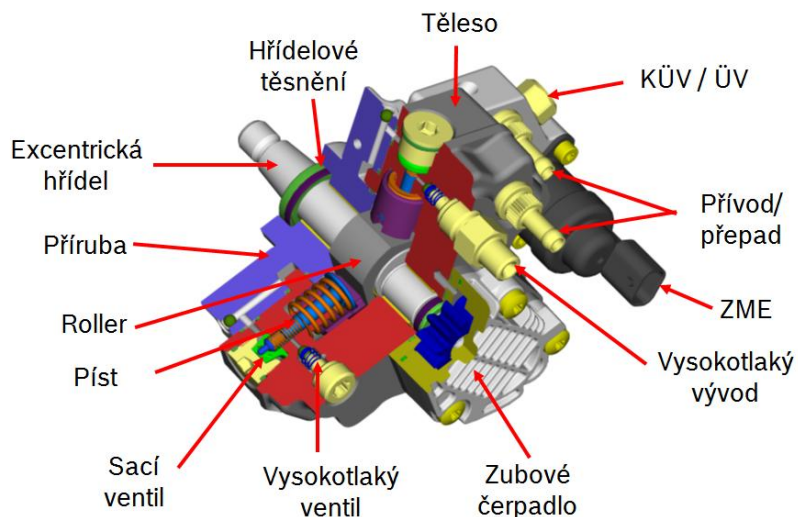


Obrázek 2 - Schéma zapojení systému Common Rail [1]

1.4 Čerpadlo CP3

Tento typ čerpadla se v jihlavském závodě vyrábí od roku 2000. V té době se vyráběl i v německém Feuerbachu, italském Bari a americkém Charlestonu. Od roku 2010 se vyrábí pouze v České republice a v Itálii. V létě dosáhl počet vyrobených kusů čerpadel v jihlavském závodě dvaceti milionů.

Čerpadlo je prvním prvkem ve vysokotlaké části systému Common Rail. Má za úkol zvýšit tlak paliva a dopravit ho do vysokotlakého zásobníku.

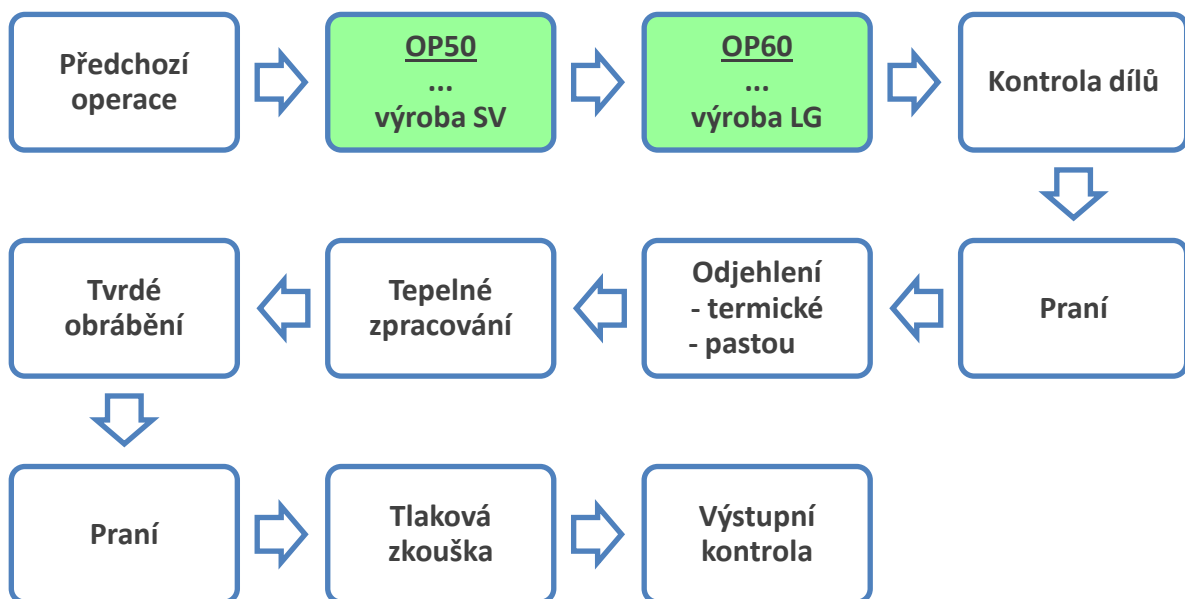


Obrázek 3 - Hlavní části vysokotlakého čerpadla, částečný řez CP3 [1]

2. Rozbor a popis původního stavu

2.1 Výrobní linka

Výrobní linka tělesa čerpadla, jejíž schéma je na obrázku 4, začíná nasazením výkoveků, následuje měkké obrábění kanálů a otvorů, mezi které patří i vrtání sacího ventilu v operaci OP50 a výroba lokálního zafrézování v operaci OP60. Těleso je při provozu namáháno vysokým tlakem kapaliny, proto následuje tepelné zpracování, broušení a honování a po závěrečné tlakové zkoušce je podrobena důsledné kontrole. Pokud splňuje veškeré nároky, je připraveno k montáži.



Obrázek 4 - Schéma výrobní linky

2.2 Stroj

Operace 50 a 60 probíhají na stroji GROB 550 BZ. Stroj má dvě vřetena, do kterých jsou upínány nástroje pomocí tepelných upínačů.

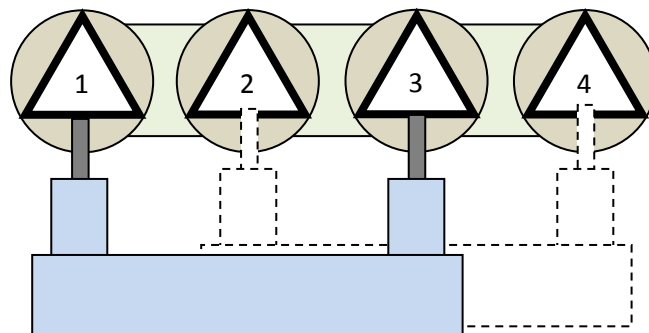
Tabulka 1 - Parametry obráběcího centra GROB 550 BZ

Výkon [kW]:	55
Krouticí moment [Nm]	140
Počet vřeten:	2
Otáčky vřetena [min^{-1}]	max. 10 000
Osy:	X, Y, Z, A
Upínání nástrojů	HSK 63
Počet nástrojů v zásobníku:	61
Řízení:	Siemens



Obrázek 5 - Obráběcí centrum GROB 550 BZ

Do pracovního stolu se upínají čtyři tělesa, tudíž se obrábí dvě tělesa současně (1 a 3, 2 a 4).



Obrázek 6 - Schéma obrábění těles

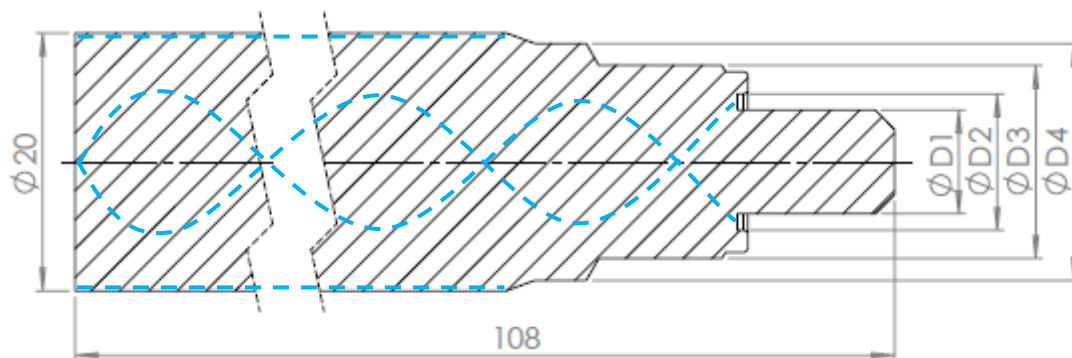
2.3 Nástroje T5026 a T6018

2.3.1 Nástroj T5062

Jedná se o kombinovaný dokončovací nástroj, který obrobí několik průměrů a čelní zápich. Slouží pro dokončení otvoru sacího ventilu (SV). Polotovar dodává společnost Kennametal, jedná se o tyčový polotovar ze slinutého karbidu K30/40 s obchodním označením DK 460 UF. Chemické složení je z 90 % karbid wolframu a 10% kobalt. Výrobce udává univerzální užití pro vrtání, frézování a výrobu závitů.

Nástroj obrábí několik průměrů současně. Výhodou takové konstrukce je garance rozměrů jak průměrů a délek, tak i souosost, která je pro správnou funkci sacího ventilu klíčová. Nevýhodou je velký rozdíl mezi nejmenším a největším průměrem, který je více než dvojnásobný. Z toho plyne velká rozdílnost řezných rychlostí a různá kvalita ploch obrobených průměrů. Nástroj se pro zvýšení trvanlivosti povlakuje povlakem ALOX SN² od společnosti CemeCon. Složení povlaku je TiAlN s tvrdostí až 3500 HB a tepelnou odolností až do 1000°C. Nástroj T5062 se upíná do tepelného upínače. K přívodu provozní kapaliny se využívá dvou vnitřních a dvou vnějších drážek (obrázek 7, modrá přerušovaná čára).

Nástroj má předepsanou trvanlivost 500 ks těles čerpadel. Po ukončení trvanlivosti je možné nástroj 3x přebrousit, celková životnost je tedy 2000 ks těles. Přebroušení nástroje probíhá v závodu, povlakování externě ve firmě dodavatele povlaků.



Obrázek 7 – Schéma nástroje T5062 [1]

Tabulka 2 - Orientační hodnoty průměrů nástroje T5062 [1]

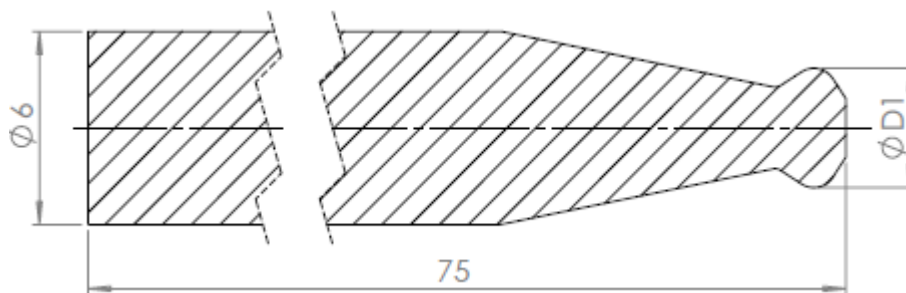
D	1	2	3	4
[mm]	8	10,8	15	18,4

2.3.2 Nástroj T6018

Stejně jako v případě T5062 je polotovar nástroje DK 460 UF. Nástroj pracuje hluboko v čerpadle, kde má za úkol srazit hranu přechodu kanálů pozice 5. Průměr kanálů sacího ventilu je omezující podmínkou pro rozměry nástroje. T6018 je pro zvýšení trvanlivosti povlakován povlakem FuturaTop od společnosti Oerlikon Balzers. Složení je TiAlN, tvrdost až 3300 HB a teplotní odolnost až do 900°C. Oblast řezu je chlazená kapalinou, která je přiváděna třemi drážkami vybroušenými po obvodu stopky. Na nástroji se dělá speciální úprava zaoblení ostří, tato technologie se nazývá troval.

Principem je otěr řezné části nástroje pískem s vysokou tvrdostí a abrazí. Nástroj je po upnutí zanořen do vany s pískem. Složeným rotačním pohybem vřetena nástroje a hlavního vřetena stroje dochází k řízenému opotřebení ostří po celé jeho délce. Z hlediska tvaru ostří nástroje T6018 vzniká problém, protože body ostří mají od osy otáčení nástroje různou vzdálenost a nástroj má v různých bodech ostří různou obvodovou rychlost. Díky tomu dochází k nerovnoměrnému opotřebení a k proměnlivosti velikosti rádiusu ostří po celé jeho délce. Zlepšit tento stav se daří díky proměnlivé hloubce zanoření. Velikost takto vzniklého rádiusu se pohybuje v řádech desítek mikrometru.

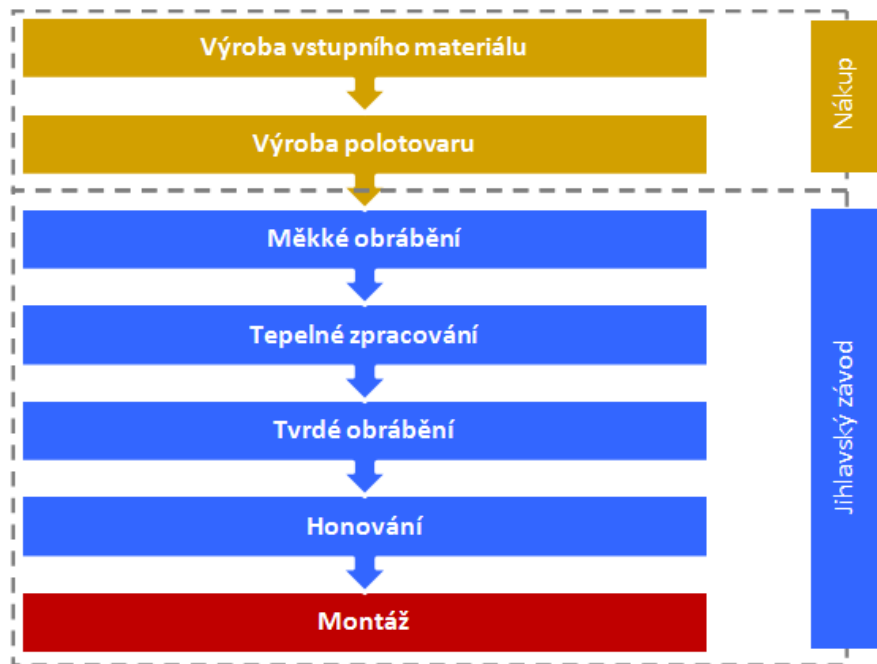
Zaoblení ostří se na nástroji vytváří uměle. V praxi se ukázalo, že kmitání pro tento speciální případ obrábění (frézování přes díru) ustalo po zhruba 50 - 150 vyrobených kusech. Troval tedy simuluje stav opotřebení, s tou výhodou, že kvalita čelních a hřbetních ploch nástroje a jejich povlak je stoprocentní. Trvanlivost nástroje je stanovena na 500 ks těles čerpadel, nástroj se nepřebírá.



Obrázek 8 - Schéma nástroje T6018 [1]

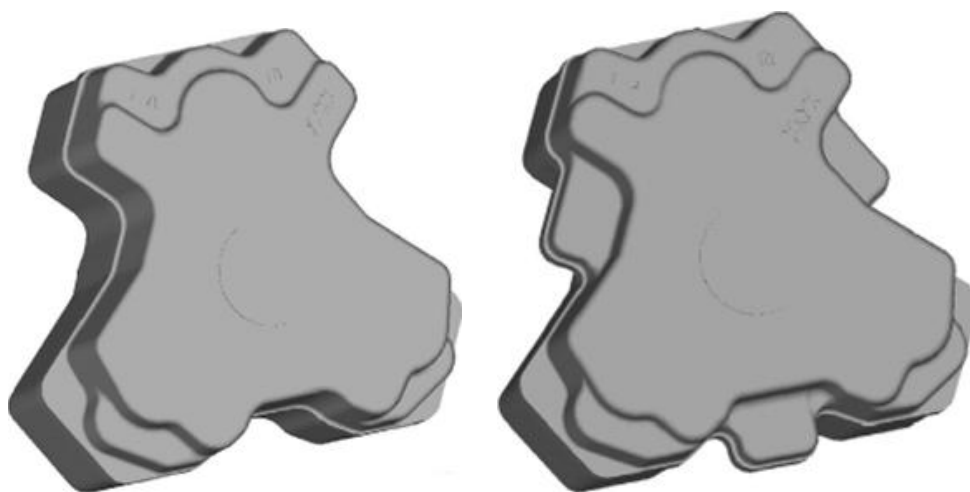
2.4 Těleso čerpadla CP3

Těleso čerpadla se vyrábí z oceli legované především manganem a chromem. Polotovarem je výkovek, který se nakupuje. Další výrobní procesy probíhají už jen v jihlavském závodě. První fází je měkké obrábění, po kterém se tělesa tepelně upravují. Následuje tvrdé obrábění a honování. Po této fázi je těleso připraveno k montáži.

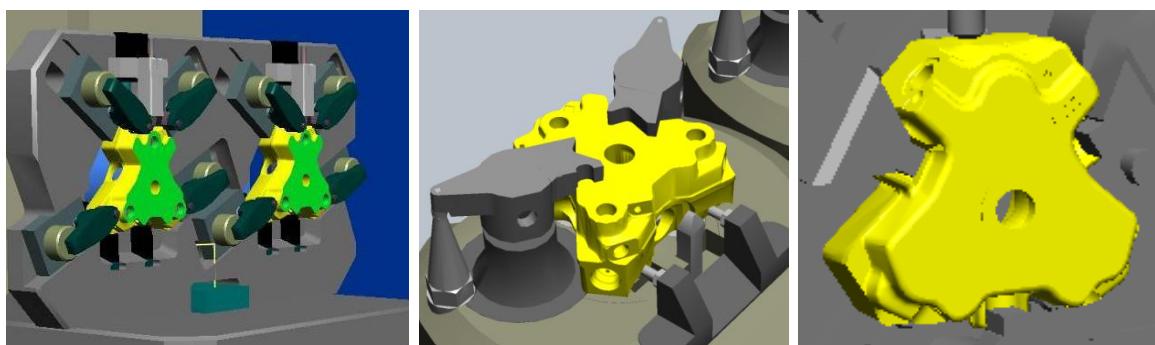


Obrázek 9 - Schéma výroby tělesa

Polotovary (obrázek 7) existuje ve dvou variantách, které se liší upínacími plochami. Na obrázku 10 vlevo je těleso pro stroje s pracovním označením CNC a GROB, vpravo pro TFS.



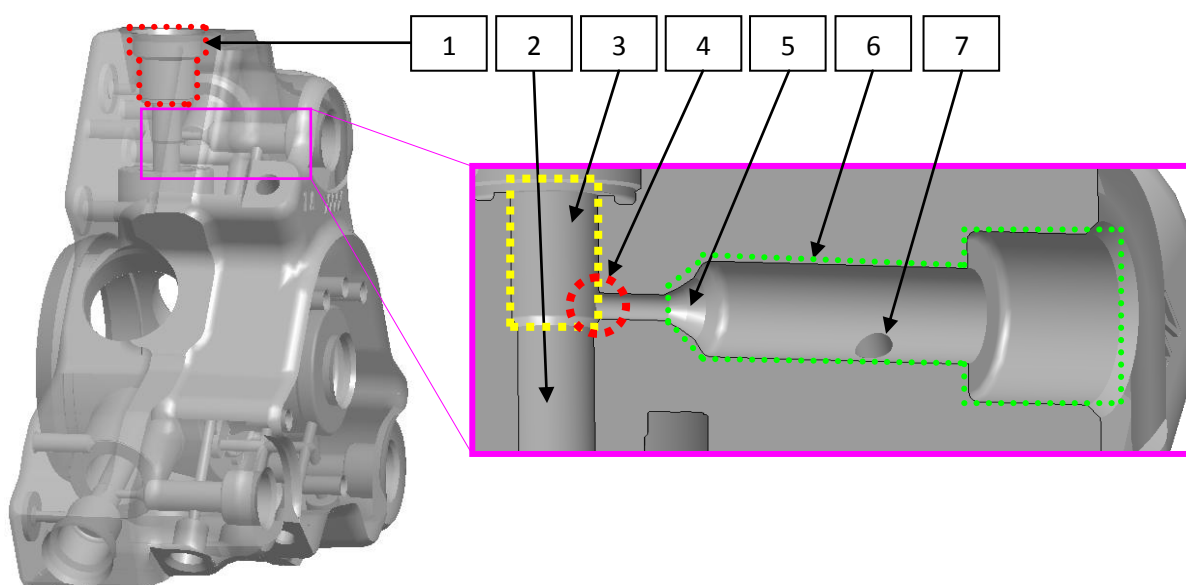
Obrázek 10 - Polotovary těles, vlevo pro CNC a GROB, vpravo pro TFS [1]



Obrázek 11 - Upínací systémy, zleva CNC, GROB, TFS [1]

2.5 Pozice 5 tělesa CP3

Pozice 5 je pracovní označení pro průnik kanálů sacího a RSV ventilu (zpětný ventil). V okamžiku, kdy je píst v horní úvrati, dochází k otevření sacího ventilu a s pohybem pístu do dolní úvrati k nasátí paliva do oblasti odlehčení sacího ventilu. Po dosažení dolní úvrati se sací ventil uzavírá a píst se pohybuje zpět k horní úvrati, přičemž dochází ke zvýšení tlaku paliva. V okamžiku dosažení charakteristického tlaku se otevírá vysokotlaký ventil a palivo putuje do V-kanálu a dále HD ventilem opouští čerpadlo. Čerpadlo vykoná tři tyto cykly za otáčku.

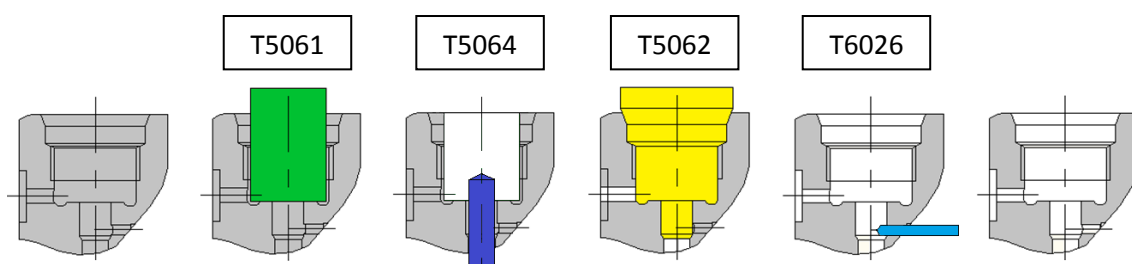


Obrázek 12 – Pozice 5, umístění v tělese. 1 – plochy sacího ventilu, 2 – válec pístu, 3 – odlehčení pístu (elementu), 4 - průnik kanálů (pozice 5), 5 – sedlo vysokotlakého ventilu, 6 – otvor pro vysokotlaký ventil, 7 – ústí V-kanálu [1]

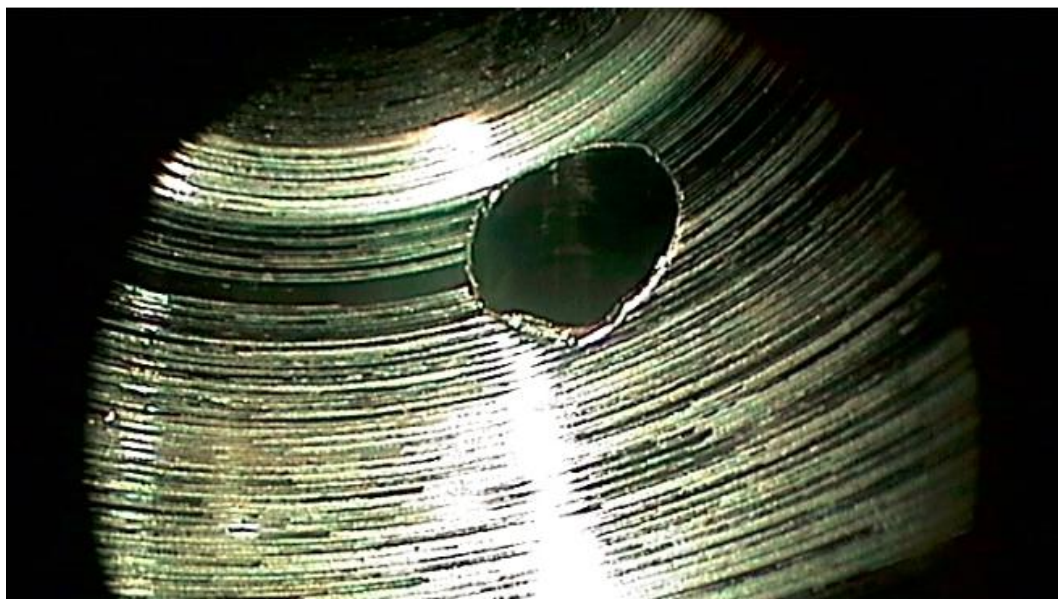
2.6 Výroba kanálů pozice 5

Pozice 5 je místo v tělese čerpadla, kde ústí kanál vysokotlakého ventilu do odlehčení sacího ventilu (SV). Tento průnik se vyrábí ve dvou variantách.

První varianta se je bez lokálního zafrézování (LG). Prvním krokem je hrubování průměru sacího ventilu nástrojem T5061. Poté se nástrojem T5064 hrubuje průměr odlehčení elementu. Následuje dokončení speciálním tvarovým nástrojem T5062 a vrtání kanálu vysokotlakého ventilu načisto nástrojem T6026.



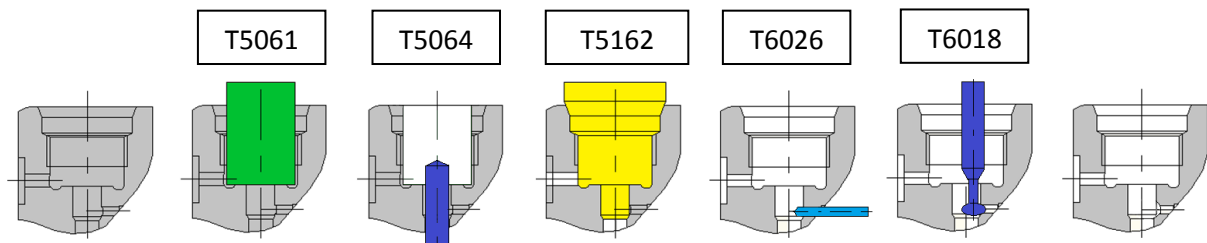
Obrázek 13 - Sled operací výroby sacího a vysokotlakého kanálu [1]



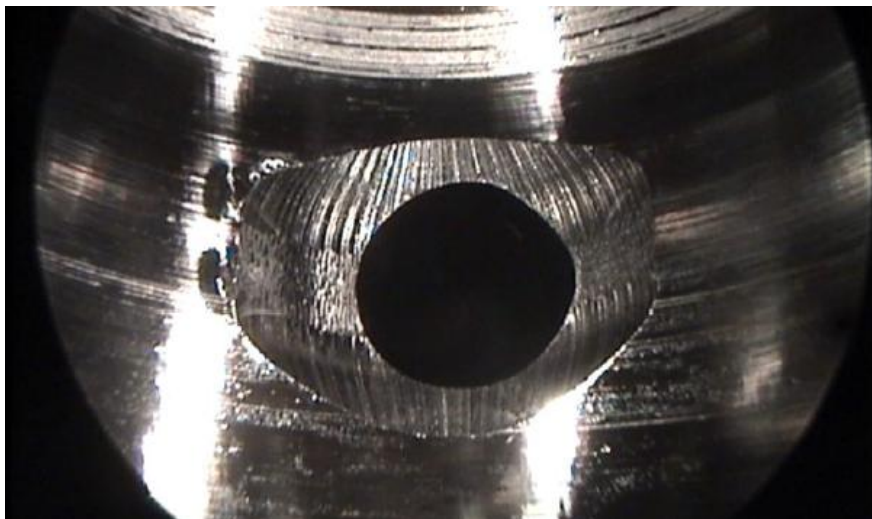
Obrázek 14 - Fotografie pozice 5 bez lokálního zafrézování po obrábění načisto [2]

Druhá varianta je s lokálním zafrézováním. Lokální zafrézování je další operace, při které dojde k odfrézování hrany vzniklé průnikem ploch odlehčení sacího ventilu a kanálu vysokotlakého ventilu. Výrobní postup je stejný jako v případě bez lokálního zafrézování. Nástroj T5162 je modifikovaný nástroj T5062, část nástroje na dokončení odlehčení elementu je delší. Je to proto, aby fréza T6018

mohla vyrobít plochu lokálního zafrézování, a nedošlo ke kontaktu nástroje a sražení hrany. Účelem lokálního zafrézování je odstranění přechodové hrany mezi kanály, kde dochází ke koncentraci napětí a toto místo zdrojem případného porušení tělesa.



Obrázek 15 - Sled operací výroby sacího a vysokotlakého kanálu s lokálním zafrézováním [1]



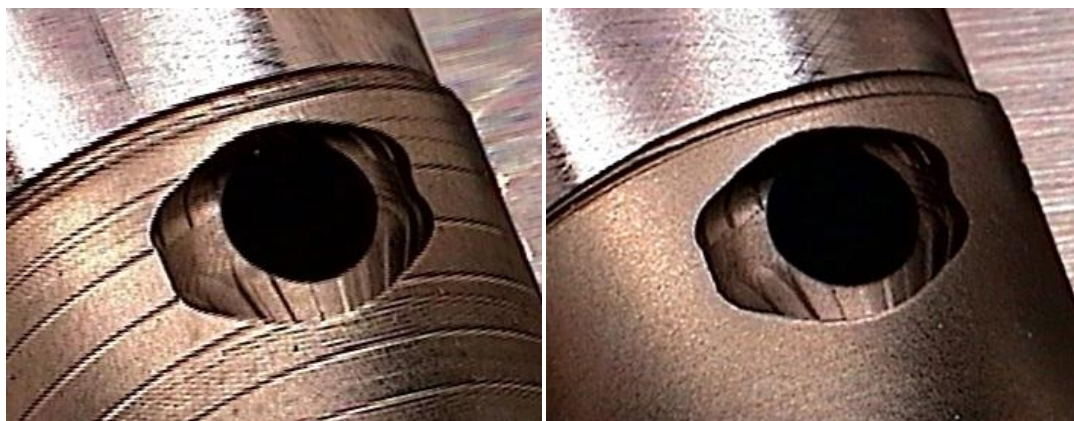
Obrázek 16 - Fotografie pozice 5 s lokálním zafrézováním [2]

2.7 Problémy výroby kanálů pozice 5

Výroba kanálů pozice 5 není bezproblémová. Při obrábění ploch sacího kanálu načisto dochází k tvorbě nárůstku na čele nástroje. Nárůstek poškozuje obrobenou plochu, rýhy, případně úlomky nárůstku, zvyšují drsnost plochy, která je po takovém poškození často zmetková.

V druhém případě dochází při obrábění ploch lokálního zafrézování k vibraci nástroje. Vibrace zanechají stopy na obrobené ploše a takový stav je nepřijatelný z hlediska únavové pevnosti.

Cílem je tedy eliminovat tyto problémy tak, aby obrobené plochy byly bez poškození, která mají charakter vrubu a mohou být při cyklickém namáhání zdrojem trhlin.

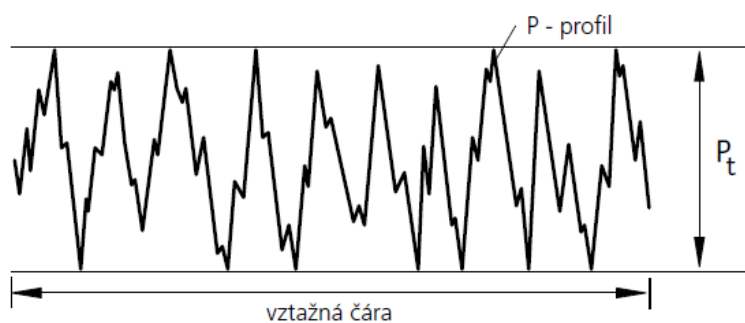


Obrázek 17 - Rýha způsobená nárůstkem (vlevo), stopy po nástroji na ploše lokálního zafrézování (vpravo) [1]

2.8 Vyhodnocování kvality ploch kanálů

Kvalita plochy odlehčení sacího ventilu je zadána výkresovou dokumentací. Hodnotí se pomocí parametru výšky profilu P_t dle ISO 4287. Požadovaná drsnost plochy odlehčení sacího ventilu je maximálně $P_t = 16 \mu\text{m}$. Vztažnou čarou je výška válce odlehčení.

Hloubka profilu P_t (celková výška P profilu) je vzdálenost nejvyšší špičky a nejnižší prohlubně profilu na dráze, jejíž délku je třeba pro správnost vyhodnocení uvést. P profil vzniká z profilu získaného dotykovou metodou. [3]



Obrázek 18 - P profil získaný dotykovou metodou[3]

Výška profilu je měřena na měřícím stroji Mahr S2. Jedná se o hrotový drsnoměr, který je ovládán ručně. Snímaný povrch se vyhodnocuje pomocí softwaru od společnosti Mahr.



Obrázek 19 - Drsnoměr MAHR S2 [2]

Vyhodnocení kvality plochy LG probíhá vzhledem k malým rozměrům a umístění hluboko v tělese pouze vizuálně. Termické odjehlení a pastové odjehlení dokáže stopy po vibraci na ploše vyhladit, nicméně je tomu tak jen v malém množství případů. Kontrola probíhá až po odjehlení, tepelném zpracování a praní, z toho důvodu je zapotřebí zajistit klidný chod nástroje, resp. plochu bez stop po nástroji, pokud možno již po obrobení, aby byl případný zmetek vyřazen okamžitě. Ušetří se tak náklady vynaložené na dalších stanicích linky (obrázek 4).



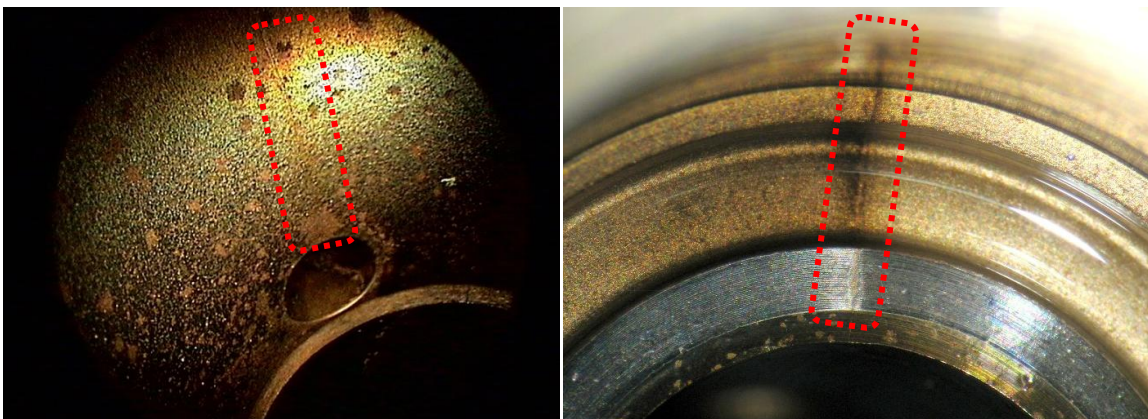
Obrázek 20 - Vyhovující přechody kanálů pozice 5 na výstupní kontrole. Bez lokálního zafrézování vlevo, s lokálním zafrézováním vpravo. Stav po výsledné kontrole. [2]

2.9 Důsledky nekvalitně obroběných ploch

Jak vysoká drsnost plochy odlehčení, tak rýhy na ploše lokálního zafrézování jsou nežádoucí jevy. Mají negativní vliv na životnost čerpadla. Oblast pozice 5 je cyklicky namáhána vysokým tlakem a vruby snižují únavovou pevnost. Došlo k několika případům reklamace čerpadel, jejíž příčinou byla trhlina v tělese. Počátek trhliny byl indikován právě v místě pozice 5, nejpravděpodobněji se jeví přechod mezi kanály (koncentrace napětí v ostré přechodové hraně). Trhlina způsobí snížení pracovního tlaku, čerpadlo není schopné zásobovat palivový systém a dochází k úniku paliva.



Obrázek 21 - Únik paliva trhlinou ve stěně tělesa [2]



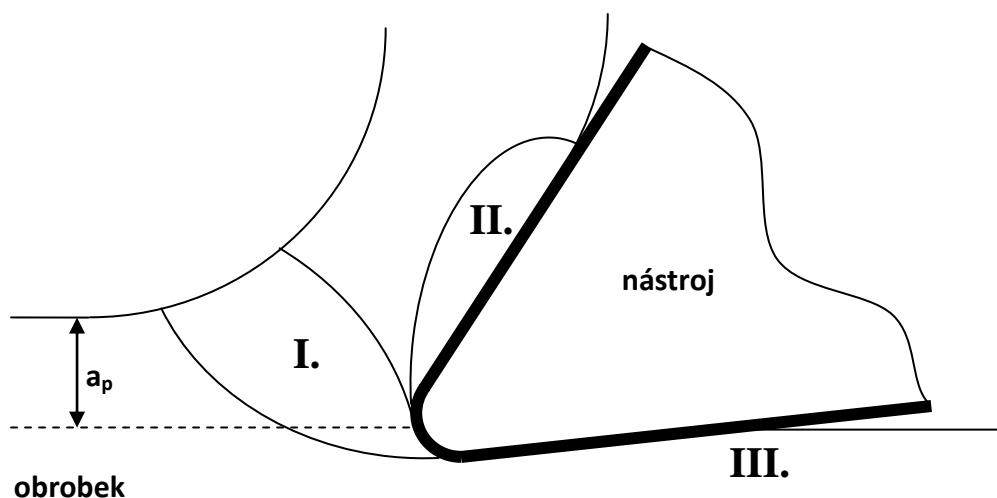
Obrázek 22 - Trhlina tělesa. Vlevo v odlehčení sacího ventilu, vpravo těsnící plocha sacího ventilu [2]

3. Teoretický rozbor řešených situací

3.1 Mechanika řezného procesu

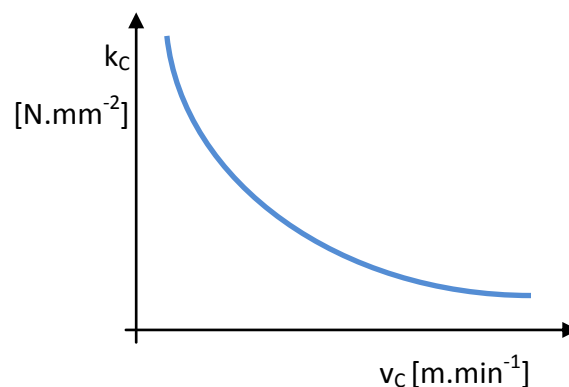
Vznik třísky je doprovázen plastickou deformací v oblasti řezu. Na obrázku 21 jsou znázorněny tři oblasti, ve kterých k deformaci dochází.

V oblasti primární plastické deformace (I.) dochází k plastické deformaci obráběného materiálu, která předchází vzniku jednotlivých elementů třísky. Velikost této oblasti, silové a tepelné jevy jsou ve vztahu s vlastnostmi materiálu, řeznými podmínkami a geometrií nástroje.



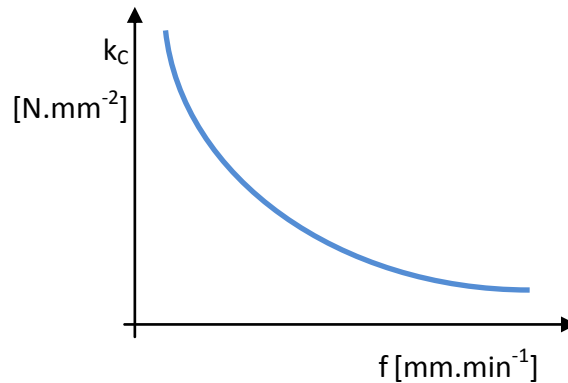
Obrázek 23 - Místo řezu s primární (I.), sekundární (II.) a terciární (III.) oblastí deformace [9]

Se zvyšující se řeznou rychlostí se oblast I. zmenšuje, natáčí se směrem k břitu. Zmenšení oblasti je důsledek vyšších rychlostí deformací, při kterých dochází v materiálu k poklesu mechanických vlastností. Současně dojde i k poklesu řezného odporu materiálu (k_c) a snížení řezné síly (F_c). Závislost velikosti měrného řezného odporu na rychlosti zobrazuje obrázek 22.



Obrázek 24 - Závislost měrného řezného odporu na řezné rychlosti [9]

Posuv má na velikost měrného řezného odporu podobný účinek jako řezná rychlost. Se zvyšujícím se posuvem odpor materiálu klesá, protože se zvětšuje plocha odřezávané vrstvy. Oblast primární deformace se zmenšuje a natáčí směrem k břitu. Závislost měrného řezného posuvu na velikosti posuvu zobrazuje obrázek 23.

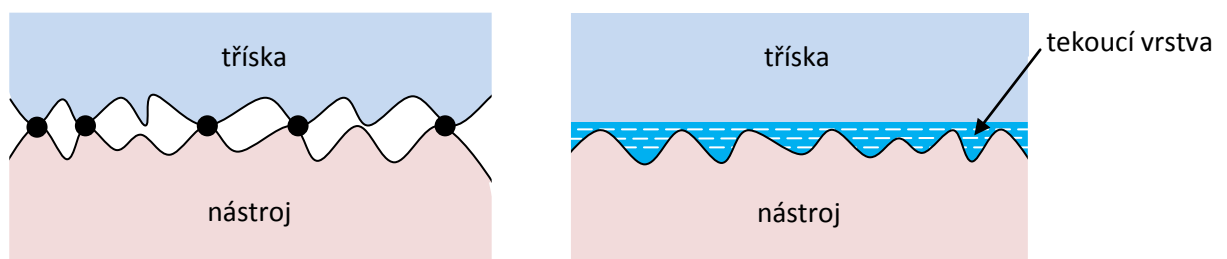


Obrázek 25 - Závislost měrného řezného odporu na posuvu [9]

Oblast sekundární plastické deformace vzniká na spodní straně třísky v místě styku s čelem nástroje. Je způsobena účinkem vysokých teplot, při kterých dochází ke ztrátě pevnosti obráběného materiálu. Charakter styku je buď bodový nebo plošný.

Bodový styk vzniká při menším mechanickém a tepelném zatížení obrobku při nižších řezných rychlostech. Dochází ke styku vrcholků mikronerovností ploch nástroje a obráběného materiálu.

Plošný styk vzniká při vyšších řezných podmínkách, zejména při vyšší řezné rychlosti, při které vzniká v místě řezu více tepla. Na spodní straně třísky v oblasti II. (obrázek 23) vzniká tekoucí vrstva, ve které se rychlost materiálu mění od nuly na čelní ploše nástroje až po rychlost odcházející třísky. Charakter styku má vliv na řadu jevů při obrábění. Bodový styk umožňuje vnik řezné kapaliny do oblasti styku a tím pádem snížení tření. Při vysokém měrném tlaku dochází v oblasti styku mikronerovností k adhezi. Vlivem pohybu třísky vůči nástroji se adhezní spojení přerušují a nastává buď přilnutí materiálu obrobku na nástroji (tvorba nárůstku) nebo přilnutí nástrojového materiálu na třísku (opotřebení nástroje).



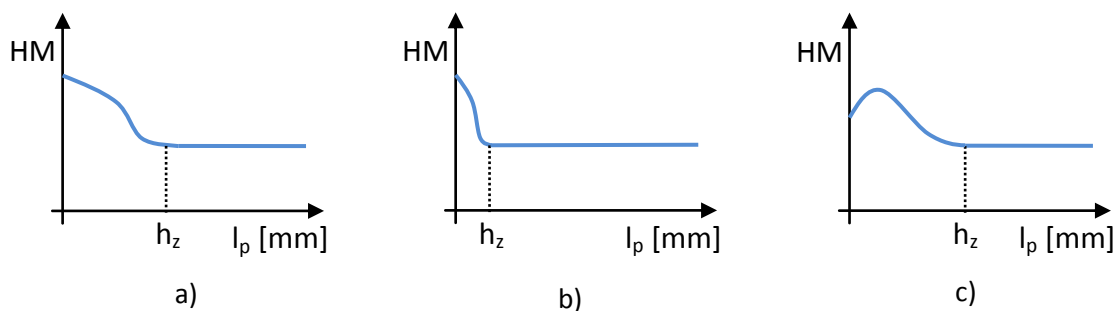
Obrázek 26 - Bodový (vlevo) a plošný styk (vpravo) nástroje a třísky [9]

V oblasti III. dochází k plastické a elastické deformaci materiálu. Mění se původní mechanické vlastnosti povrchové vrstvy. Jsou to především změny tvrdosti (mikrotvrdost HM) a zpevnění materiálu (hloubka zpevnění vrstvy h_z).

Mikrotvrdost je největší na povrchu a směrem do hloubky materiálu klesá. Pokud je přechod plynulý a pozvolný, je zpevněná vrstva dobře spojena s nezpevněným materiálem (obrázek 25a). Lze tak dosáhnout povrchu s lepšími vlastnostmi z hlediska jeho životnosti.

Pokud mikrotvrdost mezi povrchem a nezpevněnou vrstvou klesá rychle (obrázek 25b), hrozí odlupování této zpevněné vrstvy v provozu součásti, protože povrchová vrstva nepřilnula k nezpevněnému materiálu.

Může nastat i případ, kdy mikrotvrdost s hloubkou nejprve roste a potom klesá rychle (obrázek 25c) až na hodnotu tvrdosti obráběného materiálu mimo povrchovou vrstvu. Tento stav nastane v místech, kde byla překročena pevnost materiálu. Taková místa jsou charakteristická výskytem trhlinek na povrchu a životnost povrchu je velmi nízká.



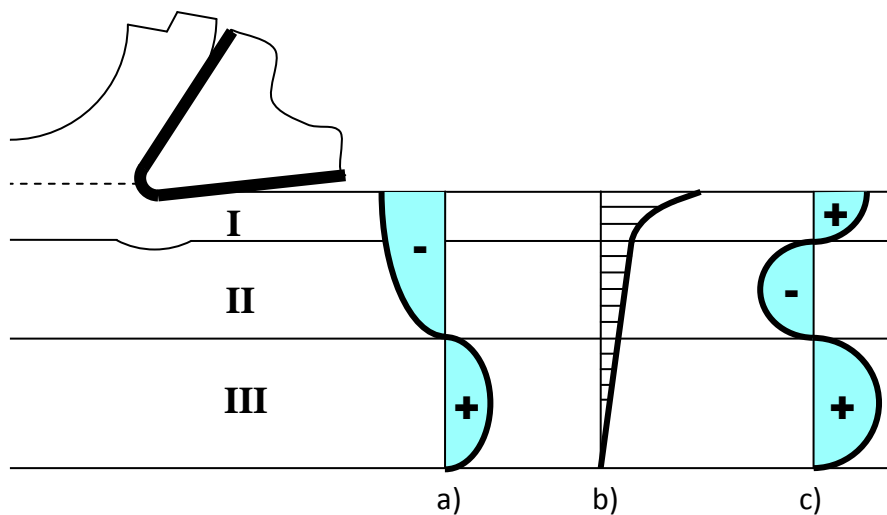
Obrázek 27 - Průběh mikrotvrdosti s rostoucí hloubkou obrobku (h_z – hloubka zpevnění, l_p – vzdálenost od povrchu) [9]

Zpevnění, jeho velikost a průběh, závisí na schopnosti materiálu zpevňovat se při deformaci a na pracovních podmínkách. Z řezných podmínek má největší vliv na zpevňování povrchové vrstvy řezná rychlost a tloušťka odřezávané vrstvy (resp. posuv). Z geometrie nástroje jsou to úhel řezu (úhel čela) úhel hřbetu a poloměr ostří. Zjednodušeně se dá říci, že zpevnění roste s touto vlastností materiálu a při podmínkách, při kterých se zvětšují oblasti primární a terciární deformace (viz obrázek 21).

Při namáhání povrchové vrstvy dochází k deformaci. Deformace vyvolává v povrchové vrstvě napětí, která jsou buď dočasná nebo trvalá. Dočasná jsou pouze reakcí na působení nástroje, po odlehčení zanikají (elastická deformace). Trvalá napětí se nazývají zbytková a vznikají po překročení meze kluzu materiálu vlivem působení nástroje (plastická deformace). Při obrábění vznikají zbytková pnutí v materiálu vlivem mechanického zatěžování a vlivem působení jak mechanického, tak tepelného zatěžování.

Pokud působí na povrchovou vrstvu pouze mechanické zatížení (obrázek 26a), dochází ve vrstvě I k plastické deformaci, ve vrstvě II k elastické deformaci a vrstva III již působením nástroje není nijak ovlivněna. Vrstva I je působením nástroje „natahována“. Po odlehčení v ní zůstává uložené napětí, na rozdíl od vrstvy II, kde působila pouze elastická deformace. V povrchové vrstvě je tedy převládající složkou napětí to tlakové. Tlakové napětí v povrchové vrstvě stlačuje stěny vad k sobě a brání tak jejich šíření, čili je ochranou proti únavě materiálu.

Pokud působí zároveň mechanické i tepelné namáhání (případy obrábění s velkým úhlem řezu δ – broušení) (obrázek 26c), dochází k prodloužení vrstvy I vlivem tepla i vlivem plastické deformace. Po odlehčení dojde k ochlazení vrstvy, a protože vrstva II nebyla účinkem tepla ovlivněna, zkrátí se méně než vrstva I. V povrchové vrstvě tedy převládá tahové napětí. Tahové napětí má tendenci otvírat povrchové vady, a proto je nežádoucí z hlediska únavové pevnosti.



Obrázek 28 - Průběhy zbytkového pnutí v povrchové vrstvě. a) Vliv mechanického zatěžování, b) průběh teploty, c) vliv mechanického a tepelného zatěžování [9]

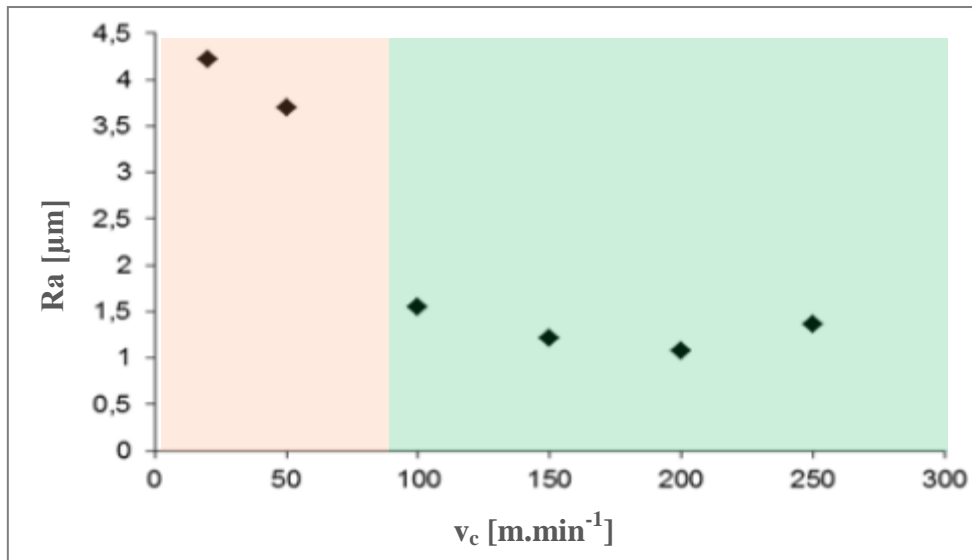
3.2 Tvorba nárůstku

Nárůstek je z hlediska kvality obrobené plochy nežádoucí jev. Vzniká ulpíváním obráběného materiálu na čele nástroje za předpokladu vysokého měrného tlaku v oblasti sekundární plastické deformace. Z pohledu trvanlivosti nástroje může mít nárůstek jak pozitivní, tak negativní vliv. Záleží, jestli je nárůstek stabilní nebo nestabilní a zda se jedná o hrubování nebo o dokončovací obrábění. U dokončovacích operací je nutné se tvorbě nárůstku vyhnout, jak stabilnímu, tak nestabilnímu, protože oba typy mají negativní dopady na výslednou kvalitu plochy. Stabilní nárůstek zvětšuje rozměry nástroje, nestabilní se po určitém čase utrhe a způsobuje skokové změny v drsnosti plochy (ulomená část odchází po čele s třískou a po hřbetě pod nástrojem) a zároveň se může vylomit i s částí nástrojového materiálu. Pravidelným ulamováním nárůstku může dojít i k rozkmitání soustavy. Naopak nárůstek lze považovat za kladný jev v případě hrubování, kdy tolik nezáleží na kvalitě obrobené plochy, ale na maximálním úběru a maximální trvanlivosti nástroje. V tomto případě nárůstek vytvoří novou geometrii a ta chrání břit. Při tvorbě nárůstku se doporučuje zvýšit rychlost. To má za následek natočení a zmenšení oblasti primární deformace a snížení tlaku v oblasti řezu. [4, 9, 12]

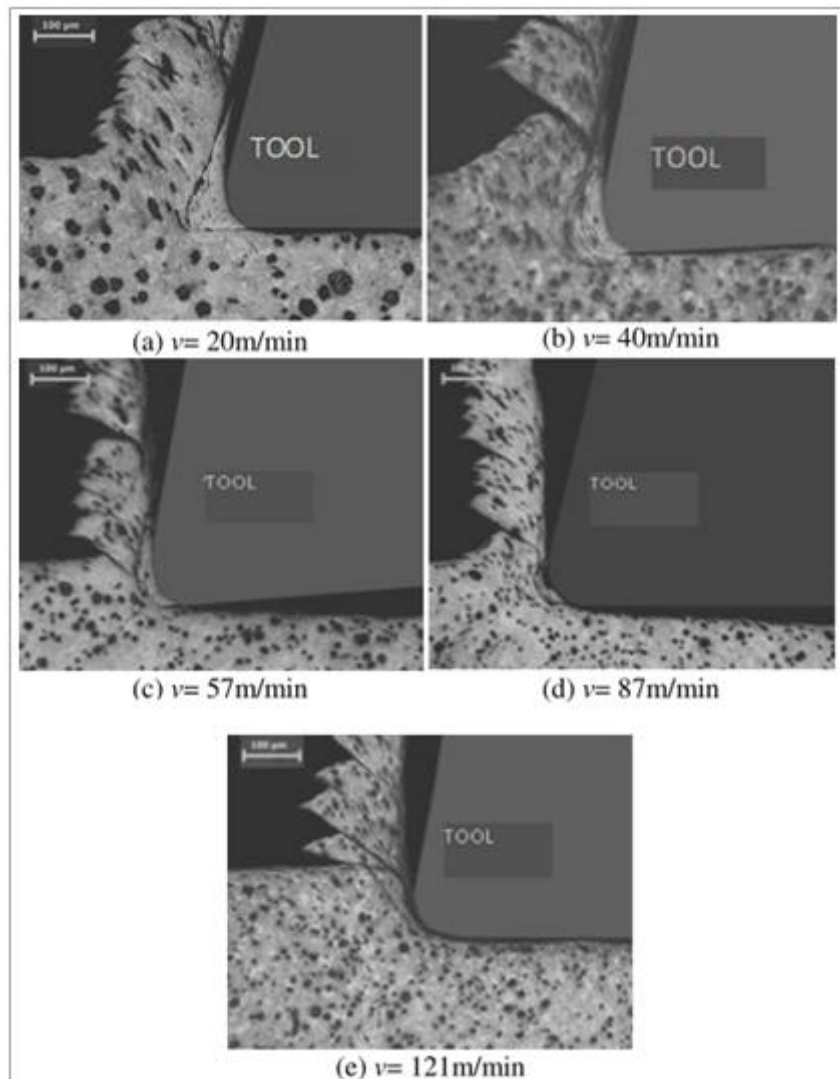


Obrázek 29 - Nárůstek na nástroji

Příklad zamezení vzniku nárůstku zvyšováním řezné rychlosti je uveden v článku The Effect of Build Up Edge Formation on the Machining Characteristics in Austempered Ferritic Ductile Iron [5]. Podmínky testu jsou podobné případu obrábění sacího ventilu (nizkouhliková ocel a nástroj ze SK). Účelem testu bylo zjistit, jaký má řezná rychlost vliv na tvorbu nárůstku a na kvalitu obrobené plochy. Z obrázku 21 je zřetelné, že při vyšších řezných rychlostech tvorba nárůstku ustává. Od hodnoty kolem $90 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ tvorba nárůstku ustává a při vyšších rychlostech se nárůstek už netvoří. [4,9]



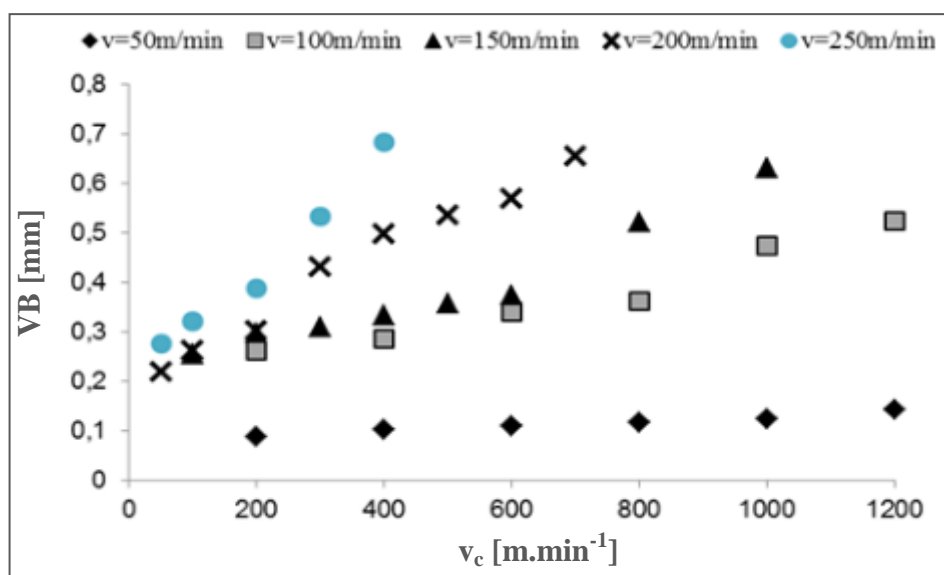
Obrázek 30 - Závislost drsnosti plochy na velikosti řezné rychlosti [12]



Obrázek 31 – Velikost nárůstu při obrábění různými rychlostmi [12]

Dále test potvrzuje, že při přibližování k hodnotě rychlosti, při které se přestává tvořit nárůstek, rychle klesá drsnost plochy. Z obrázku 31 je patrné, jak velký vliv na kvalitu plochy má tvorba nárůstku. Oranžová plocha je oblast, kdy se nárůstek tvoří, zelená plocha označuje interval rychlostí, při kterých se nárůstek netvoří. [12]

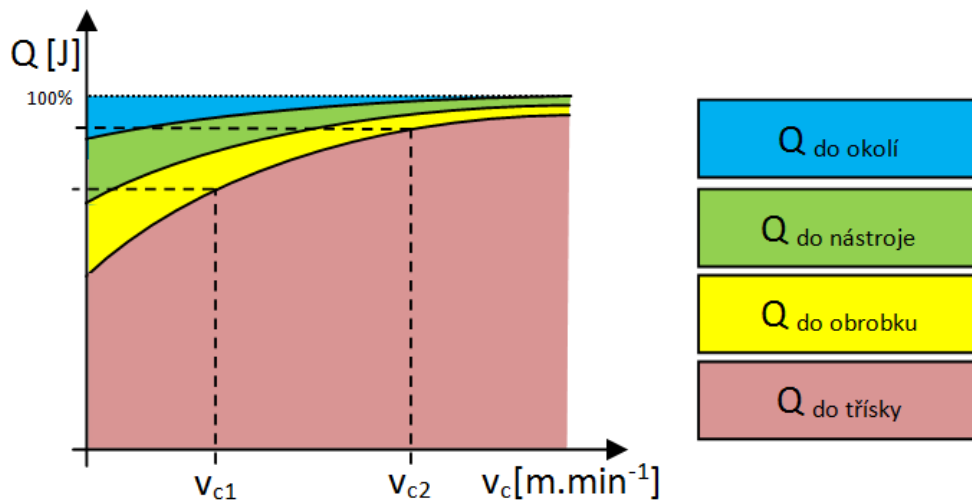
Prokázala se i obecná závislost zvyšující se velikosti opotřebení s rostoucí řeznou rychlostí (obrázek 32). Optimální řešení problematiky tvorby nárůstku je tedy třeba hledat v kompromisu mezi velikostí řezné rychlosti (resp. kvalitou plochy) a trvanlivostí nástroje. [4, 12]



Obrázek 32 - Velikost opotřebení na délce, resp. čase obrábění [12]

3.3 Tepelné jevy

Tvorbu třísky a její odchod z místa řezu doprovází vznik tepla. Teplo se tvoří v oblasti řezu a na celkové hodnotě tepla se podílí několik složek. Zdrojem jsou teplo vzniklé deformací materiálu v oblasti primární plastické deformace, teplo vzniklé v důsledku odvodu třísky z místa řezu, teplo vzniklé v důsledku tření obráběného materiálu a nástroje, teplo vzniklé elastickou deformací v oblasti tvoření třísky a teplo potřebné na porušení vazebných sil materiálu. Zdroje tepla musí být v rovnováze s teplem, které je odváděno. Teplo odchází z místa řezu pomocí třísky, nástrojem, obrobkem a okolím. Podíl těchto složek na celkovém odvedeném teple lze ovlivnit řeznou rychlostí. Z obrázku 32 je patrné, že se zvyšující se řeznou rychlostí roste podíl tepla, které se odvede třiskou. [5, 9]

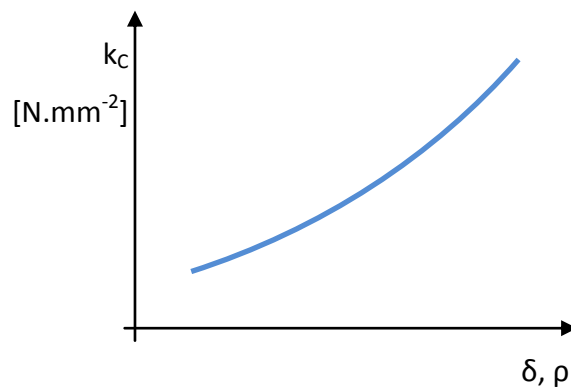


Obrázek 33 – Závislost podílu jednotlivých složek odvodu tepla na zvyšování řezné rychlosti [9]

Závislost z obrázku je významná především z hlediska přenosu tepla do nástroje a do obrobku. Snahou je odvést co nejvíce tepla třískou, přenos tepla do nástroje má negativní vliv na jeho vlastnosti a na trvanlivost. S rostoucí teplotou klesá jeho tvrdost a opotřebení se zrychluje. Teplo přenesené do obrobku se může projevit negativně z hlediska napětí v povrchové vrstvě, ve které způsobí tahová napětí. Tahové napětí v povrchové vrstvě je z pohledu integrity povrchu a únavové pevnosti výrobku nežádoucí jev, protože povrchové vady malých rozměrů, mající charakter vrubu, jsou působením tahového napětí otevírány, kdežto tlak má tendenci tyto vady uzavírat. [6, 9]

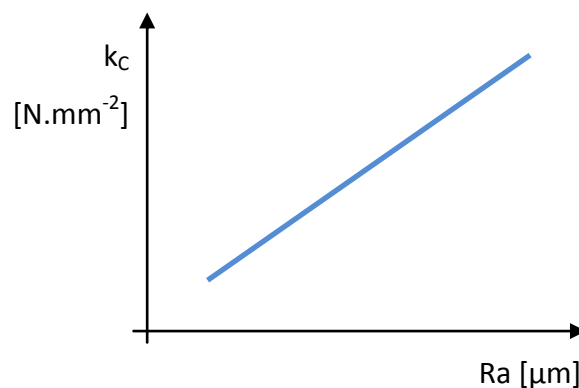
3.4 Vliv geometrie nástroje na řezný proces

Geometrie břitu rovněž ovlivňuje oblast primární deformace. Největší vliv má úhel řezu (δ), resp. úhel čela. Čím je tento úhel větší, tím víc se oblast primární deformace zvětšuje a natáčí směrem do obrobku. To způsobí nárůst měrného řezného odporu (obrázek 34), dojde ke zvýšení řezné rychlosti a jejího natočení do obrobku. Podobně ovlivňuje velikost a natočení oblasti primární deformace poloměr ostří (ρ). [9, 10]

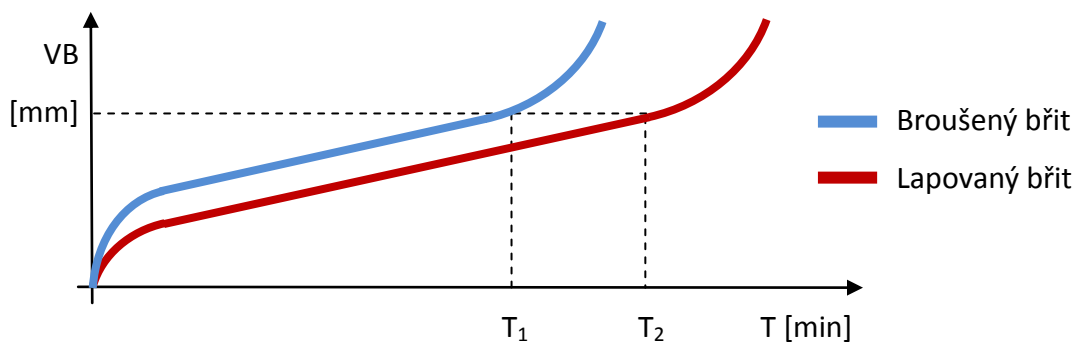


Obrázek 34 - Závislost měrného řezného odporu na úhlu řezu [9]

Ke zvyšování měrného řezného odporu dochází při rostoucím opotřebení břítu. S rostoucím opotřebením vzrůstá drsnost plochy a to má za následek zvětšení řezné síly. Po nasazení nového nástroje dochází v první fázi k intenzivnímu opotřebení na vrcholcích mikrone rovností čelní i hřbetní plochy. Lapováním břítu lze tuto fázi zkrátit. Závislost měrného řezného odporu na drsnosti řezných ploch je na obrázku 35. Obrázek 36 porovnává trvanlivost lapovaného a nelapovaného (pouze broušeného) břítu s totožnou geometrií. [9]



Obrázek 35 - Závislost měrného řezného odporu na drsnosti řezných ploch nástroje [9]



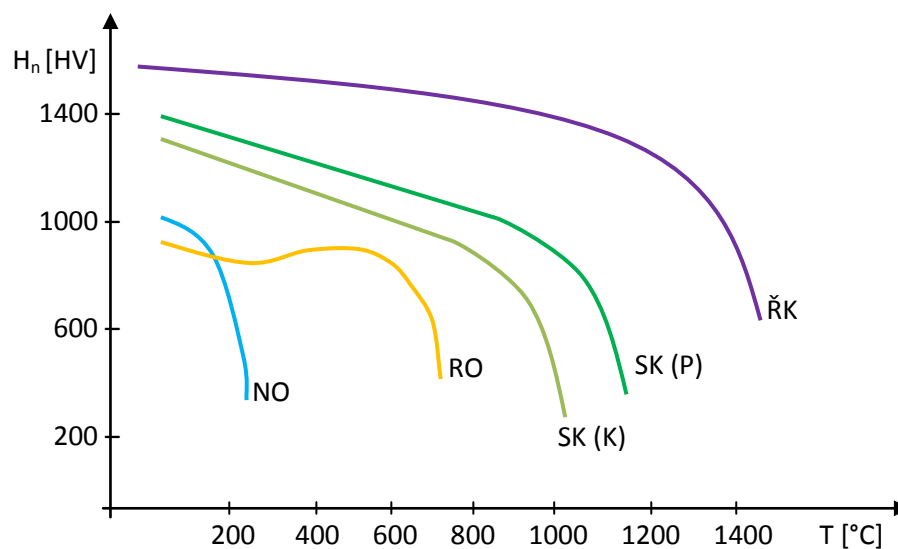
Obrázek 36 - Závislost opotřebení na trvanlivosti broušeného a lapovaného břítu [6]

3.5 Povlakování nástroje

Trvanlivost řezné části nástroje se zvyšuje povlakem. Povlak je tenká vrstva složená z velmi tvrdých částic, která má za úkol ochránit nástroj před abrazivními účinky před obráběním. Povlak rovněž snižuje tření mezi nástrojem a odcházející třískou a chrání tak nástroj před teplem vznikajícím při obrábění. Nejčastěji užívané metody povlakování nástrojů jsou metoda fyzikálního napařování (PVD) a chemická metoda (CVD). U nástrojů ze slinutých karbidů se využívá metoda CVD. Chemické napařování z plynné fáze probíhá za teploty 900°C – 1100°C. Tato metoda zajišťuje výbornou adhezi nanášeného povlaku k povrchu substrátu a lze jí nanést několik vrstev. Výhodou je rovnoměrná tloušťka povlaku na tvarově složitých předmětech, proto se hodí na kombinované nástroje. Nevýhodou metody jsou vysoké teploty, při kterých se povlak nanáší, protože hrozí riziko změny materiálové struktury substrátu. Na ostrých hranách je nanesená vrstva slabší. Nejčastěji používané povlaky jsou složeny z karbidových, nitridových a oxidických sloučenin. [11, 15]

3.6 Opotřebení nástroje

Opotřebení nástroje je běžný jev, kterému se nelze vyhnout, ale lze ho ovlivnit. Teplota a tlak v místě řezu, charakter styku obráběné plochy a nástroje či struktura materiálu jsou faktory, které mají na opotřebení vliv. Teplota se výrazně podílí na změně mechanických vlastností, především na tvrdosti. Vztah mezi poklesem tvrdosti při rostoucí teplotě znázorňuje obrázek 35 (NO – nástrojová ocel, RO – rychlořezná ocel, SK (K) – slinutý karbid typu K, SK (P) – slinutý karbid typu P, ŘK – řezná keramika). [5, 6, 16]

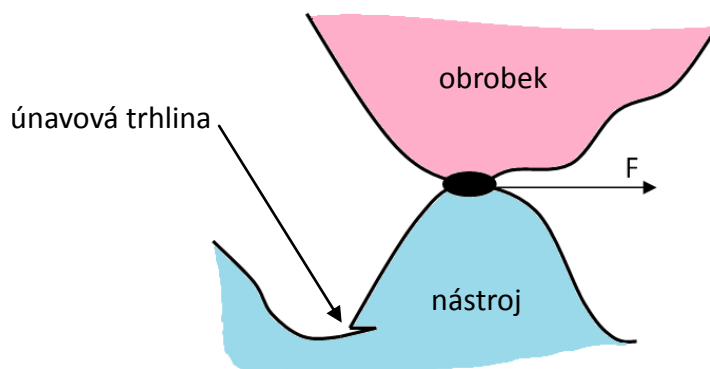


Obrázek 37 - Závislost tvrdosti řezných nástrojů na teplotě

Příčinou opotřebení jsou buď otěr, plastická deformace nebo křehký lom. Otěr lze dále podle působení teploty rozlišit na abrazivní, adhezní, difúzní a chemický. Podstatou abrazivního otěru je

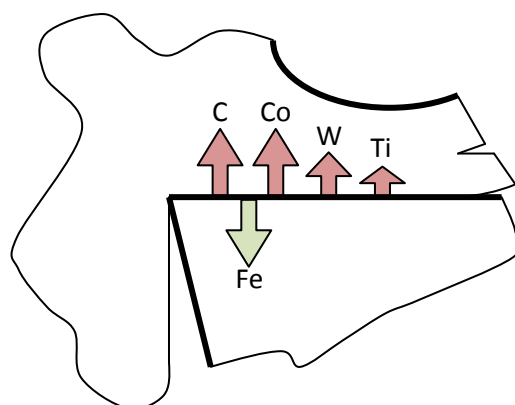
odbrušování měkčích částí tvrdšími. Výrazný účinek má tento jev u materiálů, které mají schopnost se při obrábění zpevňovat. Podobně je to se strukturou obráběného materiálu – lamelární struktura působí abrazivně více než například globulární struktura tvrdých složek. [9]

Vysoké tlaky a chemicky čisté a podobné povrchy v oblasti řezu vytváří podmínky pro adhezní otěr. Jak je patrné z obrázku 26 (vlevo), při bodovém styku dochází při pohybu nástroje a obrobku za vysokého tlaku k přilnutí nerovností obráběné plochy a nástroje. Pokud dochází k ulomení nerovnosti na nástroji, příčinou je únavový lom, jak je zobrazeno na obrázku 36. [9]



Obrázek 38 - Schéma adhezně-únavového opotřebení nástroje [9]

Dalším typem opotřebení je difúzní opotřebení. Podstatou je přestup hmoty nástroje do obrobku. Difúze se uplatňuje při vysokých teplotách řezání, zhruba od 680°C. Slinuté karbidy, řezná keramika, nitridoboridové a diamantové nástroje jsou náchylné na opotřebení difúzí, protože běžně pracují za vysokých teplot. Při nejnižších teplotách (680°C) začíná difundovat železo a kobalt, při vyšších teplotách (950°C) wolfram a titan teprve při 1050°C. Z toho plyne, že rychlořezné oceli se pomocí difúze neopotřebovávají a slinuté karbidy se složením WC + Co (typ K) jsou k difúznímu opotřebení náchylnější než slinuté karbidy se složením WC + TiC + Co (typ P). [7, 9]



Obrázek 39 - Směr a poměrná velikost difúze při obrábění za vysokých teplot [9]

Podstatou chemického otěru je snadné rozrušování defektních vrstev, které se vytvořily na stykových plochách. Tyto vrstvy vznikají v důsledku vzájemného působení materiálu nástroje, obrobku a řezné kapaliny, podléhají opotřebení dříve než základní materiál. Tyto vrstvy jsou na bázi sloučenin kyslíku, síry, křemíku a dalších. Chemické opotřebení se uplatňuje u všech druhů řezných materiálů. [7, 9]

Dalším zvýšením teploty lze dosáhnout tzv. limitní teploty řezání. Je to teplota charakteristická pro každý materiál tím, že při ní dojde k prudkému poklesu tvrdosti nástrojového materiálu. Zplastizovaná vrstva nástroje je odnášena společně s třískou. Proces vzniku a odchodu zplastizované vrstvy se nazývá lavinovité opotřebení, dochází ke ztrátě řezivosti nástroje a ten je v podstatě obroben obrobkem. [7, 9]

Dalším mechanismem opotřebení nástroje je křehký lom. Spočívá ve vzniku trhlin v povrchových vrstvách a ve vylomení části břitu. Trhliny mohou vznikat již při ostření nástroje při nevhodně zvolených podmínkách. Častější je vznik trhlin během řezného procesu. Trhliny jsou způsobeny v důsledku kolísání řezné síly, rázy přerušovaného řezu či zvětšením průřezu třísky. Následkem je zmenšení či úplná ztráta řezivosti nástroje, zvýšení řezných sil, příkonu stroje a zkrácení trvanlivosti nástroje. [7, 9]

Vzhledem k výše zmíněnému je opotřebení řezné části nástroje obvyklý jev, kterému nelze zcela zabránit, lze ho ale kontrolovat. Opotřebení musí být bezpečné, kontrolovatelné a předvídatelné, aby se zabránilo poškození stroje, nástroje, obrobku či úrazu obsluhy. Dle De Vose [5] jsou takové případy opotřebení otěr na hřbetu, výmol na čele, vrub na ostří a plastická deformace.

Otěr na hřbetu je žádoucí druh opotřebení, protože je předvídatelný. Hlavní příčinou vzniku otěru na hřbetu je abraze tvrdých vměstků a mikročástic. Kobaltové pojivo u slinutých karbidů povoluje a karbidová zrna se vylamují. Opotřebení hřbetu se projeví rovnoměrně po celé délce ostří. Otěr na hřbetu se po čase vyskytne u všech nástrojových materiálů a pokud se jiný druh opotřebení neprojeví dřív, znamená to konec trvanlivosti břitu. V případě, že se otěr objeví příliš krátce po výměně nástroje, doporučuje se snížit řeznou rychlost, zvýšit posuv, použít účinnější chlazení a v případě VBD zvolit destičku jiné třídy karbidu (tvrdší) s otěruvzdornějším povlakem. [5, 16]



Obrázek 40 – Opotřebení hřbetní plochy nástroje otěrem [5]

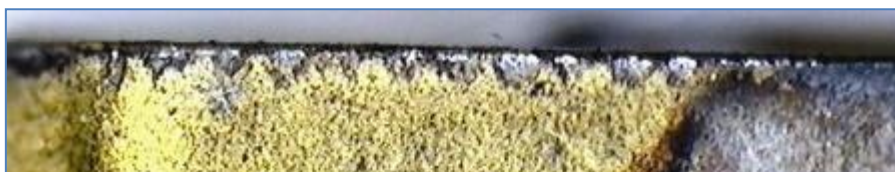
Výmol na čele vzniká kombinací difúze, porušení struktury a abrazivního působení odcházející třísky. Vzniklé teplo uvolňuje zrna karbidu na čele v místech, kudy odchází tříska. Výmol může být někdy tak velký, že způsobí vydrolování či příliš rychlý otěr na ostří nástroje. V počáteční fázi vzniku výmolů může paradoxně dojít ke zlepšení utváření třísky, protože vzniklý výmol plní funkci utvařeče třísky. S tímto druhem opotřebení se setkáme nejčastěji u oceli, abrazivních materiálů a titanových slitin. Zmírnit tvorbu výmolů lze použitím břitů povlakovaných silnou vrstvou oxidu hliníku, které odolávají vymílání zrn. Dále se doporučuje použít chlazení, snížit řeznou rychlost a posuv. [5, 16]



Obrázek 41 - Výmol na čelní ploše VBD [5]

Degradaci povrchové vrstvy nástroje způsobuje i nárůstek, princip byl popsán v kapitole 3.2. Tvorbě nárůstku lze předejít snížením drsnosti čelní plochy povlakem, případně dalším zpracováním, např. leštěním čela. Zvýšení rychlosti či posuvu rovněž snižuje adhezi materiálu na styku nástroje s obrobkem.[5]

Vyštipování břitu způsobuje mechanická nestabilita – vibrace obrobku a stroje, házení nástroje vlivem nepřesného upnutí či neseřízení. Tvrdé vměšky na povrchu obráběného materiálu a přerušovaný řez mají za následek lokální koncentraci napětí, kvůli kterému dochází k vyštipování břitu. Tento druh opotřebení lze očekávat u materiálů z práškových kovů a kompozitů. Pokud je zajištěna co nejvyšší tuhost soustavy stroj – nástroj – obrobek a minimalizujeme ohýbání nástrojů, tzn. zkrátí se vyložení nástroje a zvolí se houževnatější třída řezného materiálu, sníží se riziko vzniku vyštipování části břitu. [5, 16]



Obrázek 42 - opotřebení způsobené vyštipováním břitu [5]

Plastická deformace břitu vzniká při vysokém tepelném zatížení nástroje. Vysoká teplota společně s mechanickým zatížením způsobí měknutí kobaltového pojiva. Dojde k pohybu řezné hrany vůči původní poloze a nástroj je nevhodný, protože změní rozměr obrobku a kvalitu povrchu. Toto opotřebení lze s vysokou pravděpodobností očekávat u operací prováděných za vysokých teplot – při vysoké řezné rychlosti, dlouhých dobách nástroje v řezu, či kombinací vysoké řezné rychlosti a velkých posuvů. Vyskytuje se u obrábění kalených ocelí a titanových slitin. Snížit riziko vzniku plastické deformace lze použitím účinného chlazení, snížením řezné rychlosti a posuvu, použitím povlaků ke snížení tření a tvrdším a otěruvzdornějším materiálem. [5, 16]



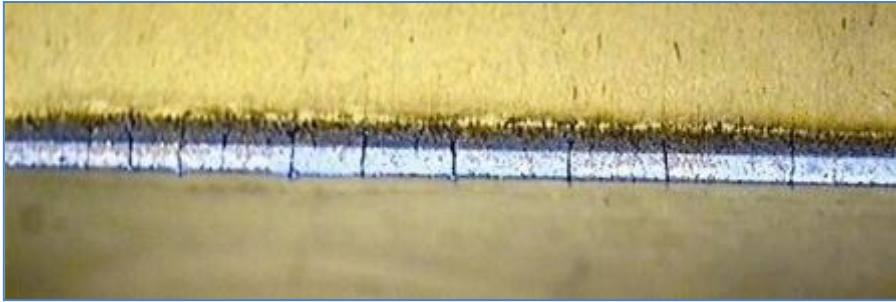
Obrázek 43 – Plastická deformace břitu [5]

Vrub na ostří vzniká tím, že materiál obrobku je tvrdší a abrazivnější než materiál v jádře. To lze pozorovat u materiálů s tvrdou povrchovou vrstvou, jako jsou výkovky a odlitky, nebo u materiálů, u kterých dochází ke zpevnění povrchové vrstvy při obrábění (titanové slitiny, nerezové slitiny, vysokoteplotní slitiny). Vzniku vrubu napomáhá i lokální koncentrace zatížení břitu. Možná opatření proti vzniku tohoto opatření jsou snížení posuvu a změna hloubky řezu při vícenásobných úběrech. U vysokoteplotních slitin lze zvýšit rychlost, ale tato změna zvýší otěr na hřbetu nástroje. Prospěje i volba houževnatějšího nástrojového materiálu a povlakovaný břit nástroje. [5, 16]



Obrázek 44 – Vrub na ostří

Tepelné hřebenové trhliny vznikají kombinací tepelných rázů (rychlé změny teploty způsobené působením břitu v a mimo obrobek) a rozdíly v teplotách mezi chladnými a teplými zónami v nástroji. Toto opotřebení se projevuje po celé využívané délce břitu. Objevuje se v případech přerušovaných řezů, tedy při frézování či přerušovaném soustružení. Při těchto operacích je třeba počítat s brzkým vznikem tohoto druhu opotřebení. Pokud se objeví, břit se začne vydrolovat a na změny, které by vedly k prodloužení životnosti, je již pozdě. Toto opotřebení je důsledkem vysokých teplot v oblasti řezu. Proto je nutné zvolit takovou strategii obrábění, při které vzniká méně tepla, nebo je z oblasti řezu efektivně odváděno. Lehce řezající geometrie nástroje omezí vznik tepla a chlazení zajistí odvod tepla ohřevem procesní kapaliny i vyplavováním horkých třísek z místa řezu. Vznik tepla je úměrný velikosti řezné rychlosti, její snížení pomůže předcházet tomuto opotřebení. Další žádoucí změnou je volba jiné metody obrábění, takové, při které se sníží poměr časů v/mimo záběr. [5, 16]



Obrázek 45 - Hřebenové trhliny na ostří nástroje [5]

K vylamování ostří nedochází v porovnání s předchozími typy opotřebení často. Je zaměnitelné s vrubem na ostří. Projeví se na nevyužívané části ostří a způsobí ho tříška, která se krouťí právě do části břitu, která při řezu nezabírá. Toto opotřebení se může objevit vždy, nejčastěji vzniká při operacích s kombinací vysokých posuvů a velkých hloubek řezu. Zabránit tomuto druhu poškození nástroje lze změnou tvaru třísek, resp. změnou geometrie nástroje. [5, 16]



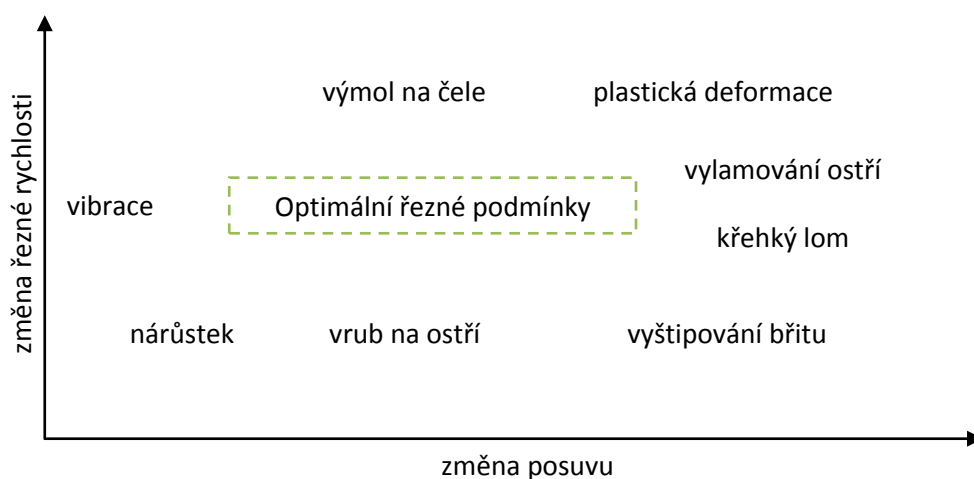
Obrázek 46 - Poškození neřezné části nástroje působením třísky [5]

Vylomení části břitu je popsáno výše. V tomto případě opotřebení je třeba volit houževnatější materiál destičky, volit geometrii pro vyšší posuvy nebo zvolit destičku s dostatečnou výškou či masivnější nástroj. Doporučuje se snížit posuv a hloubku řezu, zkontrolovat tuhost soustavy či strukturu obrobku, neboť tvrdé vměstky zvyšují rázové namáhání nástroje, které k tomuto druhu opotřebení vede. [5, 16]



Obrázek 47 - Opotřebení břitu křehkým lomem [5]

Výše zmíněná opotřebení se dají pozorovat přímo na nástroji. Indikátorem ale nemusí být jen břit nástroje a povrch obrobku. Při vzniku opotřebení se mění geometrie nástroje a tato změna se projeví vyšší spotřebou energie. Dalším projevem vzniku opotřebení je nadměrný hluk a vibrace soustavy. Sledovat lze i změnu tvaru třísky. Obrázek 46 znázorňuje pravděpodobný výskyt opotřebení při odchylce řezné rychlosti a posuvu od optimálních řezných podmínek.



Obrázek 48 - Náchylnost břitu k různým druhům opotřebení při změně řezných parametrů 5[]

3.7 Vibrace nástroje

Řezná síla při obrábění neustále kolísá, přestože to není pozorovatelné. Okamžitá velikost řezné síly se pohybuje kolem střední hodnoty řezné síly. Kolísání velikosti síly je způsobeno záběrovými podmínkami při obrábění, jako je nehomogenita obráběného materiálu, odlišná geometrie na jednotlivých břitech v důsledku jejich opotřebenění apod. Existují dva druhy kmitání - vynucené a samobuzené. Vynucené i samobuzené kmitání je nežádoucí jev a cílem každého obráběcího procesu je zajištění stability. Chvění nástroje či obrobku vede k zvýšení dynamických účinků na soustavu stroj – nástroj – obrobek a může vést k destrukci článků této soustavy, ke snížení trvanlivosti nástroje či k nekvalitní ploše se stopami po vibrujícím nástroji. [9, 17]

Kmitání může být vynucené buď silou, která nesouvisí s řezným procesem, nebo silou, která s řezným procesem souvisí. K stabilizaci kmitání vyvolaného silou související s řezným procesem se doporučuje obrábět mimo rezonanční oblasti obráběcí soustavy. V případě, že nejsou známy frekvenční charakteristiky, se doporučuje hledat řešení změnou otáček. [9]

Kmitání, jehož budící síla nesouvisí s řezným procesem, může být způsobeno několika případy. Buď je přenášeno přes základy stroje, nebo silami, které vznikají při rotaci nevyvážených součástí, dále v důsledku nepřesnosti převodových mechanismů, nebo přímočarým vratným pohybem částí obráběcího stroje. Při frézování může být kmitání vynuceno periodickým záběrem zubů současně v a mimo řez. Pokud se frekvence budící síly přiblíží vlastní frekvenci obráběcí soustavy, dojde k rozkmitání nástroje.[9]

Dalším případem je kmitání samobuzené. Toto kmitání je oproti vynucenému nebezpečnější, protože se často vyskytuje neočekávaně. Vznik tohoto typu kmitání se vysvětluje několika mechanismy. Jsou to relativní pohyb nástroje vůči obrobku, proměnlivý koeficient tření s různou řeznou rychlostí, nestabilita nárůstku a skluz materiálu na hranici primární plastické deformace. [9,17]

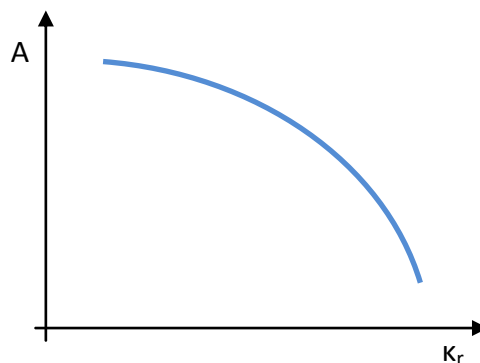
Vznik samobuzeného kmitání se vysvětluje následujícími mechanismy. Jsou to relativní pohyb nástroje vůči obrobku, proměnlivý koeficient tření, nestabilní nárůstek a skluz materiálu po hranici oblasti primární plastické deformace.

Vlivem kolísání hodnoty řezné síly dochází k vychylování nástroje vůči obrobku. Pro uklidnění těchto výkyvů je třeba mít v soustavě prvek, který kmitání tlumí. Pokud by k útlumu nedocházelo, amplituda kmitání by měla tendenci se neustále zvětšovat. [9]

Principem vzniku kmitů následkem změny třecího koeficientu je jeho proměnlivost s rychlostí. Při nízké rychlosti je koeficient tření vyšší, při zvyšování rychlosti tření klesá. Osciluje-li hodnota síly, proměnlivý koeficient tření způsobuje výkyvy nástroje proti obrobku. [9]

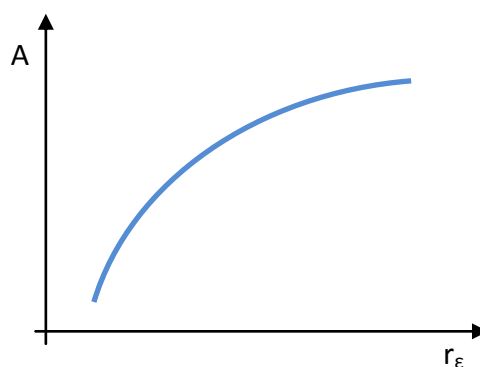
V případech, kdy dochází k tvorbě nestabilního nárůstku, dochází zároveň k jeho pravidelnému rozpadu. Pokud je frekvence rozpadu podobná některé frekvenci soustavy stroj – nástroj – obrobek, může dojít k rozkmitání soustavy. Vznik kmitání lze potlačit několika způsoby, především geometrií řezného nástroje. [9]

Úhel nastavení břítu (κ_r) má významný vliv na intenzitu samobuzeného kmitání. Čím větší úhel κ_r , tím větší je složka radiální síly F_p , která působí ve směru malé tuhosti soustavy stroj – nástroj – obrobek. Úhel nastavení nemá výraznější vliv na trvanlivost nástroje, pokud se kmitání objeví, je změna úhlu κ_r žádoucím opatřením. [9]



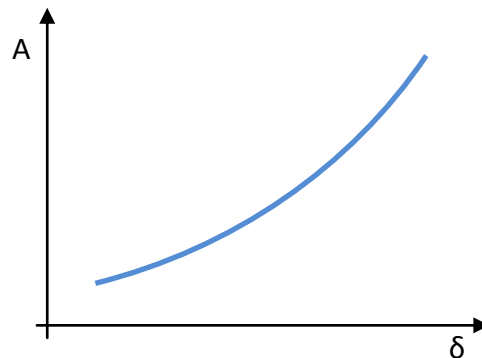
Obrázek 49 - Závislost amplitudy samobuzeného kmitání na úhlu nastavení [9]

Poloměr špičky (r_ϵ) má na stabilitu obrábění opačný vliv. Poloměr špičky souvisí s velikostí úhlu nastavení. Se zvětšujícím se poloměrem špičky se střední hodnota úhlu nastavení zmenšuje. Poloměr špičky má na samobuzené kmitání menší vliv než úhel nastavení. Menší r_ϵ znamená horší odvádění tepla z místa řezu a tím se snižuje trvanlivost břítu. [9]



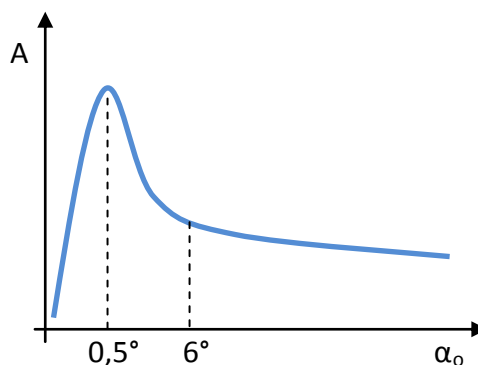
Obrázek 50 - Závislost amplitudy samobuzeného kmitání na poloměru špičky [9]

V kapitole 3.4 bylo zmíněno, že úhel řezu, resp. úhel čela, má vliv na velikost řezné síly. Úhel řezu má podobný účinek i na vznik kmitání, protože se s rostoucí řeznou silou zvyšuje i radiální složka F_p . Snížení hodnoty úhlu řezu znamená vyšší stabilitu obrábění, jak je naznačeno na obrázku 51. Pokud by vlivem snižování úhlu řezu došlo k ohrožení pevnosti břitu, lze tento problém řešit vytvořením fazetky na ostří. Tato fazetka zvýší pevnost břitu, přičemž na velikost řezné síly má vznik samobuzeného kmitání zanedbatelný vliv. [9]



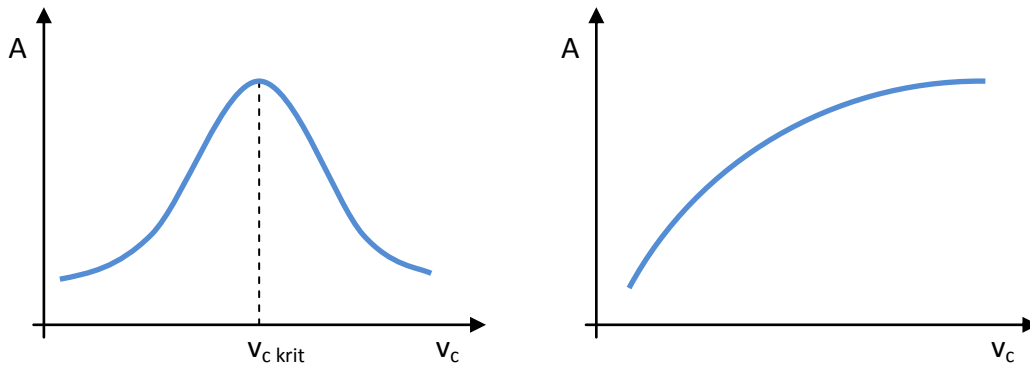
Obrázek 51 - Závislost amplitudy (vlevo) a hloubky třísky (vpravo) na úhlu řezu, resp. úhlu čela [9]

Úhel hřbetu ovlivňuje intenzitu samobuzeného kmitání zhruba do 6° . Do hodnoty $0,5^\circ$ roste, poté rychle klesá a od 6° je vliv velikosti úhlu hřbetu na vznik samobuzených kmitů zanedbatelný.



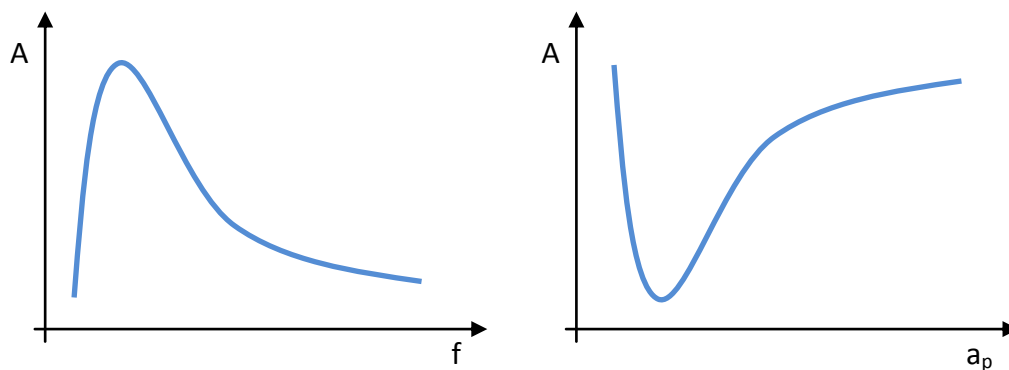
Obrázek 52 - Závislost amplitudy samobuzeného kmitání na úhlu hřbetu [9]

Řezná rychlost má kritickou hodnotu (pokud kmity nevznikají důsledkem klesající závislosti koeficientu tření na rychlosti pohybu – obrázek 51 vlevo), při které je náchylnost ke vzniku samobuzeného kmitání nejvyšší. Řezná rychlost má destabilizující vliv v případě, kdy samobuzené kmitání vzniká důsledkem klesající závislosti koeficientu tření na relativní rychlosti pohybu členů soustavy stroj – nástroj – obrobek (obrázek 51 vpravo). [9]



Obrázek 53 - Závislost amplitudy samobuzeného kmitání na řezné rychlosti [9]

Posuv má velmi podobný vliv na samobuzené kmity jako úhel hřbetu. Do malých hodnot prudce roste, poté klesá a má na vibrace nástroje stabilizující účinek. Hloubka řezu (resp. šířka odřezávané vrstvy) má průběh závislosti opačný. [9]



Obrázek 54 - Závislost amplitudy samobuzeného kmitání na posuvu (vlevo) a hloubce třísky (vpravo) [9]

Pokud se samobuzené kmitání soustavy objeví, je třeba ho eliminovat. Možnosti, vycházející ze závislostí zmíněných výše, jsou následující. Dá se změnit geometrie břitu, řezné podmínky, použít řezné prostředí s vyšším mazacím účinkem pro snížení koeficientu tření, změnit smysl otáčení nástroje, nebo použít tlumičů kmitání.

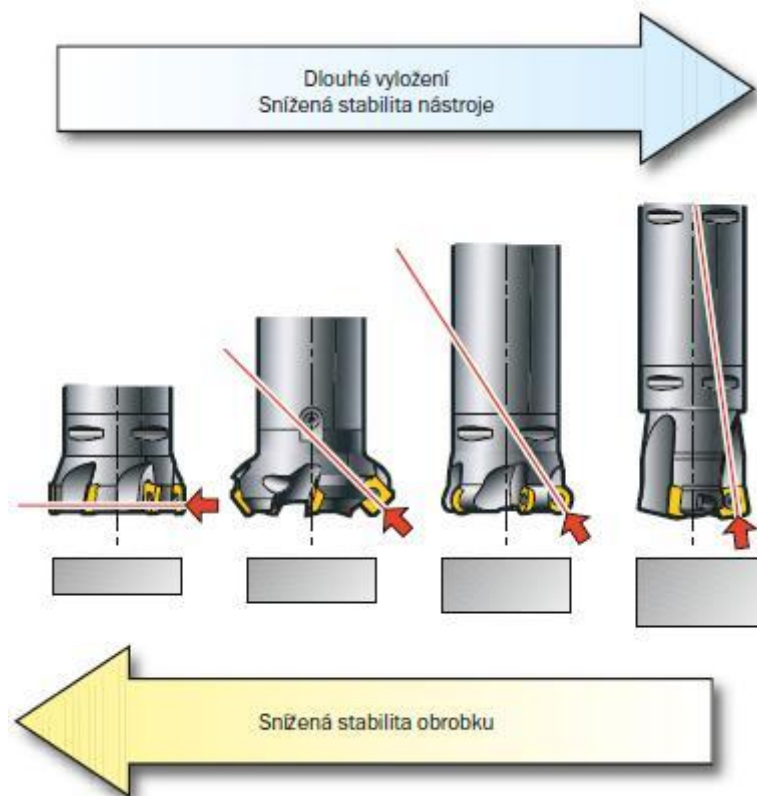
3.7.1 Eliminace kmitání dle doporučení výrobců nástrojů

Výrobci nástrojů nabízí systémy a poradenské služby pro eliminaci vibrací při obrábění.

Nabízí řešení změnou obráběcího nástroje, jeho upnutí, systému ve stroji i ve strategiích obrábění. Jelikož je v praktické části řešeno kmitání při frézování, v následujícím textu bude popsána pouze tato problematika.

Společnost Sandvik Coromant doporučuje následující opatření.

Zásadní je směr působení reakční síly proti radiální síle F_p . Červená čára na obrázku značí směr této síly. Směr této síly, resp. úhel nastavení κ_r ovlivňuje i tloušťku odřezávané vrstvy. Čím je složka radiální síly menší, tím větší může být odřezávaná hloubka při zachování stability obrábění. Zvláštní pozornost je třeba věnovat nástrojům s velkým poloměrem ostří (kruhové VBD), u kterých je výsledný úhel nastavení závislý na hloubce třísky. [13]

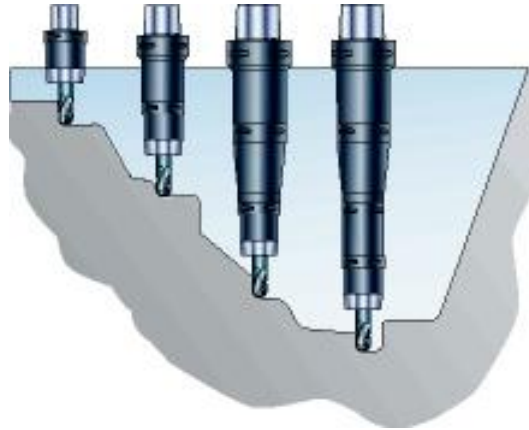


Obrázek 55 – Vliv úhlu nastavení κ_r na stabilitu obrábění a tloušťku odřezávané vrstvy [13]

Obecnou zásadou je co nejkratší vyložení nástroje a malý průměr frézy (průměr nástroje alespoň o 20 – 50% větší než šířka odřezávané třísky). Dalším opatřením je volit nepravidelnou rozteč zubů frézy kvůli možnému vzniku vibrací pravidelným záběrem zubů v a mimo řez. [13]

Existují i speciální upínací a prodlužovací systémy, které tlumí vibrace i při velkém vyložení. Pravidlem je použití co nejvíce houževnaté sestavy. To znamená co nejkratší vyložení a co největší možný průměr prodlužovacích nástavců. Zároveň je doporučeno pro práci ve velkých hloubkách přidávat

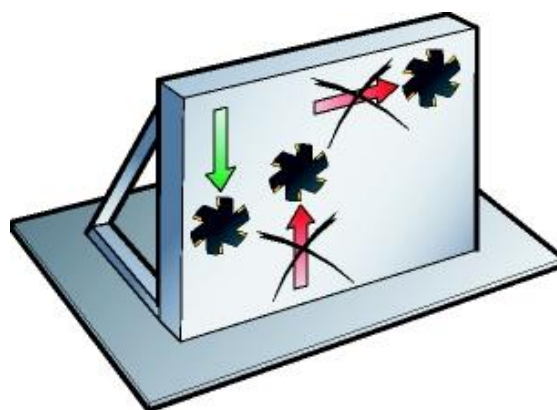
nástavce až v okamžiku, kdy současná sestava nedosáhne na požadovaný rozměr. Při vyšším poměru průměru frézy k délce vyložení ($4 \cdot D$) existují nástavce se zabudovanými tlumiči. [13]



Obrázek 56 - Postupné prodlužování nástroje pro obrábění ve velkých hloubkách [13]

Z hlediska vibrační buzení vlivem obráběcího stroje se doporučuje zmapovat, při jakých podmínkách má stroj tendenci k buzení vibrací. Bezpečná pásma se nazývají pásy stability. Pokud k vibracím dojde, lze i velmi malou úpravou otáček (o 50 min^{-1}), resp. řezné rychlosti, dosáhnout změny procesu na stabilní. Úpravou strategie lze rovněž dosáhnout eliminace vibrací. [13]

Nájezdy drah se doporučuje volit ve směru k místu upnutí. Pokud se obrábí tenké stěny, mělo by se obrábění stran stěn střídat a hloubky by se měly překrývat kvůli zajištění vyšší tuhosti obrobku. [13]



Obrázek 57 – Doporučený směr drah nástroje [13]

Společnost Seco tools nabízí podobný servis, vycházející z aplikace znalostí popsaných v kapitole 3.7. Pro frézování nabízí držáky s technologií dynamického tlumení vibrací. Tato technologie spočívá buď v rozkmitání cizího tělesa s opačnou fází, čímž dojde k utlumení vibrací, nebo v tlumení pomocí speciální hmoty. Technologie je nazvána Steadyline a tlumení vibrací je znázorněno na obrázku 56. [14]



Obrázek 58 – Držák bez tlumící technologie (vlevo), s tlumičem vibrací (vpravo) [14]

4. Návrhy na zlepšení a jejich vyhodnocení

4.1 Plocha odlehčení sacího ventilu

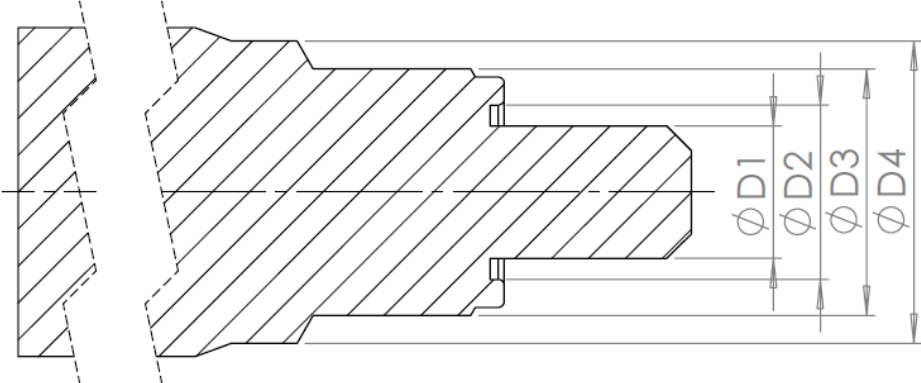
4.1.1 Návrh 1.1 - Zvyšování řezné rychlosti

ODŮVODNĚNÍ ZMĚNY

Problémy se zmetkovou produkcí. V několika případech nebyla dodržena předepsaná kvalita povrchu dle výkresové dokumentace. Jako příčina byl určen vznik nárůstku na průměru nástroje, který dokončuje plochu odlehčení sacího ventilu. Zvýšení drsnosti plochy je působeno hlubokými rýhami. Nárůstek je patrně nestabilní, protože rýhy v povrchu jsou náhle přerušeny.

Snahou návrhu je odstranit výše zmíněné problémy změnou řezných podmínek. Nárůstek se tvoří na čele nástroje v místě, kde je zvýšený tlak a dochází zde k bodovému styku mikronerovností mezi nástrojem a obrobkem. Zvýšení řezné rychlosti je předpoklad ke změně charakteru styku na plošný. Dalším úkolem je najít znaky na plochách, podle kterých by bylo možné rozlišit zmetkové kusy, aby je bylo možné uvést v katalogu hraničních vzorků. Tyto katalogy používá obsluha stanice a podle katalogů by bylo možné vyměnit nástroj, pokud by se kvalita ploch náhle zmenšila.

APLIKACE:	Obrábění otvoru sacího ventilu na čisto kombinovaným nástrojem
STROJ:	Grob BZ 550
NÁSTROJ:	T5062



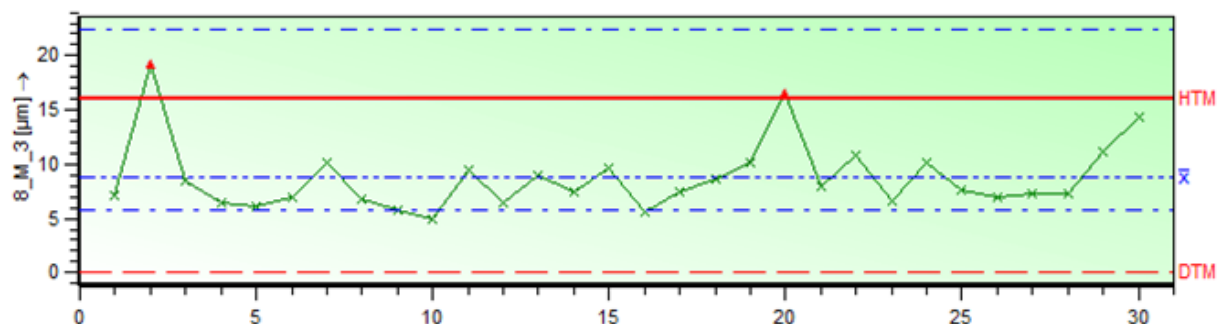
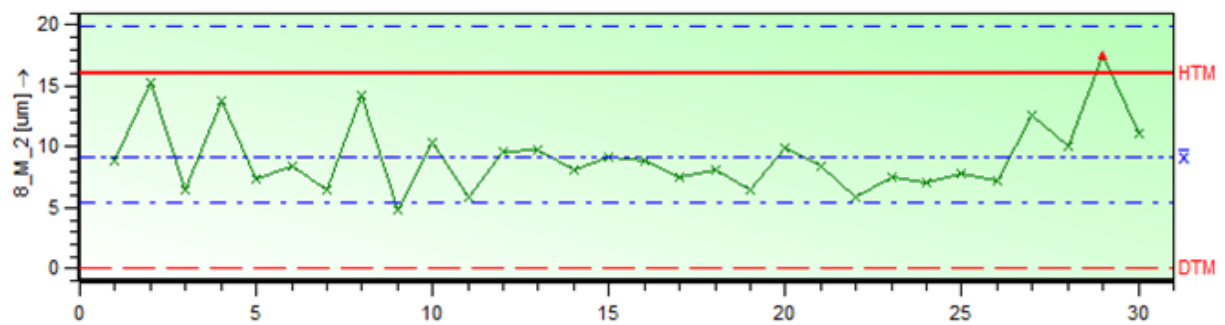
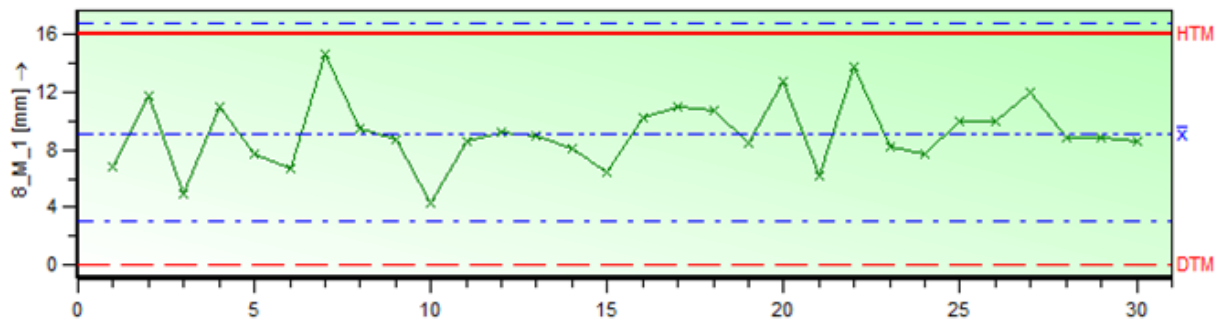
Obrázek 59 - Schéma nástroje T5062 [2]

ŘEZNÉ PARAMETRY				
n [min ⁻¹]	3300	v_c [m.min ⁻¹]	ØD ₁	83,3
f [m.min ⁻¹]	220		ØD ₂	109,8
provozní kapaliny	olej + voda		ØD ₃	155,4
			ØD ₄	186,5

VYHODNOCENÍ

Kusy nad Pt_{\max}	\bar{x}_{Pt1} [μm]	\bar{x}_{Pt2} [μm]	\bar{x}_{Pt3} [μm]	\bar{x}_{PtCelk} [μm]
3	9,13	9,12	8,75	9,00

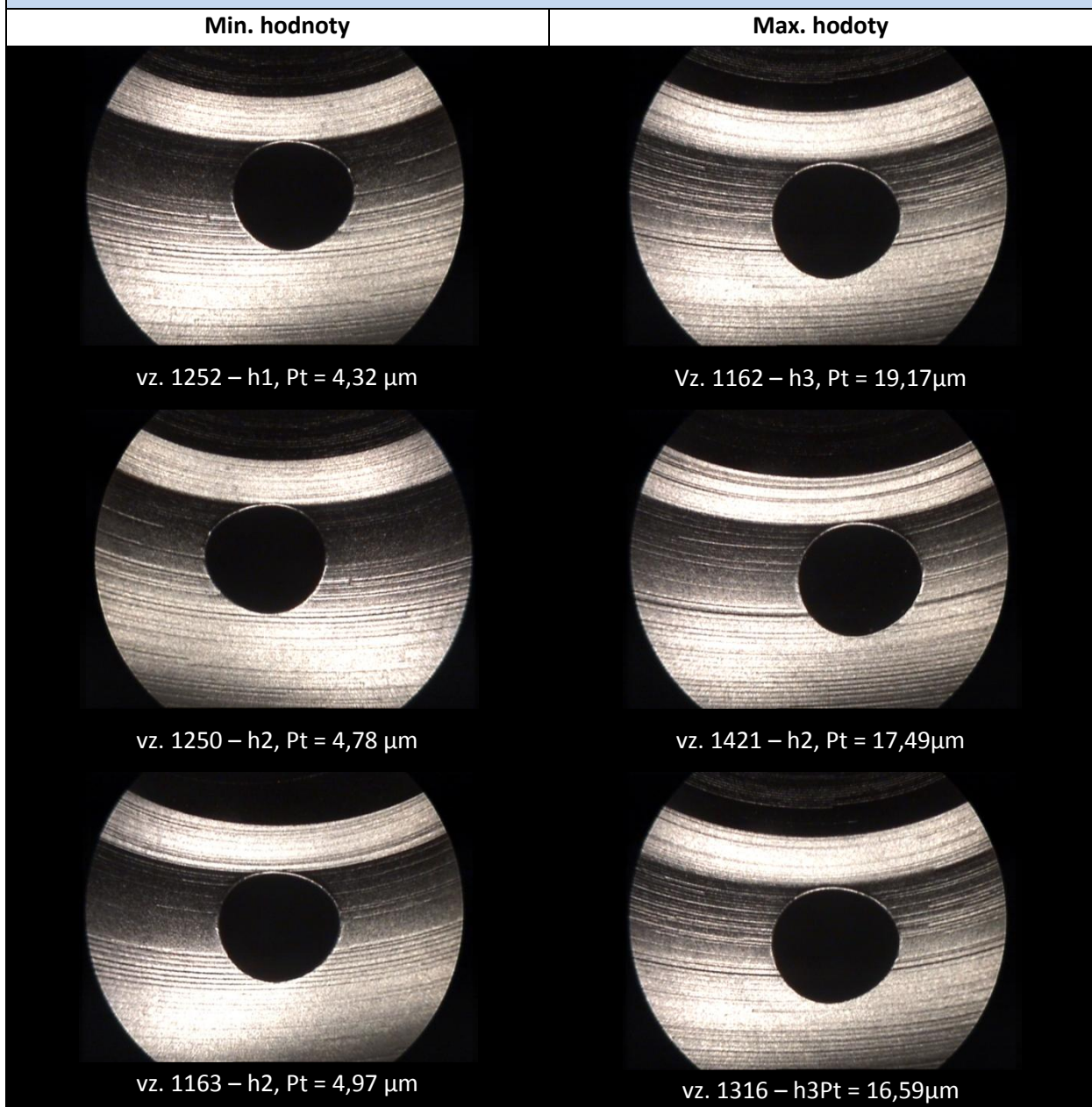
ZÁZNAM Z PROTOKOLU MĚŘENÍ



ZÁVĚR

Cílem experimentu bylo zjistit, zda zvýšená řezná rychlost bude mít pozitivní vliv na problematiku s tvořícím se nárůstkem. V záznamu z měření profilu se vyskytují tři hodnoty nad povolenou hodnotu drsnosti. Tento první test poslouží jako srovnávací s následujícími, u kterých se bude postupně navyšovat řezná rychlost. Zvýšení rychlosti bylo z hlediska trvanlivosti nástroje přípustné, nástroj vyrobil potřebný počet kusů (dokončení trvanlivosti v sériové výrobě), aniž by došlo k poškození, které by ovlivnilo budoucí využití nástroje (pozn.: fotografie ploch z testů ve vyšším rozlišení k nahlédnutí v elektronické příloze).

FOTOGRAFICKÁ DOKUMENTACE



Obrázek 63 - Fotografie ploch odlehčení SV po provedení návrhu 1.1 [2]

4.1.2 Návrh 1.2 – Zvyšování řezné rychlosti

ODŮVODNĚNÍ ZMĚNY

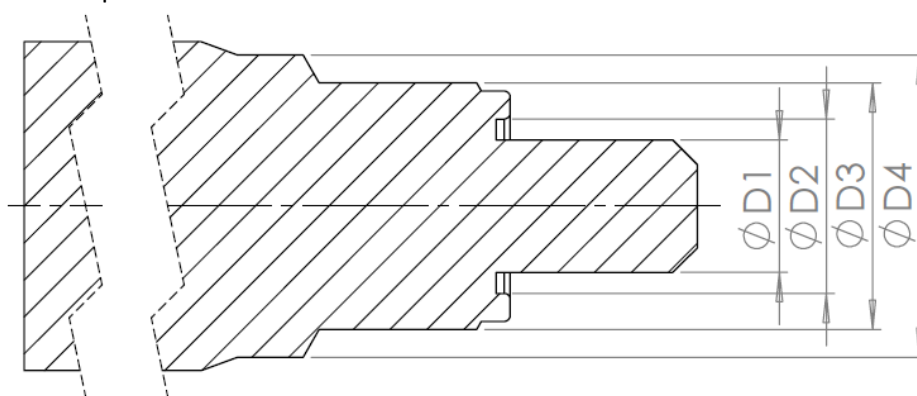
Návrh 1.1 prokázal, že současné řezné parametry jsou z hlediska drsnosti plochy odlehčení sacího ventilu nevhodné, protože se objevují kusy, které překračují povolenou drsnost a plocha odlehčení, resp. celé těleso, je zmetkové. Návrh 1.2 pokračuje v myšlence návrhu 1.1, tedy snižováním měrného tlaku zvýšením řezné rychlosti, jejímž důsledkem dojde k natočení a zmenšení oblasti primární plastické deformace.

Ideální rychlost pro slinuté karbidy se podle výrobců uvádí v rozsahu $150 \div 200 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. V případě kombinovaného nástroje T5062 je rychlost na průměru $D1 \approx 8 \text{ mm}$ z testu 1.1 výrazně nižší. Cílem tohoto návrhu je otestovat, zda vyšší rychlost průměru $D1$ bude mít zlepšující účinek na kvalitu plochy odlehčení sacího ventilu. Zároveň se ale zvyšuje riziko poškození nástroje na větších průměrech vlivem vysoké řezné rychlosti, kde by mohlo dojít vlivem vyšší teploty k natavení kobaltového pojiva a ztrátě pevnosti nástrojového materiálu.

APLIKACE:	Obrábění otvoru sacího ventilu na čisto kombinovaným nástrojem
STROJ:	Grob BZ 550
NÁSTROJ:	T5062

ÚPRAVY NÁSTROJE

Pro tento test bez úprav.



Obrázek 22 - Schéma nástroje T5062 [2]

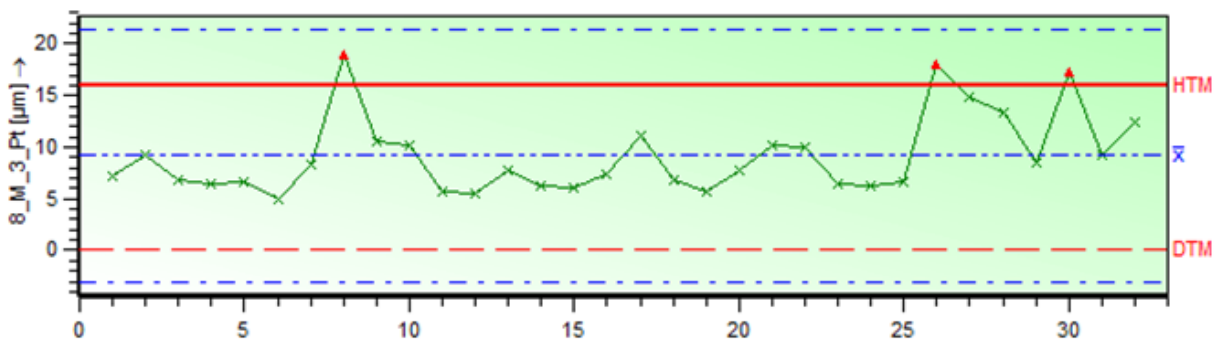
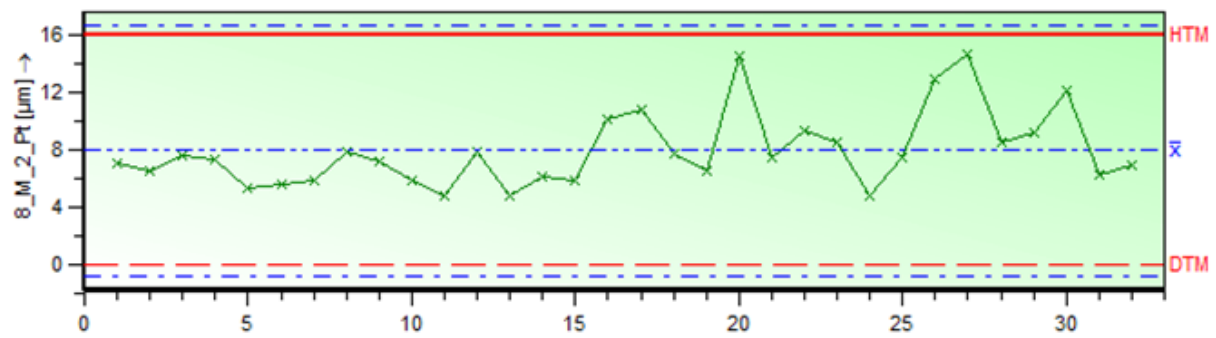
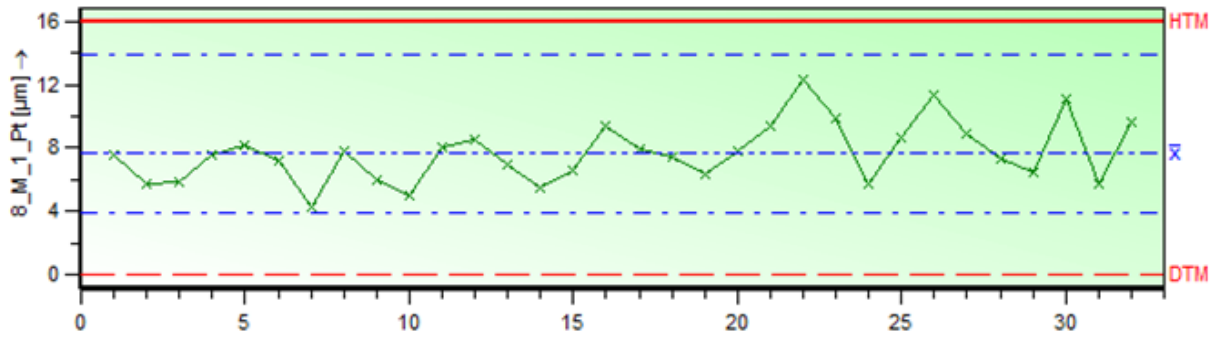
ŘEZNÉ PARAMETRY

$n \text{ [min}^{-1}\text{]}$	3800	$v_c \text{ [m}\cdot\text{min}^{-1}\text{]}$	$\varnothing D_1$	95,9
$f \text{ [m}\cdot\text{min}^{-1}\text{]}$	220		$\varnothing D_2$	126,5
provozní kapaliny	olej + voda		$\varnothing D_3$	179,0
			$\varnothing D_4$	214,8

VYHODNOCENÍ

Kusy nad Pt_{\max}	\bar{x}_{Pt1} [μm]	\bar{x}_{Pt2} [μm]	\bar{x}_{Pt3} [μm]	\bar{x}_{PtCelk} [μm]
3	7,7	7,96	9,16	8,27

ZÁZNAM Z PROTOKOLU MĚŘENÍ

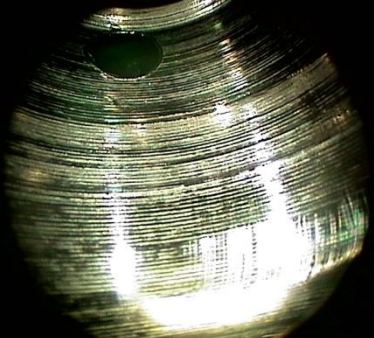
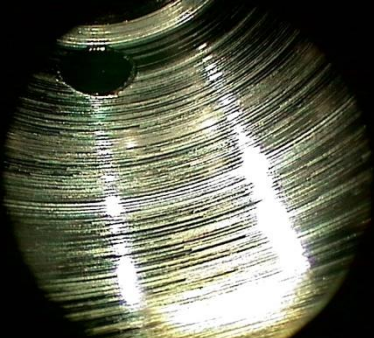
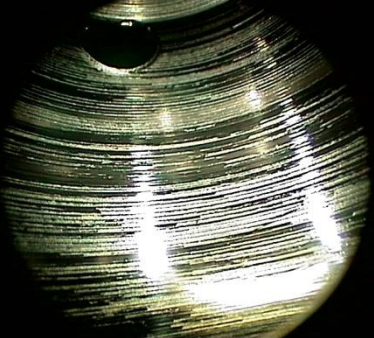
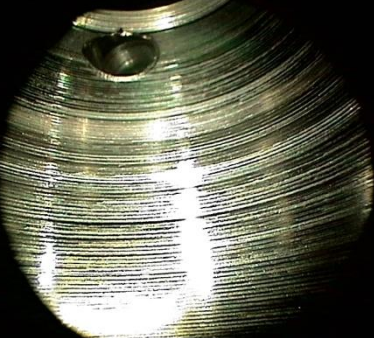

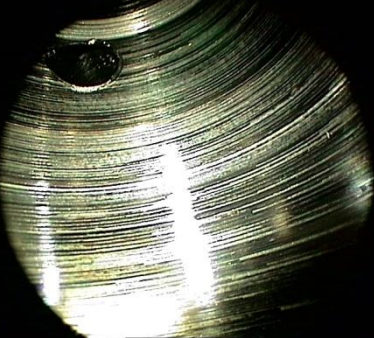


ZÁVĚR

Výsledky měření odhalují 3 zmetkové kusy. Přesto průměrné hodnoty drsností jednotlivých hlav klesly, v případě hlavy 3 alespoň nevzrostly.

Nástroj pracuje po celou dobu trvanlivosti bez problémů, obava ze ztráty pevnosti nástrojového materiálu se neprokázala. Proto v dalším návrhu dojde k navýšení otáček.

FOTOGRAFICKÁ DOKUMENTACE

Min. hodnoty	Max. hodnoty
 vz. 1167 – h1, Pt = 4,24 μm	 vz. 1168 – h3, Pt = 19,05 μm
 vz. 1238 – h2, Pt = 4,77 μm	 vz. 1261 – h3, Pt = 18,05 μm
 vz. 1193 – h2, Pt = 4,77 μm	 vz. 1260 – h3, Pt = 17,32 μm

Obrázek 67 - Fotografie ploch odlehčení SV po provedení návrhu 1.2 [2]

4.1.3 Návrh 1.3 – Zvyšování řezné rychlosti

ODŮVODNĚNÍ ZMĚNY

Zvýšení otáček na 3800 za minutu potvrdilo myšlenku návrhu u dvou ze tří hlav. Průměrná drsnost u hlavy 3 je sice vyšší než v prvním testu, ale to je způsobeno výskytem zmetkových ploch právě v hlavě 3. Z obrázku 26 je patrné, že drsnosti nezmetkových kusů se pohybují většinou pod průměrem.

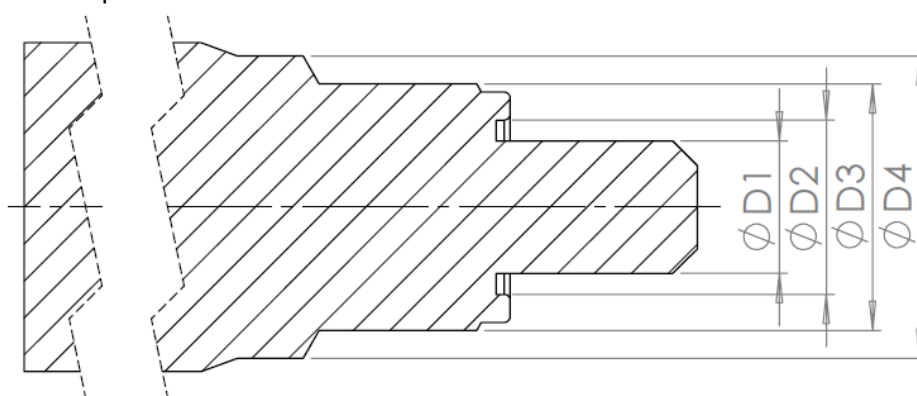
Z těchto hodnot drsností jednotlivých hlav (s přihlédnutím na vysoký průměr hlavy 3) je patrné, že zvýšení rychlosti mělo pozitivní vliv. Z hlediska podílu zmetků dopadl tento návrh totožně jako návrh 1.1.

V návrhu 1.3 dojde k dalšímu zvýšení otáček nástroje. Cílem je pozorovat změny a porovnat hodnoty drsností a zmetkovitost s návrhem 1.2.

APLIKACE:	Obrábění otvoru sacího ventilu na čisto kombinovaným nástrojem
STROJ:	Grob BZ 550
NÁSTROJ:	T5062

ÚPRAVY NÁSTROJE

Pro tento test bez úprav.



Obrázek 22 - Schéma nástroje T5062 [2]

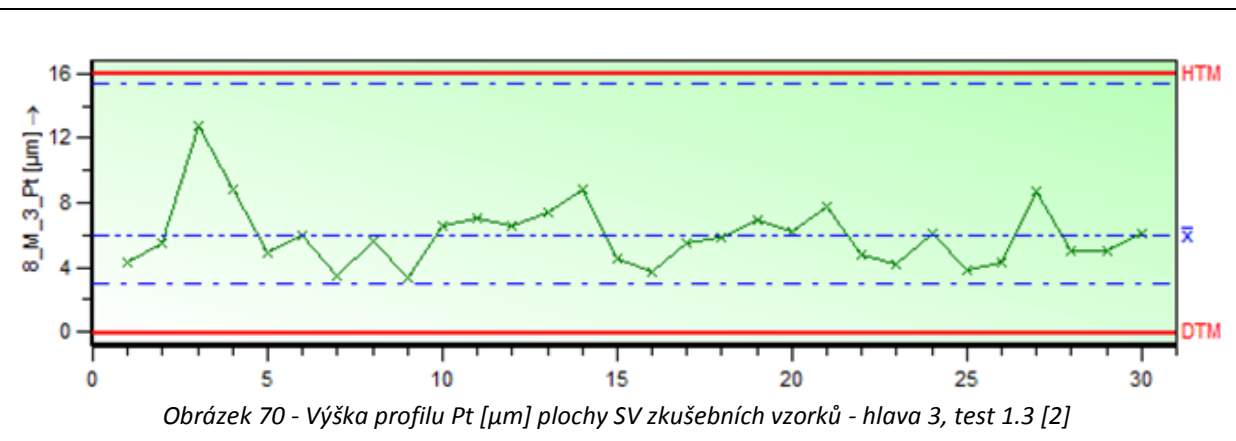
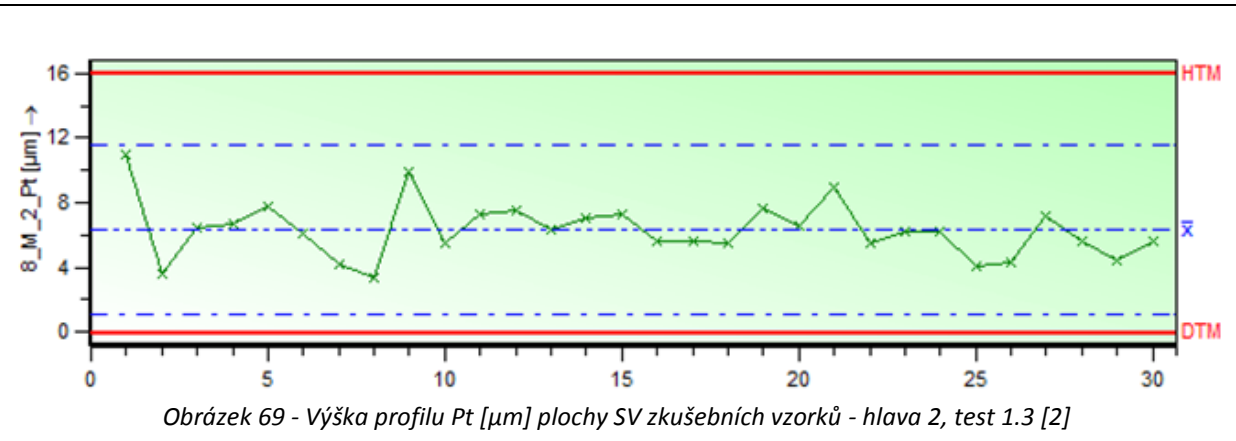
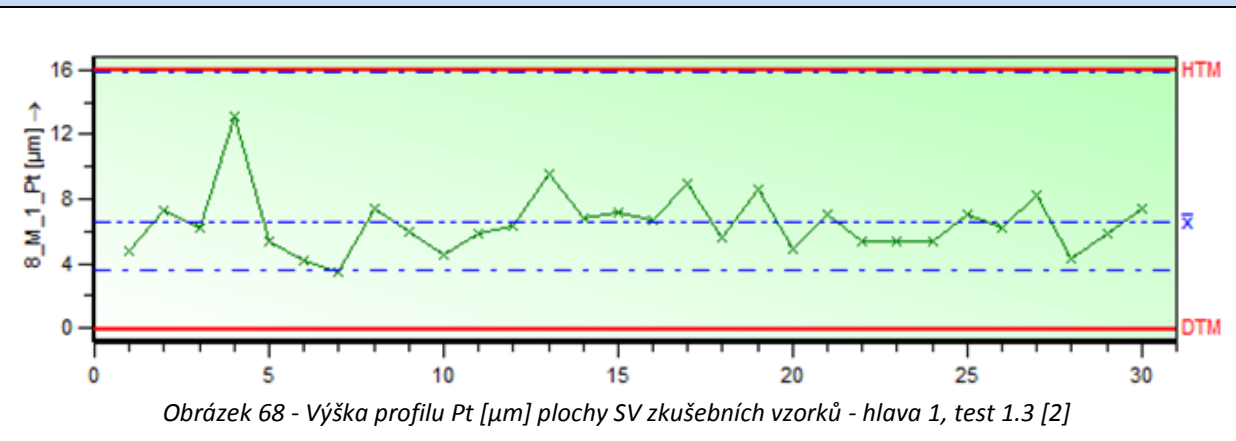
ŘEZNÉ PARAMETRY

n [min ⁻¹]	4000	v_c [m.min ⁻¹]	ØD ₁	101,0
f [m.min ⁻¹]	220		ØD ₂	133,1
provozní kapaliny	olej + voda		ØD ₃	188,4
			ØD ₄	226,1

VYHODNOCENÍ

Kusy nad $P_{t,max}$	\bar{x}_{Pt1} [μm]	\bar{x}_{Pt2} [μm]	\bar{x}_{Pt3} [μm]	\bar{x}_{PtCelk} [μm]
3	6,52	6,30	5,99	6,27

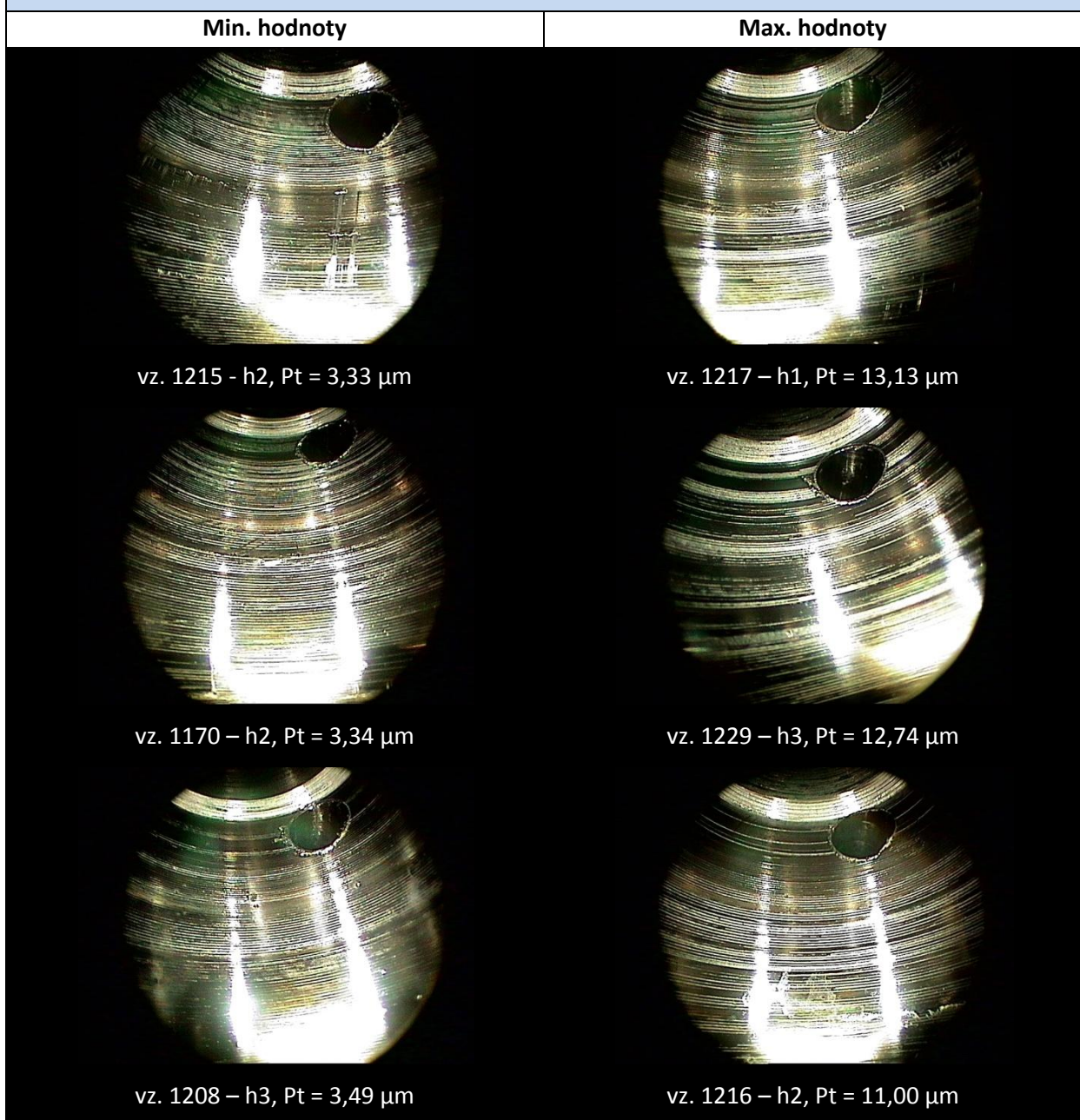
ZÁZNAM Z PROTOKOLU MĚŘENÍ



ZÁVĚR

Z naměřených hodnot je patrné, že otáčky 4000 za minutu jsou z hlediska kvality plochy a počtu zmetků zkušebních vzorků vhodné. Oproti návrhu 1.2 došlo k výraznějšímu poklesu průměrných hodnot drsností. Při nastavení těchto podmínek v sériové výrobě se nástroj vlivem řezné rychlosti ohříval natolik, že nebylo možné udržet ho v rozmezí vhodných pracovních teplot a došlo k opotřebení nástroje křehkým lomem na průměru D_3 . Hodnota 4000 otáček za minutu je stanovena jako limitní hodnota pro tento nástroj.

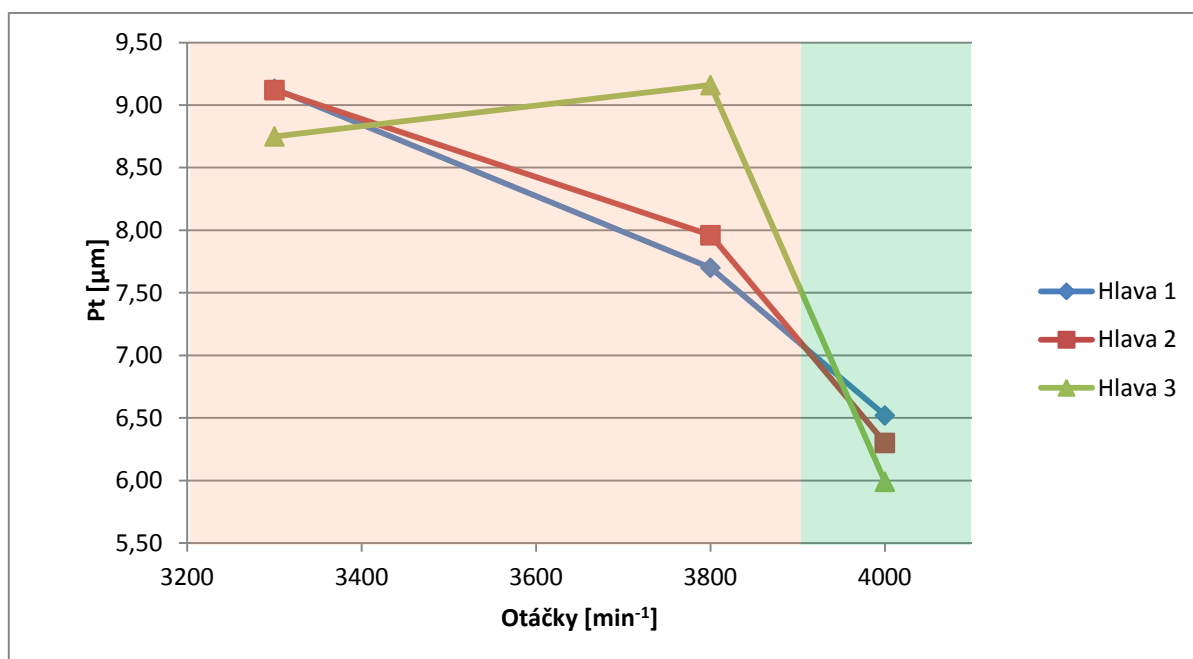
FOTOGRAFICKÁ DOKUMENTACE



Obrázek 71 - Fotografie ploch odlehčení SV po provedení návrhu 1.3 [2]

4.1.4 Zhodnocení testů na zlepšení kvality SV

Úkolem návrhu 1 (1.1 – 1.3) bylo zmapovat, jaký vliv má na kvalitu obrobené plochy sacího ventilu řezná rychlost. Výrobci řezných nástrojů i literatura doporučují při tvorbě nárůstku na nástroji zvýšit řeznou rychlost. Provedly se tři testy se zvyšujícími se otáčkami a porovnal se výsledné kvality ploch, počet zmetků a grafické vyhodnocení závislosti kvality plochy s rostoucí řeznou rychlostí. Z grafu 3 je patrné, že zvýšení rychlosti má pozitivní vliv na výslednou kvalitu plochy. Řezná rychlost se při 4000 otáčkách za minutu ukázala jako limitní, protože se objevily známky opotřebení nástroje na průměru D3, které nedovolovaly další práci nástroje, zkrátily trvanlivost nástroje a v provozu by došlo ke zvýšení nákladů linky vlivem častější výměny nástroje.



Graf 1 - Závislost kvality plochy na řezné rychlosti při konstantním posuvu ($f=220m.min^{-1}$)

(Pozn.: spojnice bodů vytvořena pro lepší orientaci) [2]

Tabulka 3 - Drsnost plochy odlehčení sacího ventilu

Průměrná výška profilu P_t [μm] plochy odlehčení sacího ventilu při různých otáčkách				
Otáčky [min ⁻¹]	Hlava 1	Hlava 2	Hlava 3	\bar{x}_{Celk}
3300	9,13	9,12	8,75	9,00
3800	7,70	7,96	9,16	8,27
4000	6,52	6,30	5,99	6,27

Tabulka 4 - Počet zmetkových ploch při změně otáček

Počet zmetkových ploch při různých otáčkách				
Otáčky [min^{-1}]	Hlava 1	Hlava 2	Hlava 3	Celkem
3300	0	1	2	3
3800	0	0	3	3
4000	0	0	0	0
Celkem	0	1	5	

Tabulka 2 shrnuje průměrné hodnoty výšky profilu P_t měřených ploch při zkušebních otáčkách ve všech hlavách z návrhů testů 1.1 – 1.3. Průměrné hodnoty P_t pro jednotlivé otáčky ukazují, že zvýšení řezné rychlosti mělo pozitivní vliv na kvalitu obrobených ploch. Zajímavý je rychlejší pokles průměrných hodnot drsností při nepatrném zvýšení otáček v testu 1.3 oproti testu 1.2.

Tabulka 3 zobrazuje, kolik ploch bylo při jednotlivých testech návrhů změřených jako zmetkových. I z tohoto pohledu je 4000 otáček za minutu vhodných. Jak bylo zmíněno výše, jedná se o limitní otáčky nástroje, a při použití těchto podmínek v sérii došlo k deformaci nástroje a nutnosti výměny nástroje. Tím pádem by při práci nástroje během původně určené trvanlivosti narostla zmetkovitost.

Z testů 1.1 – 1.3 tedy jednoznačně plyne, že zvýšení řezné rychlosti mělo kladný vliv na kvalitu obráběné plochy odlehčení sacího ventilu. Otáčky z testu 1.3 se ukázaly jako vhodné z hlediska drsnosti a počtu zmetkových ploch zkušební vzorku, nicméně vysoké tepelné namáhání nástroje vedlo k předčasnému opotřebení nástroje na průměru D3 v míře, ve které byl nástroj nepoužitelný.

V tomto bodě připadají v úvahu dvě cesty, které by měly vést k cíli. První je hledání dalších variant řezných podmínek, druhou možností je snížení prostupu tepla úpravou nástroje. Jelikož podmínkou je minimálně zachování dosavadních nákladů, upřednostňuji cestu hledání další varianty řezných podmínek před úpravami řezného nástroje.

Pro oblast řezu, ve které se tvoří nárůstek, je typický zvýšený tlak a z toho plynoucí adheze materiálu při bodovém styku materiálu obrobku a nástroje. Snížení tlaku se dá dosáhnout buď snížením síly, nebo zvětšením odřezávané plochy. Vyšší posuv způsobí, že se odřezává větší plocha během otáčky nástroje a tím dojde k poklesu tlaku. Větší obsah odřezávané plochy je vhodný i z hlediska odvodu tepla z místa řezu, protože se tvoří větší objem třísek, kterými je teplo odváděno (viz obrázek 31).

4.1.5 Návrh 2.1 – Optimalizace řezných podmínek obrábění SV

ODŮVODNĚNÍ

Po vyhodnocení návrhů 1.1 – 1.3 bylo usouzeno, že z pohledu nákladů bude vhodnějším řešením optimalizace řezných podmínek. Byly navrženy další dva testy, ve kterých budou nastaveny otáčky $n = 3900 \text{ min}^{-1}$ a porovná se vliv vyššího posuvu, vliv těchto otáček a schopnost nástroje pracovat po celou dobu stanovené trvanlivosti (500 ks těles).

Při nižší rychlosti se bude tvořit méně tepla, které má negativní vliv na trvanlivost nástroje. Zvýšený posuv zajistí větší odřezávanou plochu a větší objem třísky, kterým se bude odvádět teplo.

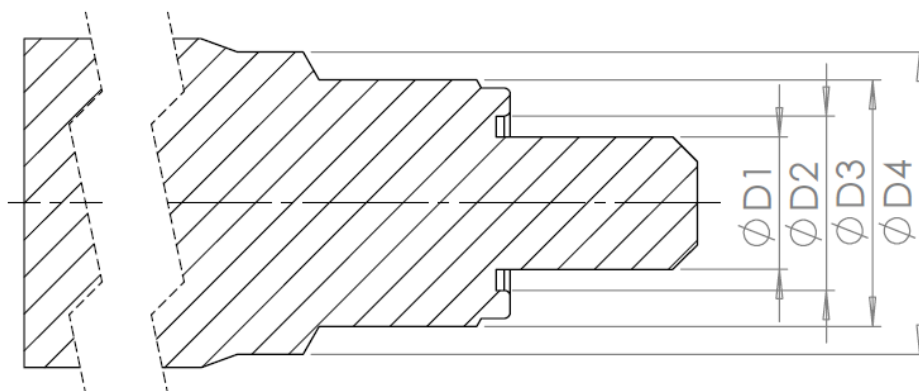
APLIKACE:	Obrábění otvoru sacího ventilu na čisto kombinovaným nástrojem
STROJ:	Grob BZ 550
NÁSTROJ:	T5062

ŘEZNÉ PARAMETRY

$n \text{ [min}^{-1}\text{]}$	3900	$v_c \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$	$\varnothing D_1$	98
$f \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$	320		$\varnothing D_2$	129,8
provozní kapaliny	olej + voda		$\varnothing D_3$	183,7
			$\varnothing D_4$	225,4

ÚPRAVY NÁSTROJE

Pro tento test bez úprav.

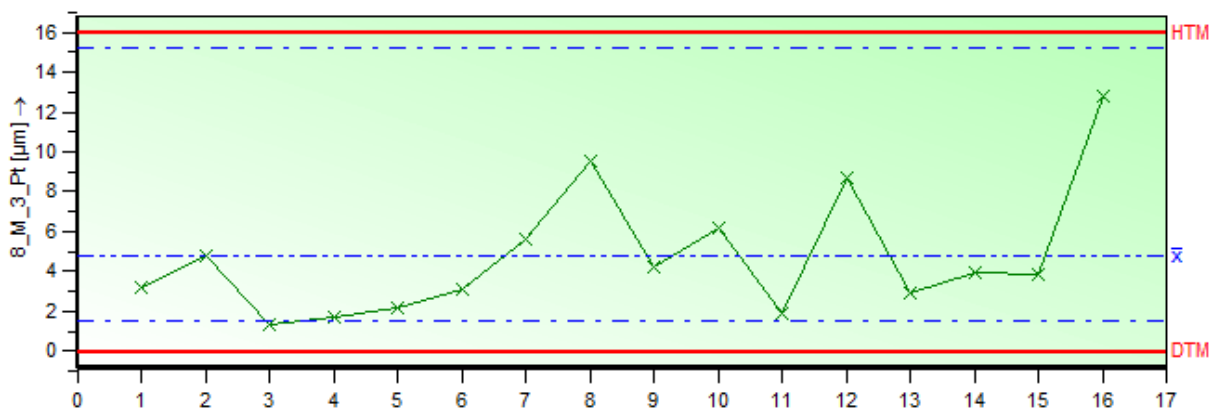
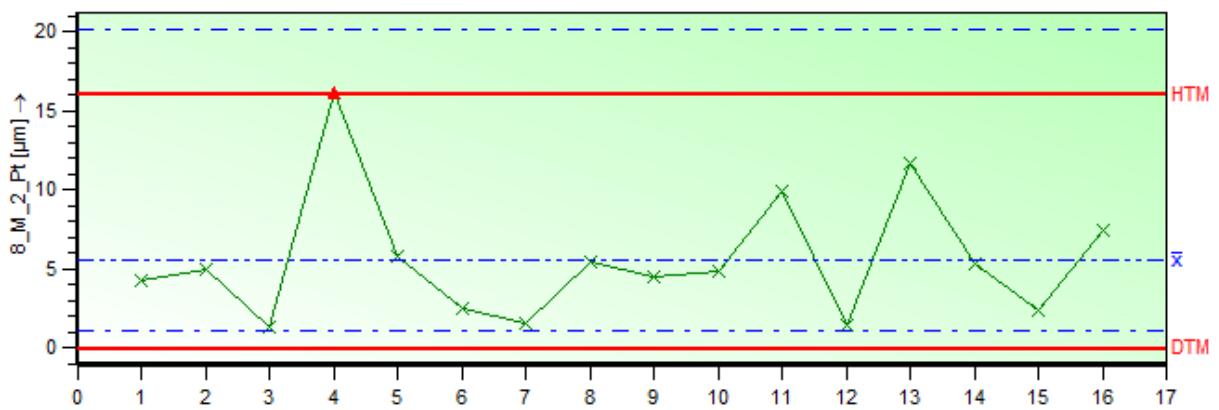
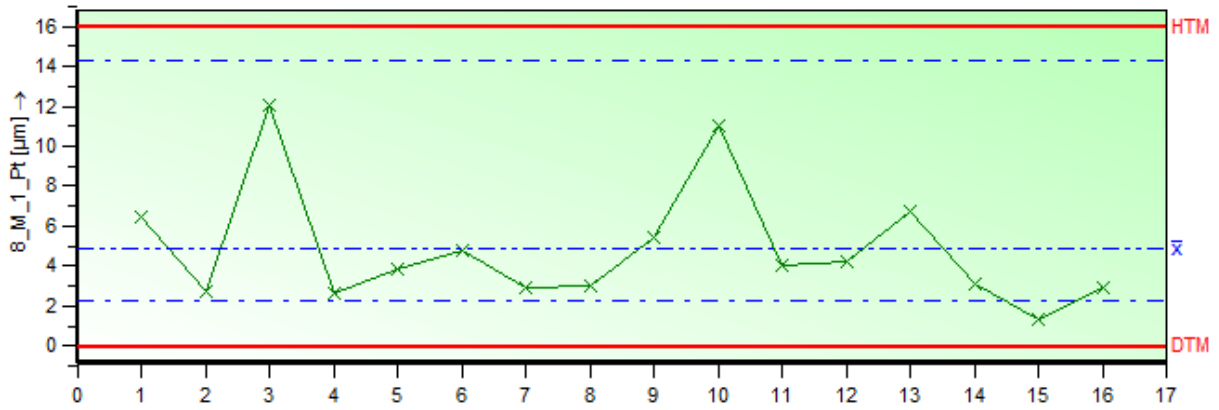


Obrázek 22 - Schéma nástroje T5062 [2]

VYHODNOCENÍ

Kusy nad Pt_{\max}	\bar{x}_{Pt1} [μm]	\bar{x}_{Pt2} [μm]	\bar{x}_{Pt3} [μm]	\bar{x}_{PtCelk} [μm]
1	4,83	5,59	4,79	5,06

ZÁZNAM Z PROTOKOLU MĚŘENÍ



ZÁVĚR

Průměrné hodnoty parametru P_t ploch odlehčení sacího ventilu jsou nižší, než v testech 1.1 – 1.3. Objevil se jeden vzorek s hodnotou P_t nad povolenou hranici. Další zhodnocení proběhne po testu návrhu 2.2

4.1.6 Návrh 2.2 – Optimalizace řezných podmínek obrábění SV

ODŮVODNĚNÍ

Návrh slouží pro porovnání vlivu posuvu na výšku profilu P_t s podmínkami z návrhu 2.1, a pro pozorování vlivu rozdílného posuvu na trvanlivost nástroje.

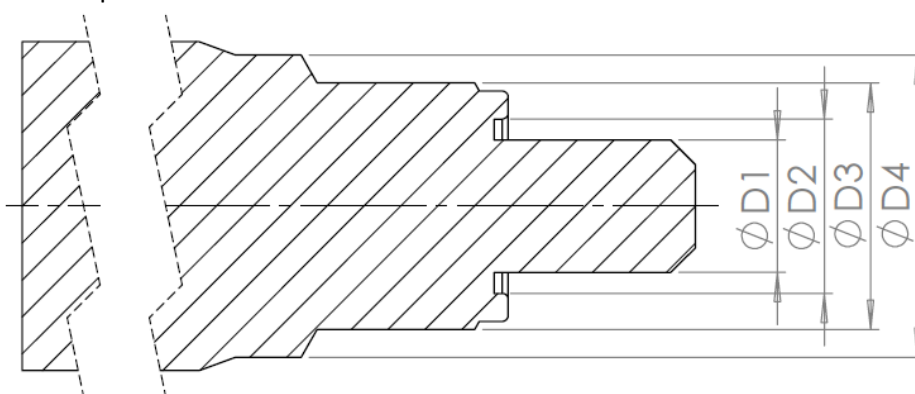
APLIKACE:	Obrábění otvoru sacího ventilu na čisto kombinovaným nástrojem
STROJ:	Grob BZ 550
NÁSTROJ:	T5062

ŘEZNÉ PARAMETRY

n [min^{-1}]	3900	v_c [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	$\varnothing D_1$	98
f [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	400		$\varnothing D_2$	129,8
provozní kapaliny	olej + voda		$\varnothing D_3$	183,7
			$\varnothing D_4$	225,4

ÚPRAVY NÁSTROJE

Pro tento test bez úprav.

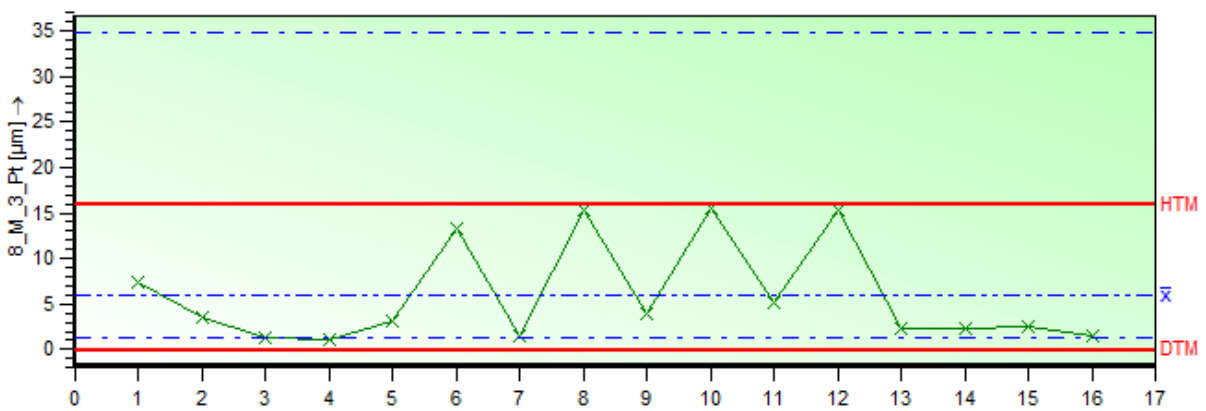
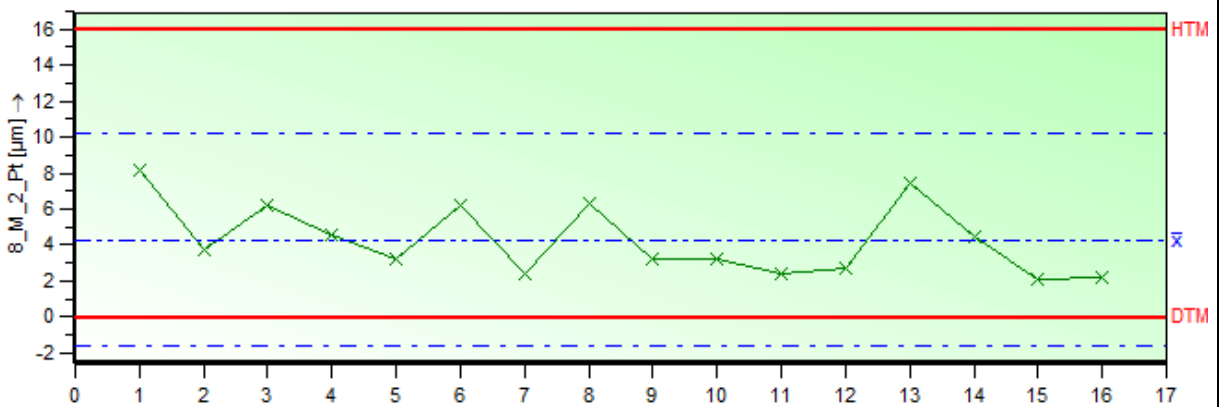
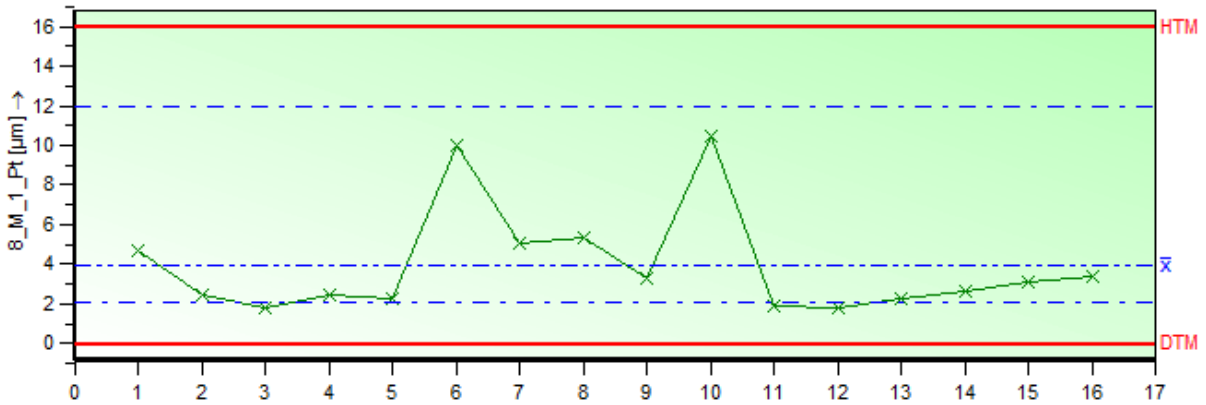


Obrázek 22 - Schéma nástroje T5062 [2]

VYHODNOCENÍ

Kusy nad Pt_{\max}	\bar{x}_{Pt1} [μm]	\bar{x}_{Pt2} [μm]	\bar{x}_{Pt3} [μm]	\bar{x}_{PtCelk} [μm]
0	3,94	4,28	5,93	4,72

ZÁZNAM Z PROTOKOLU MĚŘENÍ



ZÁVĚR

Průměrná hodnota parametru P_t je nejnižší ze všech provedených testů. Porovnáním s návrhem a výsledky testu 2.1 vyplývá, že vyšší hodnota posuvu má pozitivní vliv na kvalitu profilu. Během zkušební série se neobjevil zmetkový kus. Nástroje v obou případech testů (2.1 a 2.2) vykazovaly nadměrné opotřebení na průměru D_3 .

4.1.7 Shrnutí a navržená opatření z návrhů na zlepšení ploch odlehčení sacího ventilu

Tabulka 5 – Průměrné hodnoty parametru P_t jednotlivých hlav návrhů 1.1 – 2.2

Průměrná výška profilu P_t [μm] plochy odlehčení sacího ventilu při různých otáčkách a posuvech						
Návrh	f [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]	n [min^{-1}]	Hlava 1	Hlava 2	Hlava 3	\bar{x}_{Celk}
1.1	220	3300	9,13	9,12	8,75	9,00
1.2	220	3800	7,70	7,96	9,16	8,27
1.3	220	4000	6,52	6,30	5,99	6,27
2.1	320	3900	4,83	5,59	4,79	5,06
2.2	400	3900	3,94	4,28	5,93	4,72

Tabulka 4 shrnuje průměrné hodnoty parametru P_t ploch odlehčení sacího ventilu. Z něj jednoznačně plyne pozitivní vliv vyšších řezných podmínek, jak řezné rychlosti, tak posuvu. Kromě návrhu 1.1 bylo na nástrojích patrné nadměrné opotřebení na průměru D_3 , čili zlepšení kvality plochy bylo ve všech případech na úkor trvanlivosti nástroje. Z hlediska nákladů je snížení trvanlivosti nástroje T5062 nepřijatelné, jedná se o jeden z nejnákladnějších obráběcích nástrojů na lince a snížení trvanlivosti se v celkových nákladech projeví citelněji než několik vyřazených zmetků.

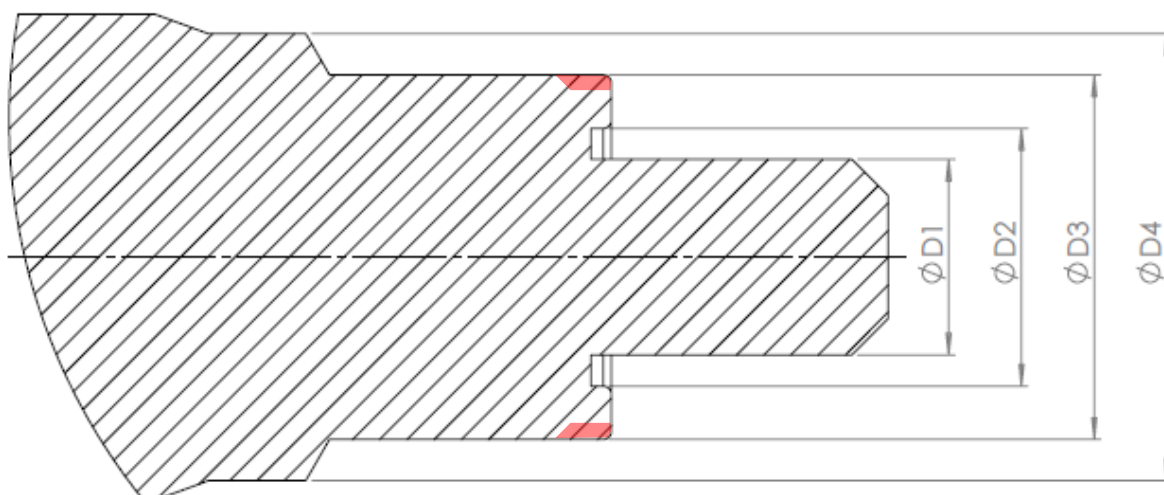
Ke zvýšení kvality ploch je tedy zapotřebí obrábět s vyššími řeznými parametry. Problémem je snížení trvanlivosti nástroje plynoucí z jeho konstrukce. Na rozdílných průměrech nástroje jsou při stejných otáčkách rozdílné rychlosti, které jsou klíčovým parametrem pro trvanlivost. V tomto konkrétním případě je rychlost na největším průměru nástroje oproti největšímu více než dvojnásobná.

Paradoxně k opotřebení, které vede k nefunkčnosti nástroje, nedochází na největším průměru nástroje, kde je řezná rychlost největší, ale na průměru D_3 . Na osazení nástroje na tomto průměru dochází k opotřebení křehkým lomem.

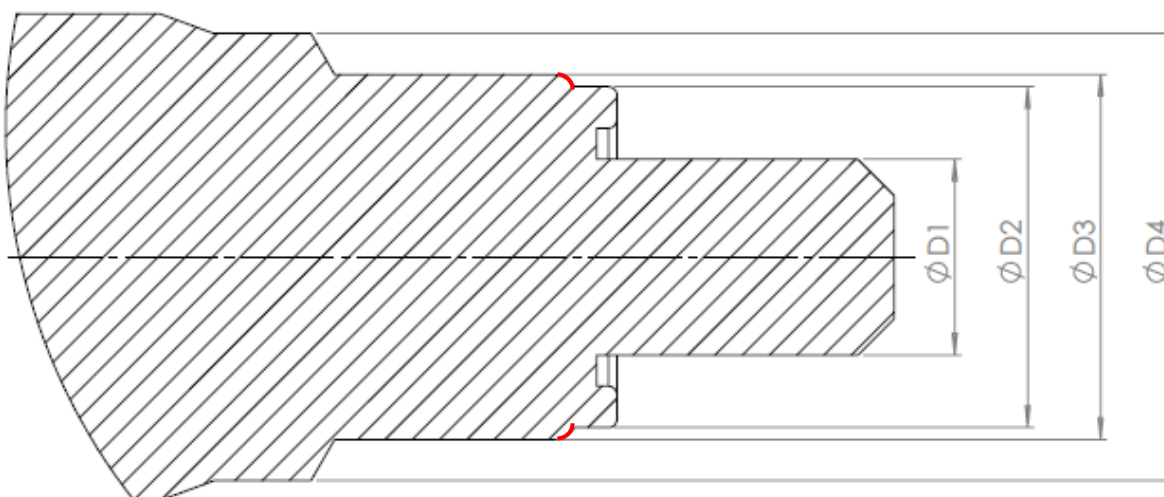
Byla navržena tato opatření:

- 1) změna tvaru nástroje v místě průměru D_3
- 2) změna nástrojového materiálu na odolnější proti teplotnímu působení

Ad1) Konstrukce nástroje pro výrobu otvoru sacího ventilu pro tento typ čerpadla je typická tvarem nástroje v oblasti průměru D_3 . Nástroje pro výrobu otvorů sacích ventilů jiných typů mají profil plný. U těchto nástrojů nedochází při podobných řezných podmínkách k opotřebení břitu křehkým lomem. Nabízí se dvě možné varianty. Zvětšit poloměr špičky, aby došlo k lepšímu odvádění tepla nástrojem, nebo zvýšit rozměr vnějšího průměru čelního zápichu na průměr D_3 .



Obrázek 78 – Schéma konstrukční změny I, zvětšení průměru tvaru zápichu na D_3 [2]



Obrázek 79 – Schéma konstrukční změny II, zvětšený poloměr špičky na průměru D_3 [2]

Ad2) Nástroj T5062 je ze slinutého karbidu typu P. Obsahuje karbid wolframu a kobalt. Obrázek 35 shrnuje teplotní odolnost jednotlivých nástrojových materiálů. Slinutý karbid typu P obsahuje navíc karbidy titanu, které difundují při vyšších teplotách než karbidy wolframu a tím zvyšují celkovou teplotní odolnost nástrojového materiálu. Změna nástrojového materiálu na SK (P) by měla zvýšit trvanlivost za stávajících podmínek.

4.2 Lokální zafrézování

4.2.1 Návrh 1 - Změna počtu zubů a úprava řezných podmínek

ODŮVODNĚNÍ ZMĚNY

Nástroj zanechává viditelné stopy na obrobené ploše. Tyto stopy jsou důsledkem vibrace nástroje při obrábění. V minulosti byl zkoumán vznik vibrací nástroje při různých otáčkách, nové nástroje vibrovaly vždy, při hodnotě 3000 min^{-1} byla plocha LG nejpříjemnější. Prvním návrhem je změna počtu břitů. Podstata myšlenky spočívá v tom, že vibrace způsobuje střídání polohy břitů zároveň v/mimo řez. Změnou počtu břitů by mělo dojít ke změně tohoto stavu a ke klidnému chodu nástroje.

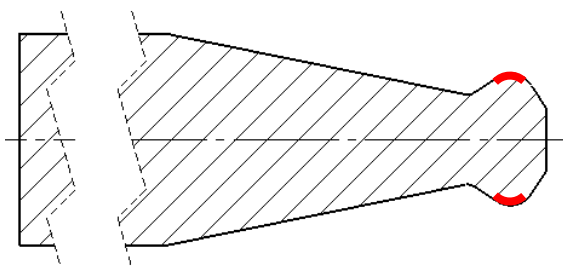
APLIKACE:	Sražení hrany přechodu kanálů tvarovou frézou
STROJ:	Grob 550
NÁSTROJ:	T6018

SLED ÚKONŮ

1. Výroba otvoru sacího ventilu
2. Vrtání vysokotlakého kanálu
3. Frézování sražení přechodu

ÚPRAVY NÁSTROJE

1. Troval jen na největším řezném průměru nástroje.

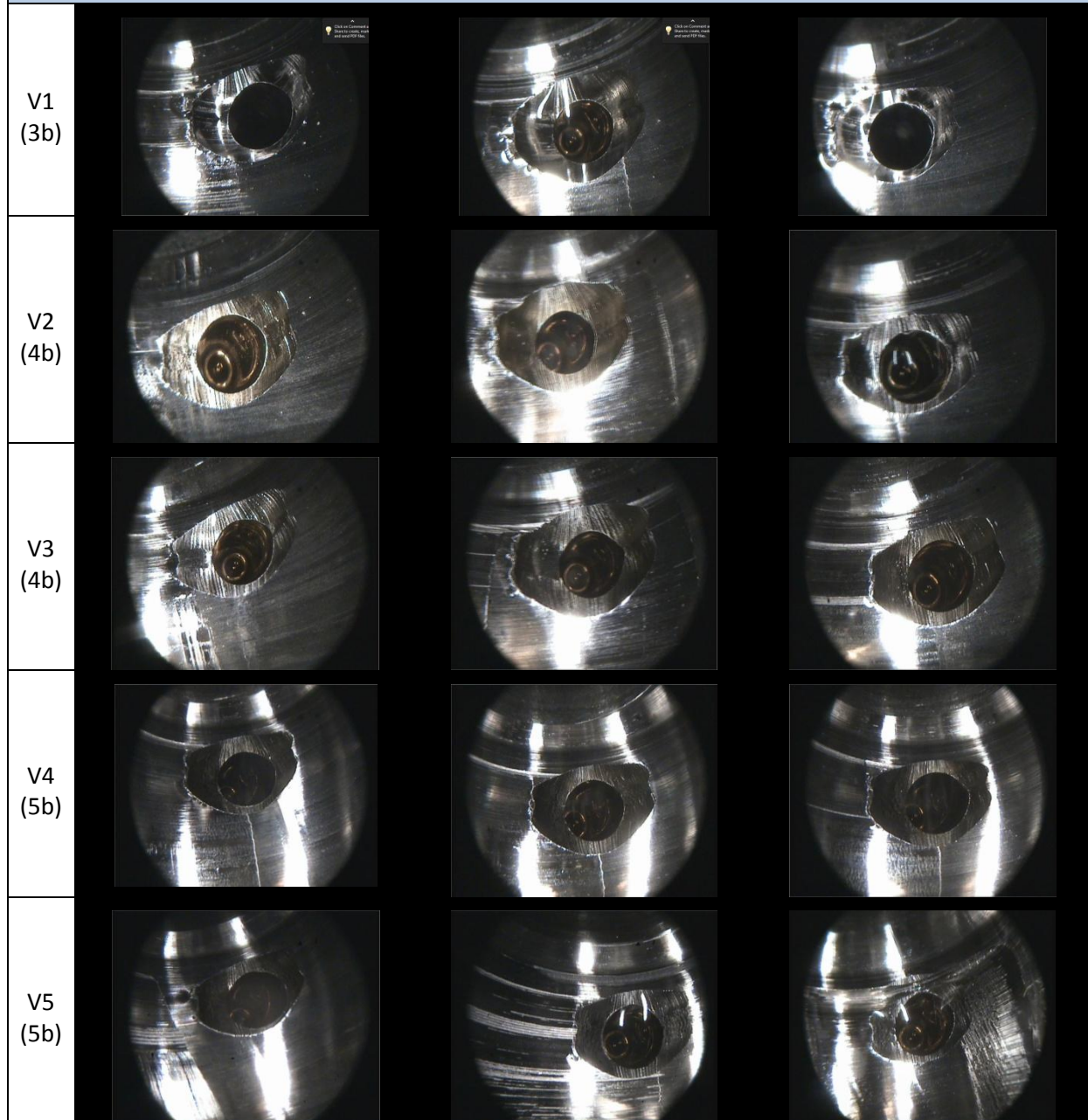


Obrázek 80 - Úprava nástroje pro návrh 1 [2]

ŘEZNÉ PARAMETRY

Varianta	Počet břitů	v_c [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	f [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]	$R_{\text{ostří}}$
1	3	40,5	80	0,02
2	4	40,5	80	0,02
3	4	40,5	110	0,02
4	5	40,5	110	0,02
5	5	40,5	140	0,02

FOTOGRAFICKÁ DOKUMENTACE



Obrázek 81 - Plocha lokálního zafrézování, výsledky návrhu 1 [2]

ZÁVĚR

Po porovnání těchto tří variant vykazuje nejpříjemnější výsledky nástroj se třemi břity. Nový nástroj přesto zanechává na obrobené ploše stopy a to až do částečného opotřebení (zhruba 200 ks).

Po porovnání ploch všech pěti variant se vyvrací hypotéza, že vibrace nástroje jsou způsobeny pozicí zubů zároveň v a mimo řez. Všechny varianty nástroje zanechávají při obrábění stopy na obrobené ploše. Nejmenší viditelné rozdíly mezi výstupky má varianta nástroje se třemi zuby. Druhý návrh proběhne pro potvrzení hypotézy, že nejlepší plochy vyrobí nástroj se třemi zuby.

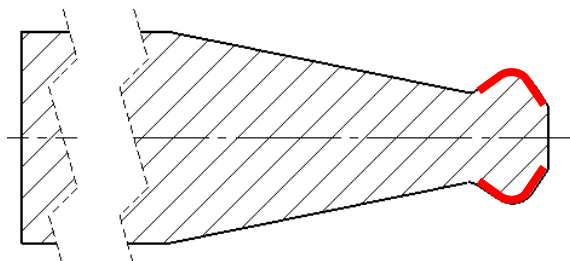
4.2.2 Návrh 2 – Změna počtu zubů, zaoblení ostří a úprava řezných podmínek

ODŮVODNĚNÍ ZMĚNY

U první zkoušky předpoklad, že jsou vibrace nástroje vyvolané střídáním nástroje v a mimo řez, nebyl potvrzen výsledky. Nejdůležitější změnou oproti prvnímu návrhu je vytvoření zaoblení ostří po celé jeho délce. Návrh se zaměřuje především na tři a čtyřbřité nástroje. Z výsledků předchozího testu je patrné, že pět břitů znamená další snížení houževnatosti nástroje a tím pádem i vyšší náchylnosti k vibracím, proto se tímto případem návrh zajímá jen okrajově.

ÚPRAVY NÁSTROJE, POŘADÍ ÚKONŮ APOD.

1. Troval nástroje po celé délce ostří.
2. Použití kratšího tepelného upínače (L = 120 mm).

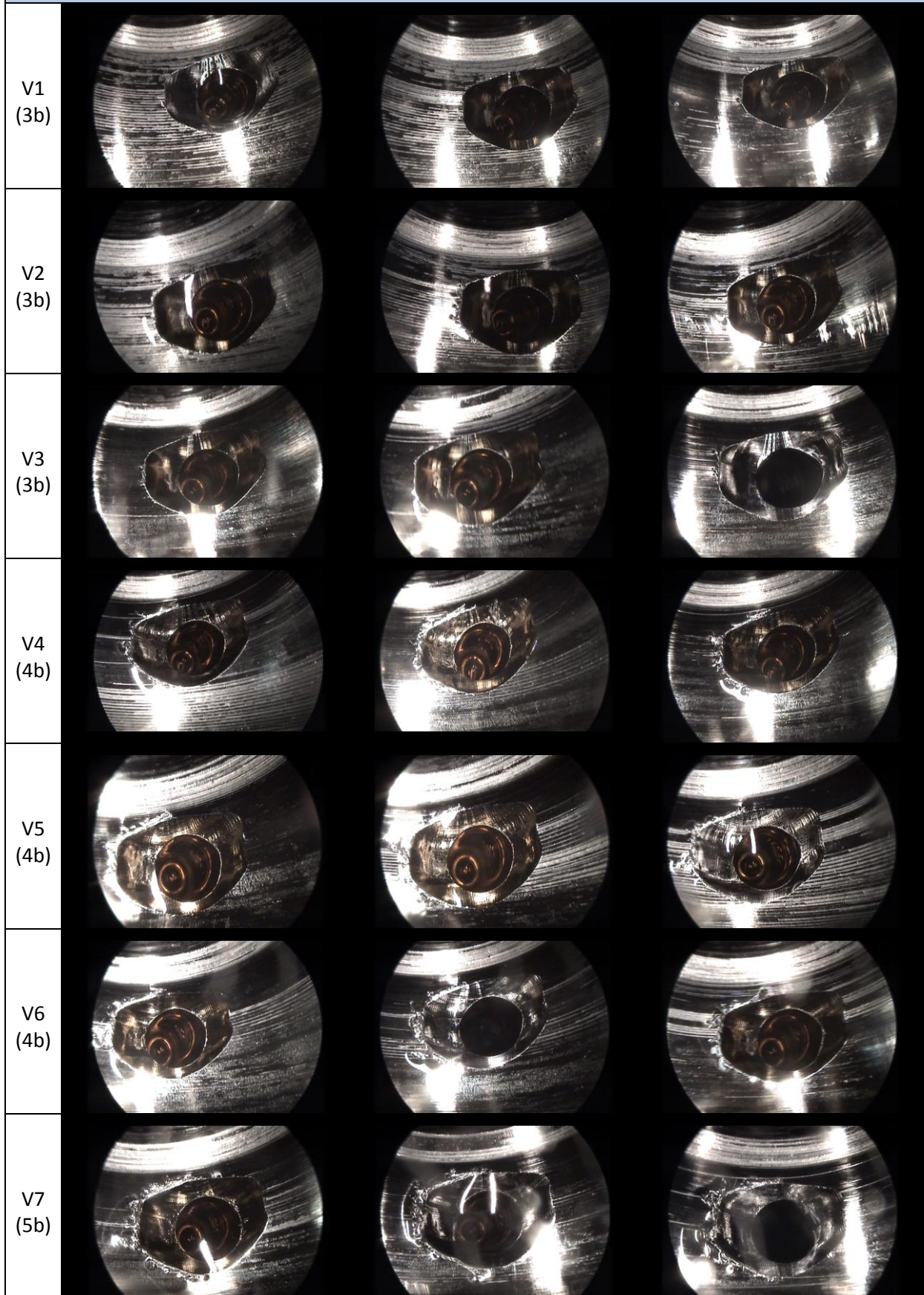


Obrázek 80 - Úprava nástroje pro návrh 2 [2]

ŘEZNÉ PARAMETRY

Varianta	Počet břitů	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm.min ⁻¹]	$R_{ostří}$
1	3	40,5	110	0,02
2	3	40,5	80	0,02
3	3	33,8	80	0,02
4	4	40,5	80	0,02
5	4	40,5	110	0,02
6	4	33,8	110	0,02
7	5	33,8	110	0,02

FOTOGRAFICKÁ DOKUMENTACE



Obrázek 82 - Plocha lokálního zafrézování, výsledky návrhu 2 [2]

ZÁVĚR

Z porovnání ploch ze sedmi variant nevychází ani jedna jako ideální, ani jedna z úprav nevedla k výrobě plochy bez stop po vibraci nástroje. Nejpříjemnější plochy vyrobí nástroj se třemi břity, pak s pěti břity a nejhorší variantou je čtyřbřitý nástroj, což bylo viditelné i v prvním návrhu testu.

4.2.3 Návrh 3 – Změna pořadí úkonů OP60

ODŮVODNĚNÍ ZMĚNY

Předchozí návrhy neprokázaly, že by různý počet břitů nástroje měl výrazný vliv na kvalitu plochy. Dalším návrhem je změna pořadí úkonů. Návrh vychází z poznatku, že pokud je plocha lokálního zafrézování vyrobena před vrtáním vysokotlakého kanálu, čili pokud nástroj T6018 řeže do plného materiálu, k vibracím nástroje nedochází. Proto dojde k hrubování plochy LG před vrtáním vysokotlakého kanálu. Poté nástroj T6018 obrobí plochu LG načisto.

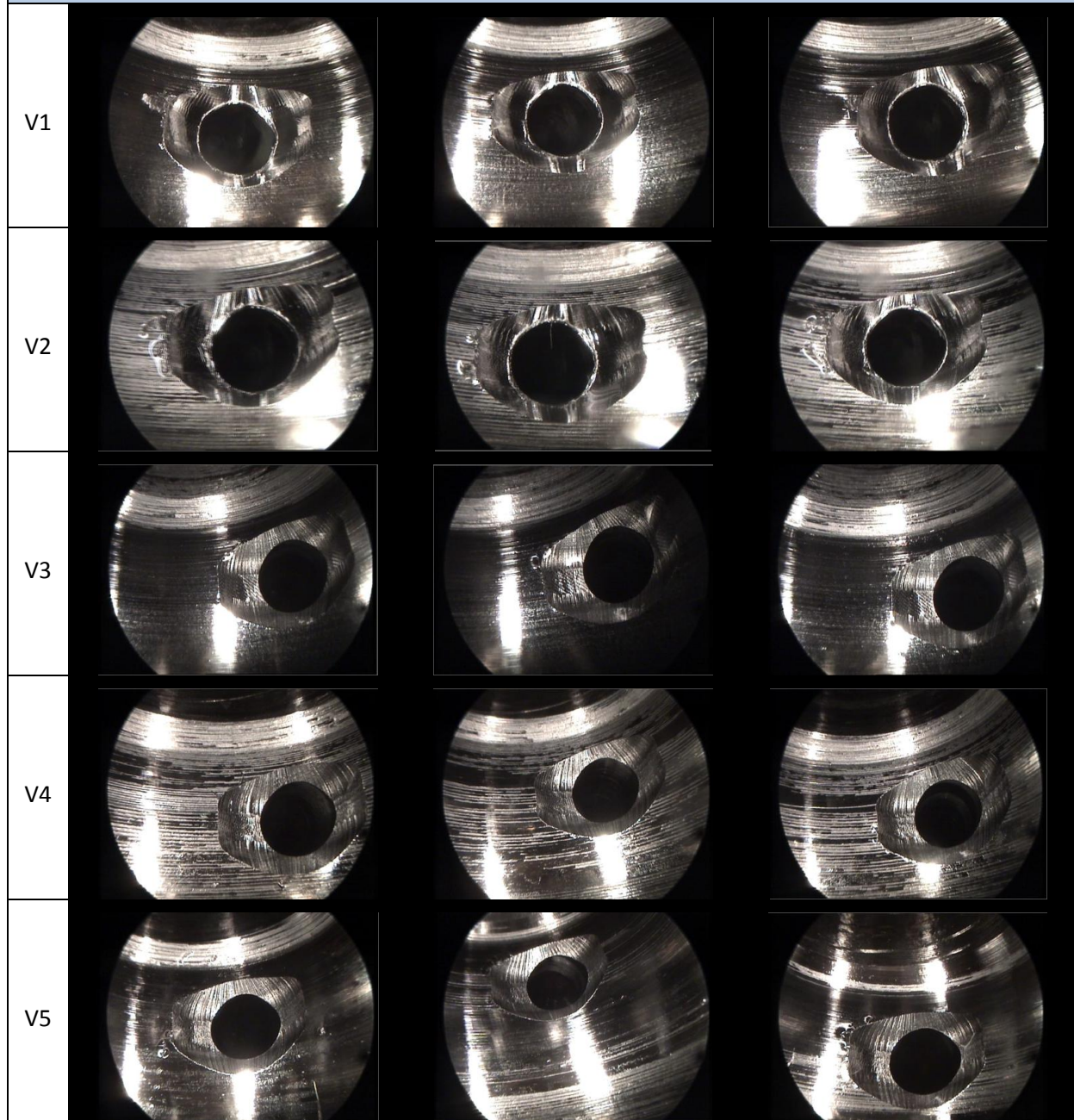
ÚPRAVY NÁSTROJE, POŘADÍ ÚKONŮ APOD.

1. Změna hodnot trovalu.
2. Tříbřitá a pětibřitá varianta T6018.
3. Změna pořadí úkonů na:
 - 1) hrubování LG
 - 2) vrtání vysokotlakého kanálu
 - 3) dokončení LG

ŘEZNÉ PARAMETRY

Varianta	Počet břitů	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm.min ⁻¹]	$R_{ostří}$
1	3	40,5	80	0,01
2	3	67,5	80	0,01
3	5	40,5	80	0,015
4	5	60,8	80	0,01
5	5	81	110	0,015

FOTOGRAFICKÁ DOKUMENTACE



Obrázek 83 – Plocha lokálního zafrézování, výsledky návrhu 3 [2]

ZÁVĚR

Z porovnání ploch ze sedmi variant nevychází ani jedna jako ideální, ani jedna z úprav nevedla k požadovanému výsledku - ploše LG bez stop po vibraci nástroje. Potvrdilo se, že nejpříjemnější plochy vyrobí nástroj se třemi břity.

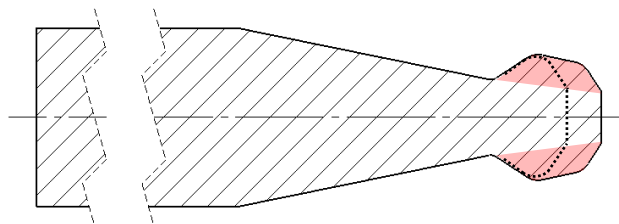
4.2.4 Návrh 4 – Změna profilu zubu na plný profil obráběné plochy

ODŮVODNĚNÍ ZMĚNY

Tato změna nástroje má objasnit, vznikají-li vibrace nástroje pouze při přísuvu nástroje nebo skládáním několika pohybů nástroje. Návrhy vychází z poznání, že vibrace se objeví pouze v případě, že je před LG vyrobena díra vysokotlakého kanálu. Plný profil by měl snížit poměrově průměr díry vysokotlakého kanálu tím, že se prodlouží délka zubu.

ÚPRAVY NÁSTROJE, POŘADÍ ÚKONŮ APOD.

1. Tvar zubu jako plný odřezávaný profil LG. Troval 0,02 po celé délce ostří.



2. Sled úkonů ve dvou variantách.

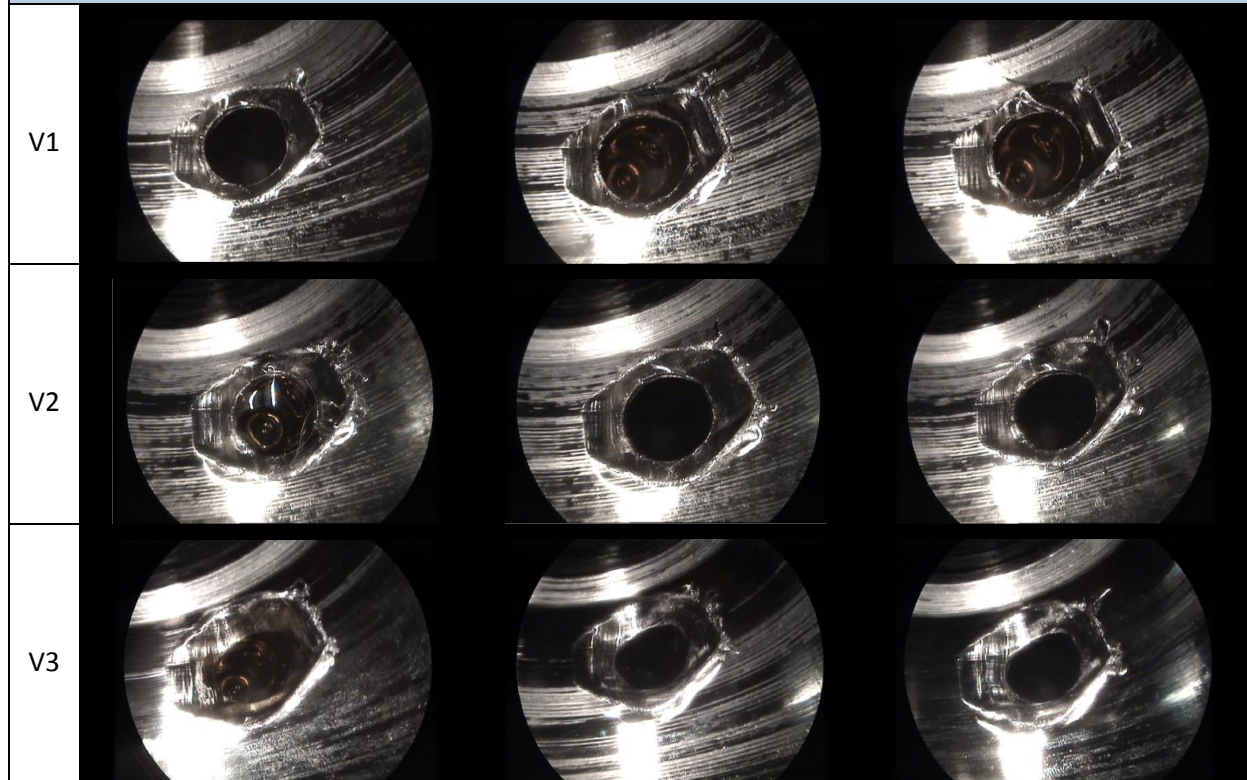
Sled úkonů A – 1) vysokotlaký kanál, 2) LG, 3) odjehlení vysokotlakého kanálu

Sled úkonů B – 1) vysokotlaký kanál, 2) hrubování LG (přídavek na dokončení 0,1 mm),
3) odjehlení vysokotlakého kanálu, 4) LG dokončení

ŘEZNÉ PARAMETRY

Varianta	Počet břitů	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm.min ⁻¹]	Sled úkonů
1	3	40,5	50	A
2	3	40,5	20	A
3	3	40,5	50	B

FOTOGRAFICKÁ DOKUMENTACE



Obrázek 84 - Plochy lokálního zafrézování, výsledky návrhu 4 [2]

ZÁVĚR

Předpoklad, že by vibrace vznikaly přísuvovým pohybem nástroje ve směru osy otvoru sacího ventilu, byl po přezkoumání kvality ploch lokálního zafrézování vyvrácen.

Z výsledků není patrné, která kombinace řezných podmínek s tvarem zubů má lepší výsledky. Varianta se jeví jako nevhodná.

4.2.5 Návrh 5 – Změna natočení nástroje vůči ose sacího ventilu

ODŮVODNĚNÍ ZMĚNY

Výrobci udávají jako jednu z možností, jak odstranit vibrace nástroje, zkrácení vyložení nástroje. V tomto případě je to velmi problematické, protože nástroj pracuje hluboko v tělese a přístupem je otvor sacího ventilu o průměru 18 mm. Tento prostor dovoluje změnu osy nástroje vůči ose sacího ventilu z 12° na 6°, a tím i mírné zkrácení nástroje. Tento návrh má za úkol objasnit, zda mírné zkrácení nástroje a užití kratšího upínače nástroje pozitivně ovlivní kvalitu obrobenej plochy.

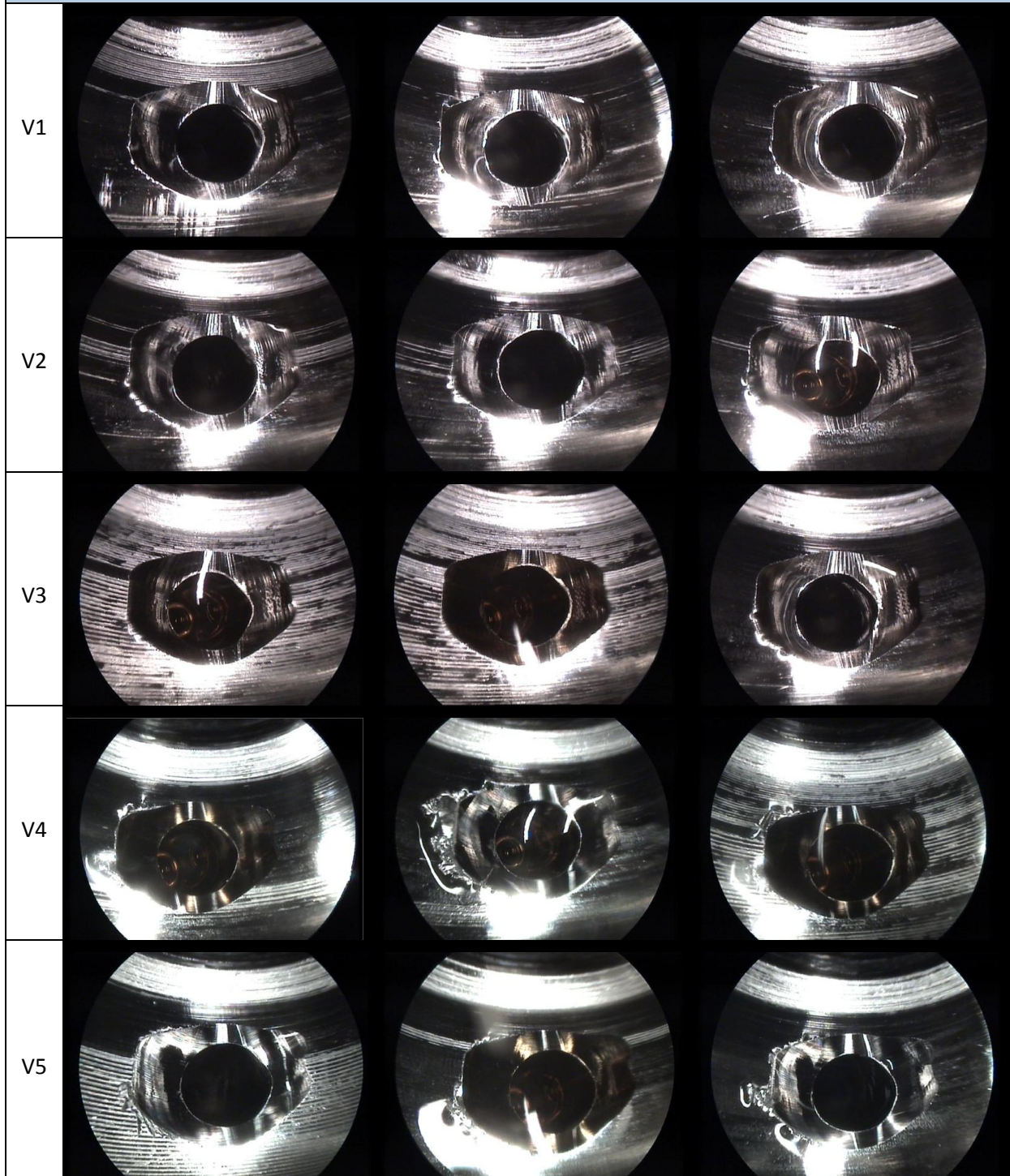
ÚPRAVY NÁSTROJE, POŘADÍ ÚKONŮ APOD.

1. Změna geometrie nástroje tak, aby při zachování tvaru vyrobené plochy, pracoval pod úhlem 6°, platí pro varianty 1, 2, 3, 6, 7.
2. Použití tepelného upínače o délce 80 mm, neplatí pro variantu 6 (120 mm).
3. Změna geometrie nástroje tak, aby při zachování tvaru vyrobené plochy, pracoval pod úhlem 12°, platí pro varianty 4, 5.

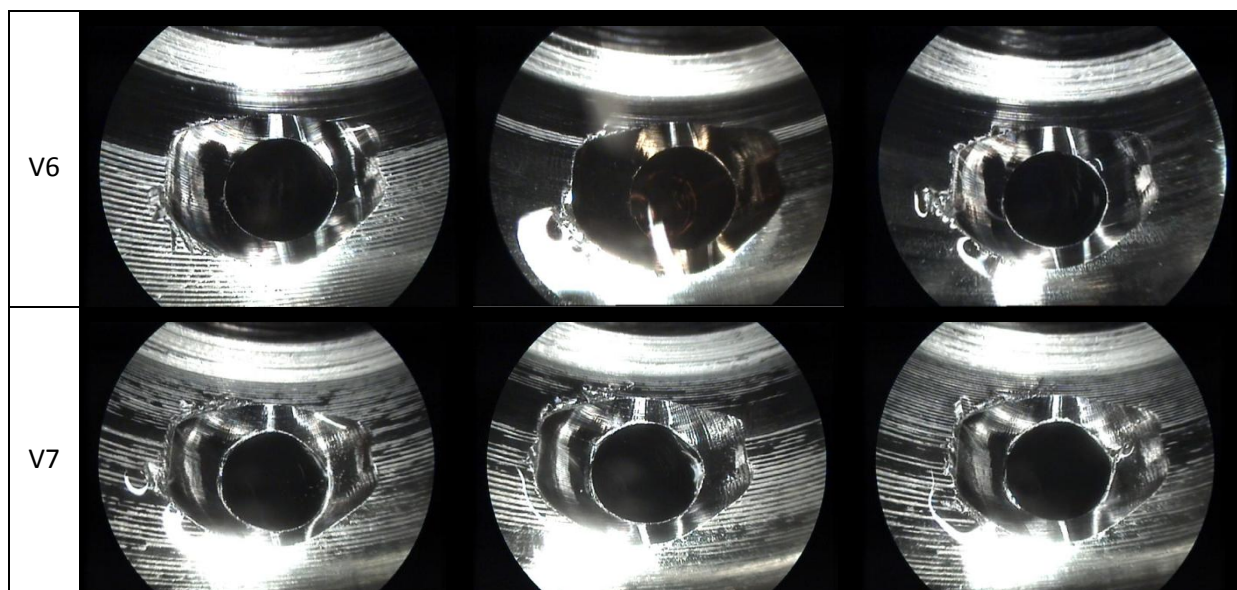
ŘEZNÉ PARAMETRY

Varianta	Počet břitů	Úhel [°]	v_c [m.min ⁻¹]	f [mm.min ⁻¹]	$R_{ostří}$
1	3	6	40,5	80	0,01
2	3	6	40,5	120	0,01
3	3	6	40,5	160	0,015
4	3	12	40,5	120	0,02
5	3	12	40,5	160	0,02
6	3	6	40,5	120	0,03
7	3	6	40,5	160	0,03

FOTOGRAFICKÁ DOKUMENTACE



Obrázek 85 - Plocha lokálního zafrézování, varianty 1 až 5 z návrhu 5 [2]



Obrázek 86 - Plocha lokálního zafrézování, varianty 6, 7 z návrhu 5 [2]

ZÁVĚR

Natočení pracovní osy nástroje T6018 přineslo zlepšení pozorovatelné jen u některých vyrobených ploch. V této fázi testů byly zkoumány vlivy změn různých parametrů na kvalitu plochy LG. Výsledky se příliš neliší, v naprosté většině případů jsou nevyhovující.

Vyskytly se nástroje, které vyráběly během trvanlivosti lepší plochy než ostatní, přičemž měly být totožné.

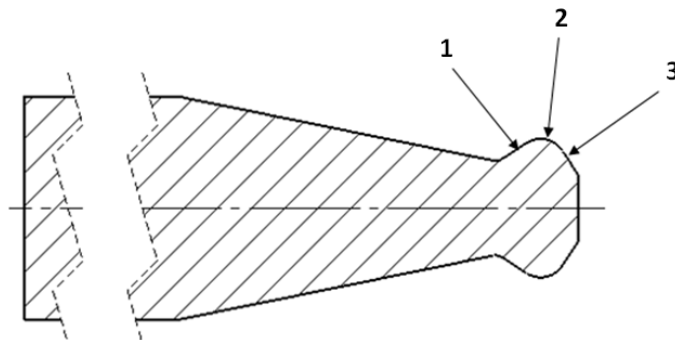
4.3 Revize nástroje T6018

Jak bylo zmíněno v závěru testu z návrhu 5.2.5, objevilo se několik nástrojů, které vyráběly přijatelné plochy, a současně s nimi, tedy ve stejných podmínkách, pracovaly identické nástroje, které vyráběly plochy v nepřijatelné kvalitě. To vedlo k úvaze, že nástroje identické nejsou a je třeba zjistit, co způsobuje rozdíly.

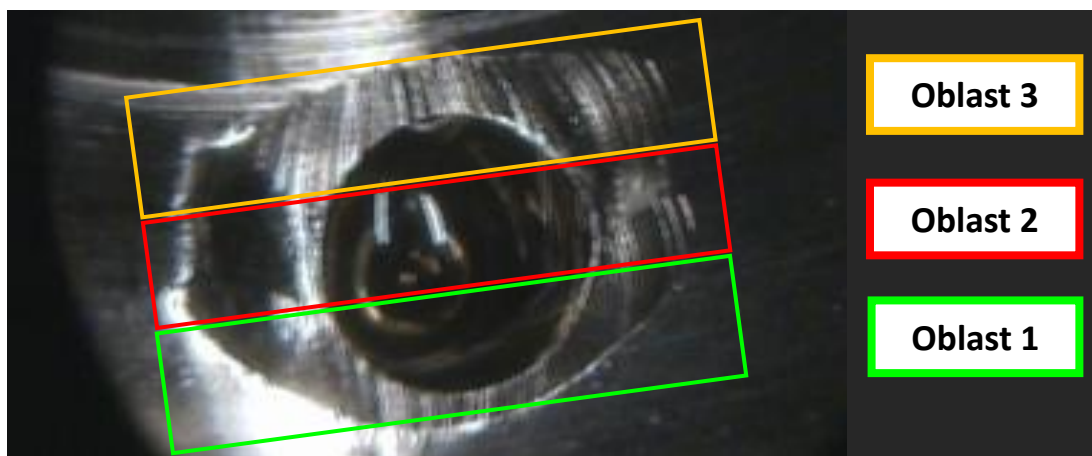
Polotovar nástroje a homogenita nástrojového materiálu je garantována výrobcem. Broušení nástroje je automatizované. Povlakuje se několik nástrojů zároveň, proto není pravděpodobné, že by se nástroje výrazně lišily. Podezření padá na zaoblení hrany (troval).

Po provedení posledního testu byly z nástrojů vybrány ty, které vyráběly plochy bez stop po vibraci nástroje. Tyto nástroje byly odeslány na měrové středisko, aby bylo přeměřeno zaoblení ostří. Podstata výroby zaoblení ostří spočívá v omílání nástroje v abrazivním materiálu. Vzhledem ke geometrii nástroje je patrné, že omílání má jiné účinky na rozdílných průměrech.

Místa měření jsou určena dle schématu na obrázku 38. Stopy po vibracích se objevují v místech 1 a 3, v místě 2 pouze v případě, že se vyskytnou i v 1 a 3. Proto budou v prvním měření kontrolována pouze místa 1 a 3 (obrázek 87 a 88).



Obrázek 87 - Místa měření trovalu na nástroji T6018 [2]

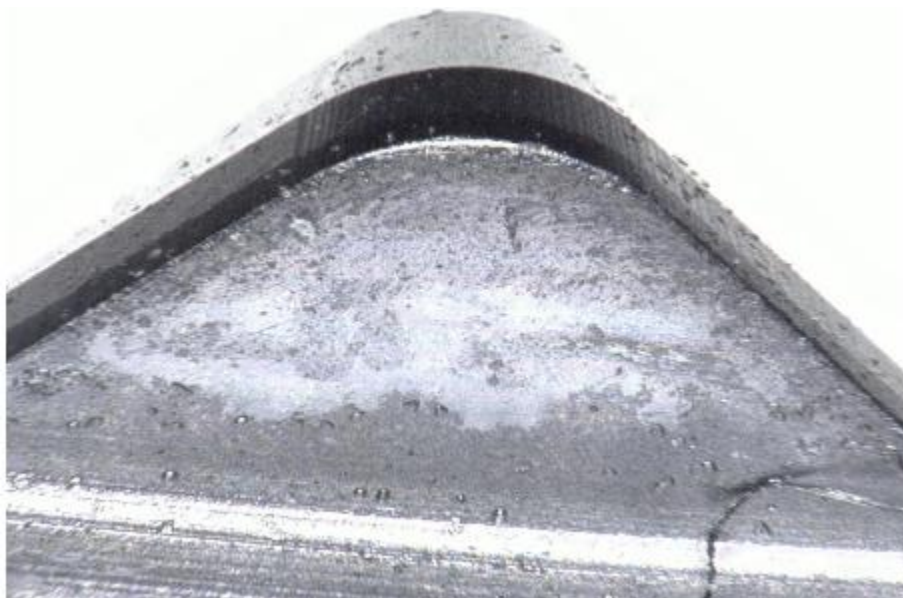


Obrázek 88 - Plocha LG rozdělená podle označených oblastí nástroje [2]

Šest nástrojů bylo vybráno a odesláno na měřicí středisko k přeměření zaoblení ostří. Jednalo se o nástroj s třemi břity, s pracovní osou 6° i 12° , upínané do držáku o délce 80 mm. Naměřené hodnoty byly zaneseny do tabulky 6. Z ní je patrné že se hodnoty trovalu, přestože měly mít stejnou hodnotu, liší v některých případech až o dva řády.

Tabulka 6 - Naměřené hodnoty trvovalu na nástrojích T6018

Nástroj č.	R _{ostří} [mm] – břit 1		R _{ostří} [mm] – břit 2		R _{ostří} [mm] – břit 3	
	Oblast		Oblast		Oblast	
	1	3	1	3	1	3
1	0,0252	0,0747	0,0231	0,0304	0,0235	0,0491
2	0,0215	0,0531	0,0210	0,1057	0,0224	0,0729
3	0,0107	0,0264	0,0145	0,0785	0,0313	0,0728
4	0,0862	0,0915	0,0368	0,0742	0,0230	0,0826
5	0,0086	0,0792	0,0116	0,1585	0,0170	0,0745
6	0,0308	0,0646	0,0415	0,0847	0,0349	0,0484



Obrázek 89 - Fotografie břitu nástroje T6018 [2]

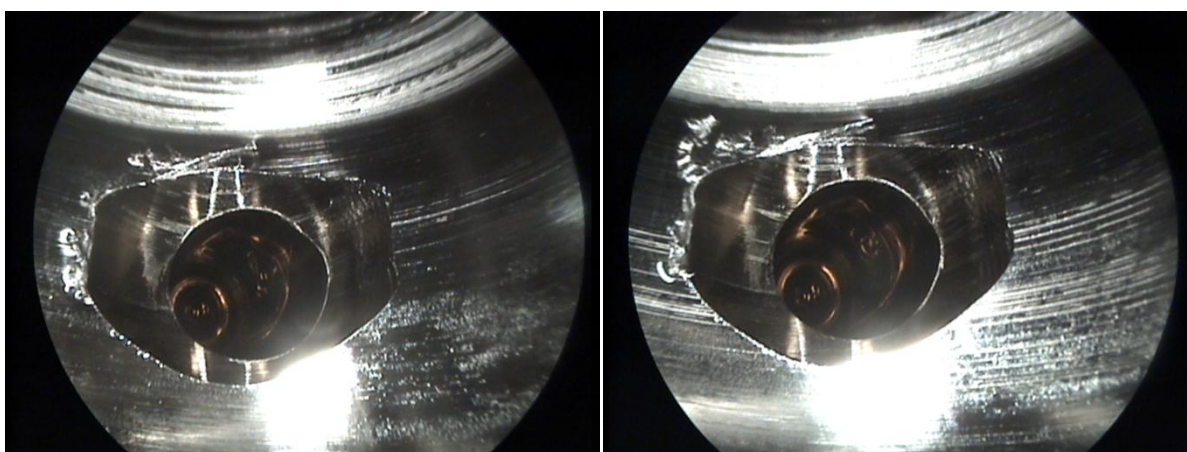
Z tabulky 6 plyne, že se hodnota trvovalu liší v různých místech břitu a není možné vyrobít stejné zaoblení omíláním po celé délce ostří (předpoklad stejného opotřebování v čase), jehož body nejsou při omílání ve stejné vzdálenosti od osy nástroje (podobné příčiny jako různá velikost opotřebení nástroje s více stupni). Z předchozích testů plyne, že rozdíly v kvalitě plochy LG, při změnách řezných podmínek a geometrie nástroje, jsou velmi malé a nepřinášejí požadované výsledky.

Poznátky o hodnotách zaoblení ostří pomocí technologie troval vedly k úvaze, že tato technologie není vhodná pro tuto aplikaci. Proto byly upraveny dva nástroje ručně. Hrany byly sraženy jemným pilníkem a následně byl břit ručně kartáčován. Nástroje byly přeměřeny, hodnoty zaoblení ostří jsou v tabulce 7.

Tabulka 7 – Zaoblení ostří ručně upravených nástrojů

Nástroj	R _{ostří} [mm] – břit 1			R _{ostří} [mm] – břit 2			R _{ostří} [mm] – břit 3		
	Oblast			Oblast			Oblast		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0,0080	0,0142	0,0274	0,0132	0,0206	0,0517	0,0068	0,0048	0,0554
2	0,0038	0,0029	0,0648	0,0031	0,0041	0,0597	0,0048	0,0089	0,0574

Po operativním nasazení do výroby se obrobilo několik kusů čerpadel a vyrobené plochy byly buď úplně bez stop po vibraci nástroje, nebo jen s minimální částí plochy. Tyto výsledky byly hodnoceny jako uznatelné a při výsledné kontrole po odjehlení byla plocha LG bez stop po vibraci nástroje.



Obrázek 90 - Plochy vyrobené nástroji z tabulky 7 [2]

Z těchto úprav, které přinesly požadované výsledky, byly vyvozeny následující závěry. Stávající technologie pro úpravu ostří nástroje T6018 byla označena jako nevhodná a nebude se dále používat. Ostřírna začala připravovat program pro strojní úpravu ostří. Tabulka 8 a 9 shrnuje hodnoty zaoblení v určených místech ostří nástroje. Úprava hran byla provedena po broušení ručně, u tří nástrojů pomocí pilování, u tří kartáčováním. Po nasazení do výroby vykazovaly plochy LG stopy po vibraci nástroje. Bylo seznáno, že nástroje je nutné upravovat strojně, kvůli zachování stejných hodnot zaoblení ostří, přičemž hrany budou upraveny kartáčováním, které vyrábělo plochy v lepší kvalitě oproti pilování.

Tabulka 8 - Hodnoty zaoblení ostří, zaoblení vyrobené kartáčováním

Nástroj	R _{ostří} [mm] – břit 1			R _{ostří} [mm] – břit 2			R _{ostří} [mm] – břit 3		
	Oblast			Oblast			Oblast		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0,00387	0,00982	0,00757	0,00839	0,00939	0,01262	0,00323	0,00974	0,01566
2	0,00117	0,00546	0,01359	0,01089	0,01176	0,04637	0,00376	0,00964	0,01982
3	0,00153	0,00809	0,01268	0,00832	0,01108	0,04303	0,00620	0,01014	0,02580

Tabulka 9 - Hodnoty zaoblení ostří, zaoblení vyrobené pilováním

Nástroj	R _{ostří} [mm] – břit 1			R _{ostří} [mm] – břit 2			R _{ostří} [mm] – břit 3		
	Oblast			Oblast			Oblast		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
4	0,00496	0,00944	0,02427	0,00697	0,00920	0,05020	0,00840	0,00470	0,00470
5	0,00565	0,00770	0,02750	0,00867	0,00982	0,05140	0,01390	0,01960	0,00960
6	0,00830	0,01226	0,03399	0,00510	0,09150	0,03087	0,13610	0,23450	0,05470

5. Závěr

Úkolem práce bylo navrhnout a vyzkoušet změny, které by vedly ke zlepšení kvality ploch pozice 5 tělesa čerpadla CP3. Jedná se o odlehčení plochy sacího ventilu a plochy lokálního zafrézování, která slouží pro výrobu sražené hrany přechodu mezi odlehčením plochy sacího ventilu a ústím kanálu vysokotlakého zpětného ventilu.

U plochy odlehčení sacího ventilu bylo stanoveno, že vysoká drsnost plochy je způsobena tvorbou nestabilního nárůstku. Příčinou vzniku nárůstku je vysoký měrný tlak v oblasti sekundární plastické deformace. Tento tlak lze snížit zvýšením řezné rychlosti. Prvním návrhem bylo zjištění vlivu zvyšování řezné rychlosti na kvalitu plochy. Byly provedeny tři testy, ve kterých se postupně zvyšovaly otáčky, resp. řezná rychlost. Potvrdilo se, že vyšší rychlost má na kvalitu plochy pozitivní vliv, ve zkoušeném rozsahu otáček při konstantním posuvu došlo k poklesu průměrných hodnot parametru P_t . Zvyšování řezné rychlosti se negativně projevilo z hlediska trvanlivosti nástroje, na průměru D_3 došlo k poškození křehkým lomem, patrně vlivem nedostatečného odvodu tepla z místa řezu. Otáčky 4000 min^{-1} byly stanoveny jako limitní. V dalších testech byl zkoumán vliv rozdílných posuvů (při konstantních otáčkách) na kvalitu povrchu. Bylo dosaženo nejnižších průměrných hodnot P_t . Potíže s křehkým lomem na ostří na průměru D_3 neustaly.

Z provedených testů plyne tento závěr. Při zachování současné konstrukce nástroje lze dosáhnout požadované kvality a produkce bez zmetků pouze za cenu snížené trvanlivosti nástroje.

Problematickým místem je osazení na průměru D_3 , které se opotřebí daleko dřív než ostatní části nástroje. V kapitole 4.1.7 byla navržena konstrukční opatření, která by měla zvýšit trvanlivost břitu. Jedná se o zvětšení radiusu špičky na průměru D_3 (obrázek 79), které by zlepšilo odvod tepla nástrojem. Druhou konstrukční úpravou je plný profil zápichu (obrázek 78). Tato konstrukce se běžně užívá při dokončování otvoru sacího ventilu u jiných typů těles a k problémům s křehkým lomem při vyšších otáčkách nedochází.

Další možností je změna nástrojového materiálu na slinutý karbid typu P, který má díky obsahu karbidů titanu vyšší tepelnou odolnost (obrázek 37).

Upustilo se od uvažované tvorby katalogů hraničních vzorků. Lidské oko rozliší délku maximálně 50 μm , s ohledem na požadované parametry ($P_{t \text{ max}} = 16 \mu\text{m}$) není takový rozměr pro lidské oko rozlišitelný.

Lokální zafrézování je plocha hluboko v čerpadle. Vyložení nástroje v poměru k průměru stopky je velké a nástroj je náchylný k vibracím. Stopy po vibraci nástroje jsou nepříjemné, jsou to vady vrubového charakteru. Tyto vady v provozu čerpadla snižují únavovou pevnost a dochází k praskání těles čerpadel. Jedná se o speciální případ obrábění, nástroj řeže přes vyvrtanou díru zpětného vysokotlakého ventilu. Pokud řeže do plného materiálu, k vibracím nedochází. Návrhy pro eliminaci vibrací nástroje postupně zahrnovaly změnu řezných podmínek, úpravy geometrie nástroje, úpravu strategií obrábění, případně kombinace zmíněných, žádná změna však nevedla k úplnému odstranění vibrací (kapitola 4.2). Při testech se stejnými podmínkami obrábění se v pozdější fázi objevily v sérii plochy, které vyhovovaly, společně s nevyhovujícími plochami. Hledání příčiny tohoto jevu vedlo k přeměření rozměrů nástrojů. Z protokolů vyplynulo, že technologie troval (omílání nástroje před povlakováním v abrazivu), která slouží pro úpravu ostří nástroje, není vhodná pro aplikaci na nástroji T6018, protože body ostří mají od osy nástroje proměnlivou vzdálenost a není tedy možné vyrobít stejné zaoblení po celé délce ostří. V operativních podmínkách bylo provedeno sražení řezné hrany pilováním a kartáčováním, přibližně na hodnoty těch nástrojů, které vyráběly kvalitní plochy LG. Tyto nástroje po nasazení do provozu vyráběly plochy bez stop po vibraci nástroje. Po této zkušenosti se přestala pro výrobu zaoblení ostří používat technologie troval a začalo se používat strojní kartáčování. Před zjištěním nevhodnosti trovalu se uvažovalo o změně nástrojového materiálu na slinutý karbid typu P, který by měl být houževnatější a lépe tlumit vibrace nástroje.

Změna konstrukce či materiálu nástrojů je pro jihlavský závod velmi náročným procesem, jak z hlediska nákladového, tak časového. Konstrukční oddělení sídlí v závodě v italském Bari, na změnách je třeba se dohodnout s tamní výrobou (také výroba čerpadel CP3) kvůli požadavkům zákazníků, kteří vyžadují totožný postup výroby.

Použité symboly

Symbol, zkratka, veličina	Vysvětlivka
CP3, CP4, CP5	Typ vysokotlakého čerpadla
DRV	Ventil pro regulaci tlaku paliva
OP50, OP60	Označení pro stanice linky
P [W]	Výkon
M [Nm]	Krouticí moment
n [min ⁻¹]	Otáčky
T5062, T6018	Označení nástroje
D [mm]	Průměr
SV	Sací ventil
LG	Lokální zafrézování
P _t [μm]	Výška profilu
k _c [N.mm ⁻²]	Měrný řezný odpor
v _c [m.min ⁻¹]	Řezná rychlost
f [mm.min ⁻¹]	Posuv
a _p [mm]	Hloubka třísky
h _z [mm]	Hloubka zpevnění
HM	Mikrotvrдость
l _p [mm]	Vzdálenost od povrchu
δ [°]	Úhel řezu
Ra [μm]	Drsnost profilu
VB [mm]	Velikost opotřebení
Q [J]	Teplo
ρ [mm]	Poloměr ostří
T [min]	Trvanlivost nástroje
H _n [HV]	Tvrдость podle Vickerse
NO	Nástrojová ocel
RO	Rychlořezná ocel
SK	Slinutý karbid
ŘK	Řezná keramika
t [°C]	Teplota
F _c [N]	Řezná síla
F _p [N]	Radiální síla
VBD	Vyměnitelná břitová destička
A [mm]	Amplituda kmitu
κ _r [°]	Úhel nastavení
r _ε [mm]	Poloměr špičky
α _o [°]	Úhel hřbetu
R _{ostří} [mm]	Rádus ostří

Použité zdroje

- 1 BOSCH DIESEL S.R.O. *Interní školící materiály: Vysokotlaké čerpadlo CP3*. Jihlava, 2010.
- 2 BOSCH DIESEL S.R.O., *Fotografie a protokoly z měření a testů, obrázky a grafy vytvořené při zpracování problematiky kvality ploch pozice 5*. Jihlava 2014 – 2015.
- 3 MAHR GMBH. Parametry drsnosti povrchu [online]. [cit. 2015-03-16]. Dostupné z: <http://www.mahr.cz/cs/Know-how/>
- 4 REIS, Leandro L. G., Washington M. da Silva JÚNIOR a Álisson R. MACHADO. *Effect of cutting speed and cutting fluid on the BUE geometry of a SAE 12L14 free machining steel*. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2007, **29**(2): 196-201. DOI: 10.1590/s1678-58782007000200009.
- 5 DE VOS, Patrik. *Příručka pro technology: Opatřebení se nevyhneme*. 2012, (6). Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-opotrebeni-se-nevyhneme.html>
- 6 MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999, 3 sv. (80, 84, 88 s.). ISBN 978-80-01-03752-2.
- 7 HOUDEK, Josef a Karel KOUŘIL. *Opatřebení břitů nástrojů ze slinutých karbidů*. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/opotrebeni-britu-nastroju-ze-slinutych-karbidu-2.html>
- 9 MÁDL, Jan. ČVUT. *Teorie obrábění*. 1. Praha: Nakladatelství ČVUT, 1989.
- 10 KVASNIČKA, Ivo, Vladimír SLAVÍK a Lubomír ŠTAJNOCHR. *Obráběcí nástroje*, Praha : sborník referátů. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 1998, 98 s. ISBN 80-010-1755-9.
- 11 FOLDR, Vojtěch: *Testování řezných nástrojů povlakovaných nanokrystalickými kompozity*. Vysoké učení technické v Brně. In: <http://www.vutbr.cz> [online]. 2009 [cit. 2015-05-17].
- 12 YAZMAN, Sakir, Ahmet AKDEMIR, Mesut UYANER a Baris BAKIRCIOGLU. *The Effect of Build Up Edge Formation on the Machining Characteristics in Austempered Ferritic Ductile Iron. Volume 2B: Advanced Manufacturing*. 2013. DOI: 10.1115/imece2013-63764.
- 13 SANDVIK COROMANT. *Vibrace: Jak předcházet vibracím* [online]. [cit. 2015-06-14]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/getting_started/general_guidelines/vibration/pages/default.aspx
- 14 SECO TOOLS. *Eliminujte vibrace a zvýšte produktivitu* [online]. [cit. 2015-06-14]. Dostupné z: http://www.secotools.com/CorpWeb/Czech%20Republic/bro%C5%BEury/CZ_BRO_Steadyline_brochure_A4_low%20res.pdf
- 15 MM SPEKTRUM. *Trendy v povlakování slinutých karbidů* [online]. 2001. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-povlakovani-slinutych-karbidu.html>
- 16 Kliment, Ondřej. *Parametry frézování ve společnosti Hettich*. Praha, 2013. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní.
- 17 WEINERT, Klaus, Tobias SURMANN, Dirk ENK a Oliver WEBBER. *The effect of runout on the milling tool vibration and surface quality*. Production Engineering. 2007, **1**(3): 265-270. DOI: 10.1007/s11740-007-0053-5. ISSN 0944-6524. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11740-007-0053-5>

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Závody společnosti Bosch Diesel Jihlava a výrobní program [1].....	3
Obrázek 2 - Schéma zapojení systému Common Rail [1]	4
Obrázek 3 - Hlavní části vysokotlakého čerpadla, částečný řez CP3 [1].....	5
Obrázek 4 - Schéma výrobní linky	5
Obrázek 5 - Obráběcí centrum GROB 550 BZ.....	6
Obrázek 6 - Schéma obrábění těles.....	6
Obrázek 7 – Schéma nástroje T5062 [1].....	7
Obrázek 8 - Schéma nástroje T6018 [1]	8
Obrázek 9 - Schéma výroby tělesa	9
Obrázek 10 - Polotovary těles, vlevo pro CNC a GROB, vpravo pro TFS [1]	9
Obrázek 11 - Upínací systémy, zleva CNC, GROB, TFS [1]	10
Obrázek 12 – Pozice 5, umístění v tělese. 1 – plochy sacího ventilu, 2 – válec pístu, 3 – odlehčení pístu (elementu), 4 - průnik kanálů (pozice 5), 5 – sedlo vysokotlakého ventilu, 6 – otvor pro vysokotlaký ventil, 7 – ústí V-kanálu [1].....	10
Obrázek 13 - Sled operací výroby sacího a vysokotlakého kanálu [1].....	11
Obrázek 14 - Fotografie pozice 5 bez lokálního zafrézování po obrábění načisto [2].....	11
Obrázek 15 - Sled operací výroby sacího a vysokotlakého kanálu s lokálním zafrézováním [1].....	12
Obrázek 16 - Fotografie pozice 5 s lokálním zafrézováním [2].....	12
Obrázek 17 - Rýha způsobená nárůstkem (vlevo), stopy po nástroji na ploše lokálního zafrézování (vpravo) [1]	13
Obrázek 18 - P profil získaný dotykovou metodou[3].....	13
Obrázek 19 - Drsnoměr MAHR S2 [2]	14
Obrázek 20 - Vyhovující přechody kanálů pozice 5 na výstupní kontrole. Bez lokálního zafrézování vlevo, s lokálním zafrézováním vpravo. Stav po výsledné kontrole. [2]	14
Obrázek 21 - Únik paliva trhlinou ve stěně tělesa [2]	15
Obrázek 22 - Trhlina tělesa. Vlevo v odlehčení sacího ventilu, vpravo těsnící plocha sacího ventilu [2]	15
Obrázek 23 - Místo řezu s primární (I.), sekundární (II.) a terciární (III.) oblastí deformace [9]	16
Obrázek 24 - Závislost měrného řezného odporu na řezné rychlosti [9]	16
Obrázek 25 - Závislost měrného řezného odporu na posuvu [9]	17
Obrázek 26 - Bodový (vlevo) a plošný styk (vpravo) nástroje a třísky [9]	17

Obrázek 27 - Průběh mikrotvrdosti s rostoucí hloubkou obrobku (h_z – hloubka zpevnění, l_p – vzdálenost od povrchu) [9].....	18
Obrázek 28 - Průběhy zbytkového pnutí v povrchové vrstvě. a) Vliv mechanického zatěžování, b) průběh teploty, c) vliv mechanického a tepelného zatěžování [9]	19
Obrázek 29 - Nárůstek na nástroji.....	20
Obrázek 30 - Závislost drsnosti plochy na velikosti řezné rychlosti [12].....	21
Obrázek 31 – Velikost nárůstku při obrábění různými rychlostmi [12].....	21
Obrázek 32 - Velikost opotřebení na délce, resp. čase obrábění [12]	22
Obrázek 33 – Závislost podílu jednotlivých složek odvodu tepla na zvyšování řezné rychlosti [9]	23
Obrázek 34 - Závislost měrného řezného odporu na úhlu řezu [9].....	24
Obrázek 35 - Závislost měrného řezného odporu na drsnosti řezných ploch nástroje [9]	24
Obrázek 36 - Závislost opotřebení na trvanlivosti broušeného a lapovaného břitu [6]	24
Obrázek 37 - Závislost tvrdosti řezných nástrojů na teplotě.....	25
Obrázek 38 - Schéma adhezně-únavového opotřebení nástroje [9]	26
Obrázek 39 - Směr a poměrná velikost difúze při obrábění za vysokých teplot [9].....	26
Obrázek 40 – Opotřebení hřbetní plochy nástroje otěrem [5]	27
Obrázek 41 - Výmol na čelní ploše VBD [5]	28
Obrázek 42 - opotřebení způsobené vyštípováním břitu [5]	28
Obrázek 43 – Plastická deformace břitu [5]	29
Obrázek 44 – Vrub na ostří.....	29
Obrázek 45 - Hřebenové trhliny na ostří nástroje [5]	30
Obrázek 46 - Poškození neřezné části nástroje působením třísky [5].....	30
Obrázek 47 - Opotřebení břitu křehkým lomem [5].....	31
Obrázek 48 - Náchylnost břitu k různým druhům opotřebení při změně řezných parametrů [5]	31
Obrázek 49 - Závislost amplitudy samobuzeného kmitání na úhlu nastavení [9].....	33
Obrázek 50 - Závislost amplitudy samobuzeného kmitání na poloměru špičky [9].....	33
Obrázek 51 - Závislost amplitudy (vlevo) a hloubky třísky (vpravo) na úhlu řezu, resp. úhlu čela [9]..	34
Obrázek 52 - Závislost amplitudy samobuzeného kmitání na úhlu hřbetu [9]	34
Obrázek 53 - Závislost amplitudy samobuzeného kmitání na řezné rychlosti [9].....	35
Obrázek 54 - Závislost amplitudy samobuzeného kmitání na posuvu (vlevo) a hloubce třísky (vpravo) [9]	35
Obrázek 55 – Vliv úhlu nastavení κ_r na stabilitu obrábění a tloušťku odřezávané vrstvy [13].....	36
Obrázek 56 - Postupné prodlužování nástroje pro obrábění ve velkých hloubkách [13]	37
Obrázek 57 – Doporučený směr dráh nástroje [13].....	37
Obrázek 58 – Držák bez tlumičů technologie (vlevo), s tlumičem vibrací (vpravo) [14]	38

Obrázek 59 - Schéma nástroje T5062 [2]	39
Obrázek 60 - Výška profilu Pt [μm] plochy SV zkušebních vzorků - hlava 1, test 1.1 [2]	40
Obrázek 61 - Výška profilu Pt [μm] plochy SV zkušebních vzorků - hlava 2, test 1.1 [2]	40
Obrázek 62 – Výška profilu Pt [μm] plochy SV zkušebních vzorků - hlava 3, test 1.1 [2].....	40
Obrázek 63 - Fotografie ploch odlehčení SV po provedení návrhu 1.1 [2]	41
Obrázek 64 – Výška profilu Pt [μm] plochy SV zkušebních vzorků - hlava 1, test 1.2 [2].....	43
Obrázek 65 - Výška profilu Pt [μm] plochy SV zkušebních vzorků - hlava 2, test 1.2 [2]	43
Obrázek 66 - Výška profilu Pt [μm] plochy SV zkušebních vzorků - hlava 3, test 1.2 [2]	43
Obrázek 67 - Fotografie ploch odlehčení SV po provedení návrhu 1.2 [2]	44
Obrázek 68 - Výška profilu Pt [μm] plochy SV zkušebních vzorků - hlava 1, test 1.3 [2]	46
Obrázek 69 - Výška profilu Pt [μm] plochy SV zkušebních vzorků - hlava 2, test 1.3 [2]	46
Obrázek 70 - Výška profilu Pt [μm] plochy SV zkušebních vzorků - hlava 3, test 1.3 [2]	46
Obrázek 71 - Fotografie ploch odlehčení SV po provedení návrhu 1.3 [2]	47
Obrázek 72 - Výška profilu Pt [μm] plochy SV zkušebních vzorků - Hlava 1, test 2.1 [2]	51
Obrázek 73 - Výška profilu Pt [μm] plochy SV zkušebních vzorků - Hlava 2, test 2.1 [2]	51
Obrázek 74 - Výška profilu Pt [μm] plochy SV zkušebních vzorků – Hlava3, test 2.1 [2]	51
Obrázek 75 - Výška profilu Pt [μm] plochy SV zkušebních vzorků – hlava1, test 2.2 [2].....	53
Obrázek 76 - Výška profilu Pt [μm] plochy SV zkušebních vzorků – hlava2, test 2.2 [2].....	53
Obrázek 77 - Výška profilu Pt [μm] plochy SV zkušebních vzorků – hlava3, test 2.2 [2].....	53
Obrázek 78 – Schéma konstrukční změny I, zvětšení průměru tvaru zápichu na D_3 [2]	55
Obrázek 79 – Schéma konstrukční změny II, zvětšený poloměr špičky na průměru D_3 [2]	55
Obrázek 80 - Úprava nástroje pro návrh 1 [2].....	56
Obrázek 81 - Plocha lokálního zafrézování, výsledky návrhu 1 [2].....	57
Obrázek 82 - Plocha lokálního zafrézování, výsledky návrhu 2 [2]	59
Obrázek 83 – Plocha lokálního zafrézování, výsledky návrhu 3 [2].....	61
Obrázek 84 - Plochy lokálního zafrézování, výsledky návrhu 4 [2]	63
Obrázek 85 - Plocha lokálního zafrézování, varianty 1 až 5 z návrhu 5 [2]	65
Obrázek 86 - Plocha lokálního zafrézování, varianty 6, 7 z návrhu 5 [2].....	66
Obrázek 87 - Místa měření trovalu na nástroji T6018 [2]	67
Obrázek 88 - Plocha LG rozdělená podle označených oblastí nástroje [2]	67
Obrázek 89 - Fotografie břítu nástroje T6018 [2].....	68
Obrázek 90 - Plochy vyrobené nástroji z tabulky 7 [2]	69