

Studium problematiky obrábění plastů vodním paprskem

Radek Majzlík

Bakalářská práce
2005



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Vložit oficiální zadání diplomové práce

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Daně Shejbalové za odborné vedení, ochotně poskytnuté rady, cenné připomínky a soustavnou pozornost a pomoc, kterou mi při vypracování bakalářské práce věnovala.

Souhlasím s tím, že s výsledky mé práce může být naloženo podle uvážení vedoucího diplomové práce a ředitele ústavu. V případě publikace budu uveden jako spoluautor.

Prohlašuji, že jsem na celé diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Ve Zlíně, 07. 06. 2005

.....

podpis diplomanta

RESUMÉ

Anotace česky

V této bakalářské práci jsou shrnuty poznatky o obrábění plastů vodním paprskem. Byla vyšetřována závislost šířky vzorků z PMMA a z PVC při různých řezných rychlostech a závislost drsnosti vzorků z PMMA a z PVC rovněž při různých řezných rychlostech. Drsnost byla měřena v podélném a příčném směru. Pro zhodnocení rozměrové přesnosti jednotlivých vzorků bylo využito metody Precontrol.

Anotace ve světovém jazyce

This bachelor thesis includes the current knowledge about working of plastic materials by means of water rays. The dependance of the width of PMMA and PVC samples on different cutting speeds was researched and the dependance of roughness of PMMA and PVC samples on different cutting speeds as well. The roughness of surface was measured in the lengthwise and transversal direction. Method Precontrol was used for valuating dimension accuracy of individual samples.

OBSAH

OBSAH	5
ÚVOD	7
I. TEORETICKÁ ČÁST	8
1 VÝCHOZÍ TEORETICKÉ POZNATKY	9
1.1 NEKONVENČNÍ METODY ŘEZÁNÍ MATERIÁLU	9
1.2 ŘEZÁNÍ LASEREM	9
1.3 OBRÁBĚNÍ PAPERSEM PLAZMY	10
1.4 OBRÁBĚNÍ SVAZKEM PAPERSEK ELEKTRONŮ	11
2 HISTORIE VODNÍHO PAPERSEK	12
3 POUŽITÍ TECHNOLOGIE	13
3.1 POROVNÁNÍ S KLASICKÝMI TECHNOLOGIEMI	13
3.2 PODSTATA ŘEZÁNÍ VODNÍM PAPERSEM	14
3.3 POUŽÍVANÉ BRUSIVO PŘI OBRÁBĚNÍ VODNÍM PAPERSEM A JEHO VLIV NA HLOUBKU ŘEZU	15
3.4 VLASTNOSTI OPRACOVANÉHO POVRCHU VODNÍM PAPERSEM	16
3.5 TVARY, GEOMETRIE ŘEZU A EFEKTIVITA ŘEZÁNÍ	17
3.5.1 Řezané tvary vodním paprskem	17
3.5.2 Geometrie řezu	19
3.5.3 Efektivita řezání	20
3.6 VLIV VZDÁLENOSTI TRYSKY NA PARAMETRY ŘEZÁNÍ	21
3.7 VLIV SÍLY ŘEZÁNÍ NA VZDÁLENOSTI TRYSKY OD MATERIÁLU	24
3.8 VLIV TLAKU A ŘEZACÍ SÍLY PŘI URČITÉM PRŮMĚRU TRYSKY D_T A VZDÁLENOSTI L	24
3.9 VLIV MECHANICKO – FYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLU NA VELIKOST ŘEZACÍ SÍLY A DALŠÍ PARAMETRY	26
3.10 CELKOVÉ ZÁVISLOSTI	26
4 PŘÍKLADY VYUŽITÍ VODNÍHO PAPERSEK	28
5 OBLASTI VYUŽITÍ VODNÍHO PAPERSEK	30
6 STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	31

II. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	32
7 MATERIÁLY A JEJICH CHARAKTERISTIKA.....	33
7.1 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	34
7.1.1 Zhotovení zkušebních těles vodním paprskem.....	34
7.2 POPIS ZKUŠEBNÍHO TĚLÍSKA.....	35
7.3 POUŽITÁ EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ	36
7.4 PROVEDENÍ ZKOUŠEK	37
7.4.1 Měření drsnosti povrchu řezné plochy	37
7.4.2 Popis metody PRECONTROL	38
7.4.2.1 Hlavní přednosti metody PRECONTROL	39
7.5 NAMĚŘENÉ HODNOTY A ZÁVISLOSTI U VZORKŮ NAŘEZANÝCH VODNÍM PAPERSEM	40
7.5.1 Vyhodnocení závislosti šířky řezu na řezné rychlosti.....	40
7.5.2 Vyhodnocení závislosti drsnosti na řezné rychlosti.....	46
7.5.2.1 Porovnání PVC desky s deskou z PERTINAXU	51
7.5.3 Aplikace metody Precontrol.....	52
ZÁVĚR	56
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	58
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	59
SEZNAM OBRÁZKŮ	61
SEZNAM TABULEK	63

ÚVOD

V každodenním životě se přesvědčujeme o potřebě zvyšování automatizace, o nutnosti hledání nových technik a metod sloužících k zjednodušení a urychlení výrobních procesů. Trend zvyšování automatizace efektivnosti výrobního procesu je spojený také s rozvojem a využitím nových nekonvenčních metod ve výrobě. Aplikace novodobých materiálů rozšiřuje oblasti zpracování a použití, ve kterých klasické metody nejsou ekonomicky výhodné nebo způsobují problémy v kvalitě, případně je nemůžeme vůbec použít. Jsou to například díly zápusťek, řezných a tvářecích nástrojů ze slinutých karbidů a speciálních ocelí, patří sem také tvarové dílce technologických zařízení, zvláště forem pro zpracování plastů. Tyto výrobky obrábíme tzv. nekonvenčními technologiemi, tj. metodami založenými na jiném než mechanickém způsobu oddělování třísky.

Nekonvenční metody jsou založené převážně na využití fyzikálních nebo fyzikálně – chemických principech úběru materiálu, při současném bezsilovém působení na obráběný materiál. Ve většině případech se tyto způsoby obrábění stávají jediným možným řešením progresivní výroby.

Zavádění nekonvenčních metod obrábění do výroby je však doprovázeno také množstvím problémů. To je zapříčiněné nedostatkem informací o samotných možnostech aplikací do praxe, také primárními nedostatky nekonvenčních metod obrábění (malá produktivita, vysoká pořizovací cena strojů, energetická náročnost některých způsobů).

V mé práci se zabývám obráběním plastů pomocí vodního paprsku. Tento způsob obrábění je znám již několik let, na opracovávání materiálu se začal používat až začátkem roku 1970 pro dělení dřeva a plastů.

Mezi další nekonvenční způsoby obrábění patří např. řezání laserem, plazmou, svazkem elektronů.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 VÝCHOZÍ TEORETICKÉ POZNATKY

1.1 Nekonvenční metody řezání materiálu

1.2 Řezání laserem

Princip laseru je založen na soustředění vysoké koncentrace elektromagnetického záření viditelného světla na malou plochu obrobku. Tato energie se přemění na tepelnou energii. Teplota v místě dopadu přesahuje teplotu tavení obráběného materiálu a ten se roztaví a vypaří. Zdrojem světla jsou kvantové zesilovače paprsků světla – lasery. Paprsek vyzařovaný z laseru se optickou čočkou soustředí na malou plochu obrobku ($0,001-0,01\text{mm}^2$), na níž se vyvine tak velká teplota, že způsobí vypaření kovu.

Výhody řezání :

- Vysoká přesnost řezaných dílů u slabých a středních tloušťek materiálu
- Řezání velmi malých otvorů, úzkých pásků, ostroúhlých tvarů; výroba komplexních obrysových dílů
- Pravoúhlá řezná hrana
- Velmi malé přivedené teplo, žádné deformace obráběného předmětu
- Velmi malá šířka řezné spáry (0,2 - 0,4 mm)
- Vysoká řezná rychlost u tenkých materiálů

Nevýhody řezání :

- Vysoké investiční a provozní náklady (vysoká spotřeba plynů)
- U středně tlustých materiálů žádná přímá hladká řezná plocha
- Nutné přesné řízení vzdálenosti k povrchu obrobku
- Omezení stability paprsku u řezání konstrukční oceli s obsahem Si a P
- Snížení stability procesu u řezání lesknoucích se povrchů materiálu
- Menší účinnost (CO_2 -laser max. 10%)

1.3 Obrábění paprskem plazmy

Plazma je tepelný vysoce žhavý, elektricky vodivý plyn z pozitivních a negativních iontů, elektronů a také vybuzených a neutrálních atomů a molekul.

Jako plazmový plyn může být používán jednoatomový argon a nebo dvouatomové plyny vodíku, dusíku, kyslíku a vzduchu. Tento plazmový plyn se ionizuje a disociuje energií plazmového oblouku. Rekombinací atomů a molekul mimo plazmovou trysku systému plazma prudce uvolní přijatou energii a umocňuje tepelný účinek paprsku plazmatu na obráběný předmět.

Zpravidla je plazmová tryska dodatečně chlazená vodou. Díky tomu může hustota energie v paprsku plazmatu dosáhnout hodnoty až $2 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$. Díky vysoké teplotě plazma expanduje a proudí s nadzvukovou rychlostí ve směru obráběného předmětu (anoda). V plazmovém oblouku vznikají teploty až $30\,000^\circ\text{C}$, ve spojení s vysokou kinetickou energií paprsku plazmatu může být použita velmi vysoká řezná rychlost v závislosti na materiálu a tloušťce u všech elektricky vodivých materiálů.

Pro řezací proces je nejdříve zapálen pilotní oblouk mezi tryskou a katodou prostřednictvím vysokého napětí. Tento energeticky slabší pilotní oblouk připraví částečně ionizací dráhu mezi plazmovým hořákem a obráběným předmětem. Dotykem pilotního oblouku s obráběným předmětem (letmé naříznutí, letmý propich) je automaticky zvýšen výkon hlavního oblouku.

Výhody řezání :

- ✖ Provoz jednoho a více hořáků podle série
- ✖ Řezání všech elektricky vodivých materiálů
- ✖ Vynikající schopnost řezání u slabých a středních tloušťek konstrukční oceli (do 30mm)
- ✖ Řezání vysoce pevné konstrukční oceli s menším tepelným příkonem
- ✖ Libovolné zpracování kvalitního řezu u středních a silných rozměrů plechů s technologií vířivého plynu ve spojení s technickými plyny
- ✖ Velmi dobrá automatizace

1.4 Obrábění svazkem paprsku elektronů

Podstatou této metody je využití vysoké energie paprsku elektronů, soustředěných na velmi malou plochu materiálu. V místě dopadu se kinetické energie přemění na energii tepelnou, která materiál roztaví a odpaří. Obrobek je při práci uložen ve vakuové komoře z korozivzdorné oceli. Touto metodou lze vrtat otvory průměru 0,01 až 0,8mm s tolerancí 0,005mm např. pro výrobu děr ložiskových kamenů do hodinek. Dále lze materiály řezat, drážkovat a svařovat.

2 HISTORIE VODNÍHO PAPRSKU

V přírodě se síla vody po milióny let projevuje ve formě eroze. Existuje mnoho příkladu této síly při vymílání břehů řek, vytváření kaňonů. Technologie prakticky využívající sílu vody jsou staré tisíce let. Dříve, ale i dnes, se voda používala na přepravu dřeva, hlíny, šterku.

Ve třicátých letech dvacátého století američtí a sovětsí inženýři prováděli první pokusy s aplikací vysokorychlostní vody v dolech na přepravu kamenů a uhlí.

Velkým skokem ve vývoji této technologie byl konec šedesátých let. Tehdy americký vesmírný průmysl řešil problém řezání speciálních kompozitních a sendvičových materiálů. Vesměs se jedná o materiály, které jsou klasickými technologiemi (řezání autogenem, ocelovou pilou, frézování ...) velmi těžko opracovatelné nebo dokonce neopracovatelné. Optimálním řešením se ukázalo použití vysokotlakého vodního paprsku.

V dnešní době se technologie vysokotlaké vody používají nejen na řezání libovolného druhu materiálu, ale i na čištění a úpravy povrchů, bezvýkopové kladení potrubí (technologie mikrotunelování).

Technologie řezání rozličných materiálů vysokotlakým vodním či hydroabrazivním paprskem byla vyvíjena od přelomu sedmdesátých a osmdesátých let v USA, zpočátku především pro vojenský a kosmický program. Již v 2. polovině osmdesátých let byla široce uplatňována především v americkém a posléze západoevropském teritoriu. Dnes se celosvětově rozšiřuje do všech oblastí průmyslu. Podstatou této metody dělení materiálů je obrušování děleného materiálu čistou tlakovou vodou bez a nebo s příměsí abrazivních materiálů v předem stanoveném místě a v předem stanoveném tvaru výrobku.

3 POUŽITÍ TECHNOLOGIE

Vysokotlaké řezání vodním paprskem má široké uplatnění nejen ve strojírenství, ale i ve stavebnictví.

Pro průmyslové účely se používají pevná pracoviště. Tato pracoviště se skládají z vysokotlaké pumpy a CNC stolu. Výhodou těchto pracovišť je velká přesnost (opakovatelná $\pm 0,1\text{mm}$) a kvalita (často odpadá i následné opracování) polotovaru. Protože se jedná o počítačově řízený proces, může být hotový polotovar obecného tvaru. Nevýhodou je, že nejsou mobilní. Přednosti tohoto druhu pracovišť (přesnost a kvalita řezu) využívají i stavební firmy při vytváření různých obrazů a firemních log do dlažby (u této práce je vodní paprsek prakticky nenahraditelný). Další využití má při výrobě schodišť, nosníků, krytů. Pro stavební účely se používají mobilní pracoviště. Tato pracoviště se skládají z mobilní vysokotlaké pumpy a demontovatelných pojezdových drah. Tato pracoviště nebývají řízená počítačem, proto dokáží pouze rovný řez (obdélníkové otvory).

3.1 Porovnání s klasickými technologiemi

Za klasické technologie dělení a řízené řezání materiálů se dají považovat tyto:

1) tepelné: Pro řezání se používá acetylen-kyslíkový plamen a plazma. Tyto metody se většinou používají k dělení jen kovů. Cena řezu bývá poměrně nízká, ale kvalita řezu odpovídá ceně, protože se většinou jedná o ruční řezání. Následné opracování a vylepšení povrchu bývá při použití tepelných metod řezání značně ztíženo, protože kraje řezu se při řezání zakalí. Tento problém se u řezání vodním paprskem nevyskytuje a lze řezat i velmi tenké pásy.

2) mechanické: Pro řezání (dělení) se používá jiné těleso působící na dělený materiál. Těmito metodami jsou řezání kotoučovými a pásovými pilami a frézování. Používání těchto technologií bývá u menších tloušťek řezaného materiálu levnější.

Použití vodního paprsku bývá levnější s rostoucí tloušťkou a délkou řezu. Zda použít klasické technologie dělení materiálů nebo vodní paprsek, musí zvážit zákazník. Všechny technologie mají svá pro i proti. Při nasazení vodního paprsku si můžeme být jisti, že se uřízne vše v požadované kvalitě.

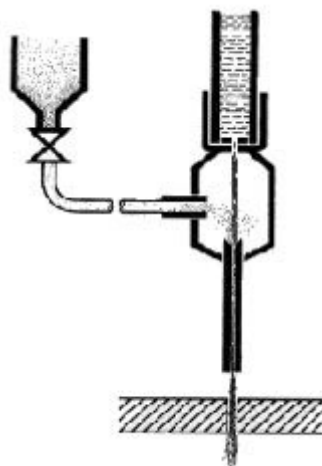
3.2 Podstata řezání vodním paprskem

Podstatou této metody dělení materiálů je obrušování děleného materiálu tlakem vodního paprsku. Pracovní tlak vody se pohybuje kolem 400MPa. Tlakovým zdrojem jsou speciální vysokotlaká čerpadla, která se liší příkonem (9 - 75kW) a průtokem vody (1,2 - 7,6 l/min) Paprsek vzniká v řezací hlavě zakončené tryskou. Při zpracování měkkých materiálů používáme čistý vodní paprsek (Obr. 2.), pro ostatní případy je třeba použít abrazivní paprsek (Obr. 1.).

Vhodnou příměsí je přírodní olivín nebo granát - abrazivo zvolené dle tvrdosti řezaného materiálu. Pohyb řezací hlavy a tedy celá dráha řezu je řízena počítačem dle předem sestaveného programu. Je možné provádět i tvarově složité řezy během jedné operace. Standardní přesnost výřezu je $\pm 0,2\text{mm/m}$. Dělený materiál není silově namáhán. Řezná hrana není nijak tepelně ovlivněna, vždy se jedná o studený řez.

Tato skutečnost je velmi důležitá a také rozhodujícím způsobem odlišuje vodní paprsek od ostatních technologií na dělení materiálů, zvláště laseru a mikroplazmy. Po provedení řezu se směs vody a abraziva zachycuje v lapači (vaně), umístěné pod řezaným materiálem.

Metoda využívá účinku tenkého vysokotlakého vodního paprsku, kterým můžeme obrábět jakýkoliv technický materiál. Vodní paprsek může mít tlak až 500MPa (pro srovnání tlak ve vodním potrubí je 0,5 až 0,7MPa, požárníci používají tlak kolem 1MPa).



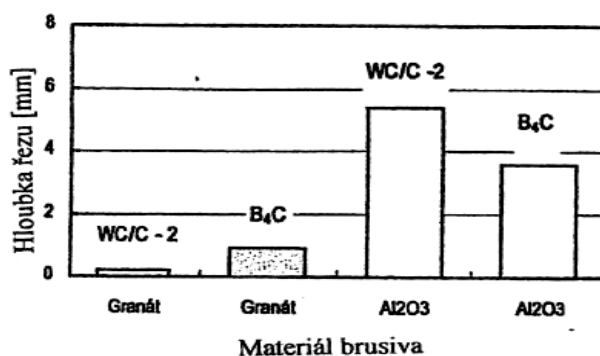
Obr. 1. Řezání s abrazivem



Obr. 2. Řezání bez abraziva

3.3 Používané brusivo při obrábění vodním paprskem a jeho vliv na hloubku řezu

Samozřejmě na hloubku řezu má vliv druh používaného brusiva a jeho tvrdost, jak to znázorňuje závislost na (Obr. 3), kde jsou porovnané nejčastěji používané druhy brusiv, relativně měkký granát a tvrdý oxid hlinitý. Je zajímavé, že karbid wolframu je při řezání s použitím granátového brusiva odolnější, vykazuje menší hloubku řezu než tvrdý karbid bóru. Při použití oxidu hlinitého jako brusiva je trend opačný.



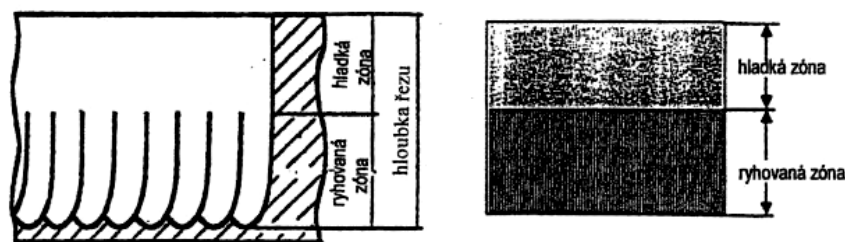
Obr. 3. Závislost hloubky řezu na materiálu brusiva

Volba druhu brusiva ovlivňuje několik faktorů:

- opotřebení hubice je nižší, jak se použije měkčí a tím i lacinější brusivo jako je křemíkový písek, než při použití tvrdšího a dražšího granátu nebo oxidu hlinitého
- výběr materiálu brusiva má vliv na životní prostředí, technicky a ekonomicky vhodné materiály nejsou vždy příznivé pro svoje okolí, brusivo je potřebné volit s ohledem na bezpečné požadavky a zdravotní požadavky nezávadnosti brusiv
- recyklace brusiv, což je požadavkem pro ekonomickou výrobu, vyžaduje orientaci na volbu zvláštních druhů brusných částic, při kterých se minimalizuje lom částice, klasické druhy brusiv jako je křemičitý písek v procesu mění na prášek a nejsou vhodné na recyklaci

3.4 Vlastnosti opracovaného povrchu vodním paprskem

Jako všechny vysokoenergetické paprskové technologie, tak i vodní paprsek zanechává viditelné rýhování na obrobené ploše. To výrazně ovlivňuje rozměrovou přesnost obrobené plochy a kvalitu dokončeného povrchu. Povrch po řezání se skládá ze dvou různých oblastí: z hladké zóny a rýhované zóny.



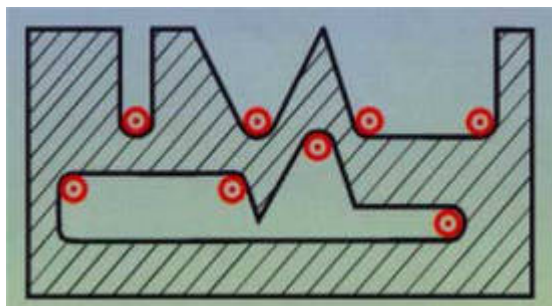
Obr. 4. Dvě zóny vznikající při řezání vodním paprskem

Když paprsek proniká do materiálu, ztrácí postupně svoji kinetickou energii a vychyluje se, tím se tvoří dvě typické zóny. Relativně hladká oblast je výsledkem zóny řezného opotřebení a druhá rýhovaná oblast vzniká jako důsledek deformačního opotřebení při řezání.

3.5 Tvary, geometrie řezu a efektivita řezání

3.5.1 Řezané tvary vodním paprskem

Lze řezat veškeré tvary, které je možno v konečné podobě převést do počítačového CAD formátu *.dwg a *.dxf, které respektují kruhový průřez paprsku, [vodní paprsek $d = 0,15 - 0,30\text{mm}$, hydroabrazivní paprsek $d = 0,8 - 1,5 (2,0)\text{mm}$] jak znázorňuje (Obr. 5).



Obr. 5. Tvarová omezení řezu v ostrých vnitřních úhlech vlivem kruhového průřezu paprsku

Řezání vodním paprskem se využívá např. při řezání nápisů, log apod. pro reklamní a prezentační účely z nejrůznějších materiálů (Obr. 6., 7.)



Obr. 6. Ukázka nápisu řezaného paserem



Obr. 7. Ukázka loga řezaného paserem

Řezání skel (vyjma kalených) do jakýchkoli složitějších tvarů včetně skel lepených, zrcadel apod. (Obr. 8., 9., 10., 11.).



Obr. 8. Ukázka skleněného vzorku řezaného paserem



Obr. 9. Ukázka skleněného vzorku řezaného paserem



Obr. 10. Ukázka skleněného vzorku řezaného paserem

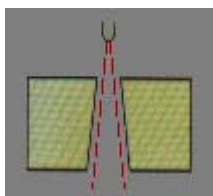


Obr. 11. Ukázka skleněného vzorku řezaného paserem

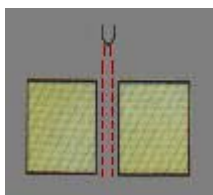
Tloušťka řezu závisí na tvrdosti, houževnatosti materiálu, požadavku na přesnost a kvalitu řezu v celé tloušťce materiálu.

3.5.2 Geometrie řezu

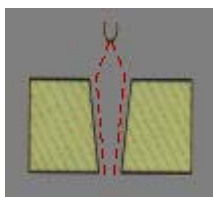
Ve většině případů při řezání vodním či hydroabrazivním paprskem úkos vzniká, většinou však maximálně 1-1,5 stupně.



A. - Velmi pomalý řez nebo řez v měkkém materiálu - paprsek stihne "probrousit" svou přirozenou kuželovitou stopu.



B. - Optimální rovnováha mezi rychlostí řezu, odolností a tloušťkou materiálu - paprsek je udržen po celou dobu průchodu materiálem ve válcovitém tvaru a úkos nevzniká.



C. - Velmi rychlý řez nebo řez v odolnějším materiálu - paprsek nestihne "probrousit" materiál ani ve svém vstupním průměru a řez se směrem dolů uzavírá

Obr. 12. Úkosy při řezání vodním paprskem

Vznik a rozsah úkosu ovlivňuje i tvar řezu, množství abraziva apod.

3.5.3 Efektivita řezání

Vlastní efektivita procesu řezání materiálů paprskem kapaliny je funkcí tří skupin proměnných veličin.

1. Veličiny, které vyznačují energetické parametry paprsku:

- tlak výtoku,
- průměr trysky,
- vzdálenost mezi ústím trysky a opracovávaným materiálem.

2. Mechanicko-fyzikální vlastnosti opracovávaných materiálů, které charakterizují odpor materiálu proti jeho rozrušení.

3. Veličiny určující objem rozrušeného materiálu v zóně řezání za jednotku času:

- rychlost přemístění materiálu ve vztahu k paprsku,
- tloušťka opracovávaného materiálu,
- šířka řezu.

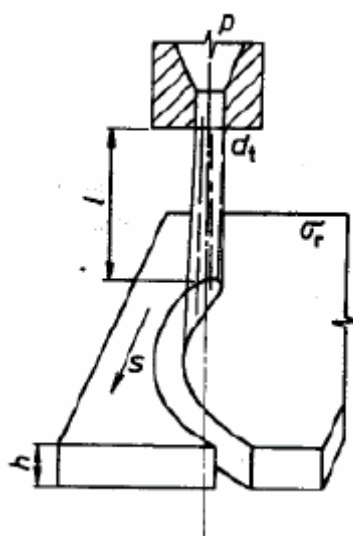
Šířka řezu závisí na

- průměru trysky
- vzdálenost mezi tryskou a materiálem

3.6 Vliv vzdálenosti trysky na parametry řezání

Značný vliv na produktivitu práce při řezání materiálu paprskem kapaliny má vzdálenost mezi ústím trysky a opracovávaným materiálem.

Při zvětšování vzdálenosti l (Obr.13) bývá posuv materiálu vzhledem k paprsku do určité vzdálenosti konstantní, potom se zhruba lineárně zmenšuje. Zvětší-li se průměr trysky, zajistí se maximální produktivita řezání na větších vzdálenostech. Zároveň se však zmenší absolutní hodnota posuvu.



Obr. 13. Schéma vyřezávání listového materiálu paprskem kapaliny

σ_P hodnota vlastnosti materiálu (pevnost materiálu)

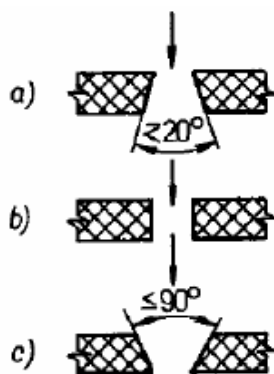
p tlak při výtoku z trysky

d_t průměr trysky

l výška trysky nad povrchem materiálu

s posuv materiálu (trysky)

Zvětší-li se vzdálenost mezi tryskou a materiálem, zvětšuje se šířka řezu a zhoršuje se jakost opracovávaného povrchu a geometrie řezu (Obr. 14.).



*Obr. 14. Schéma formování v závislosti
na poloze vodní trysky vzhledem k materiálu*

Při řezání materiálu o tloušťce 2mm paprsek emulze, který vytéká z trysky o průměru 0,12mm pod tlakem 220MPa a ve vzdálenosti od trysky 4mm, nabývá povrch řezu tvaru lichoběžníku s delší spodní základnou (Obr.14.a). Sklon bočních stran lichoběžníka není větší než 20° . Na dolní části povrchu řezu se vyskytují lokální trhliny materiálu.

Zvětší-li se vzdálenost mezi tryskou a materiálem až do 8mm pro tlak 200MPa a průměr trysky 0,21mm, je povrch řezu pravoúhlý s rovnými kraji (Obr. 14.b). Nerovnosti na povrchu řezu nevznikají.

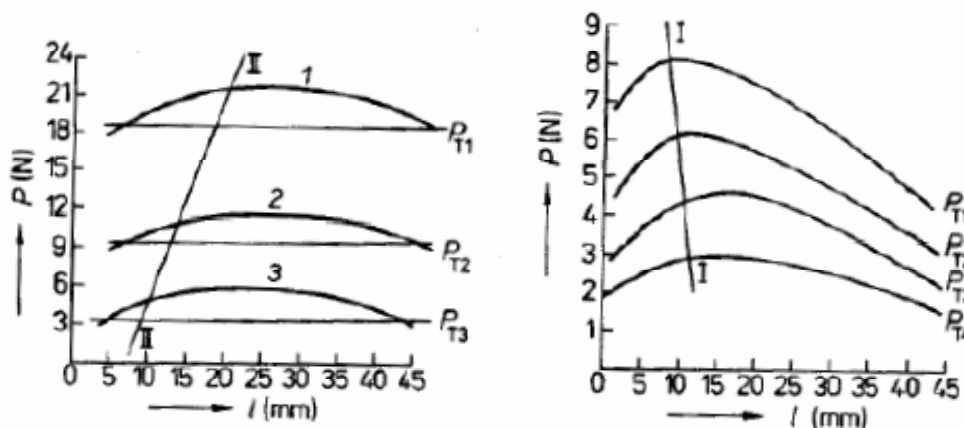
Další zvětšení vzdálenosti při tlaku 180MPa a průměru trysky 0,29mm opět mění povrch řezu a vzniká tvar řezu s lichoběžníkem, který má delší horní základnu. Úhel sklonu bočních stran lichoběžníka se zvětšuje s rostoucí vzdáleností trysky a dosahuje úhlu 90° (Obr. 14.c).

Změna geometrie řezu a zvětšování jeho šířky jsou důsledkem toho, že kapalina je při výtoku z trysky pod vysokým tlakem a paprsek v blízkosti trysky se rozšiřuje, aniž se rozpadá. Přitom se paprsek při vzájemném styku s materiálem rozrušuje v osové a radiálním směru, přičemž širší základna lichoběžníku je dole.

Zvětšuje-li se vzdálenost trysky od materiálu, zmenšuje se kuželovitost a paprsek se stabilizuje. Řez je rovný s rovnými okraji. Při dalším zvětšení vzdálenosti mezi materiálem a tryskou se paprsek rozpadá a rozrušuje se jádro paprsku. Zmenšuje se kinetická energie paprsku, proto paprsek odnáší povrchový materiál více než materiál řezu ve spodní části a vzniká vlnitý tvar povrchu řezu s větší horní základnou lichoběžníku.

Často se volí trysky, které vytváří dva paprsky řezu. Tak se zlepšují podmínky hlavně pro posuv při řezání.

3.7 Vliv síly řezání na vzdálenosti trysky od materiálu



Obr. 15. Graf závislosti mezi tryskou a opracovávaným materiálem a silou působení vodního paprsku, (1,2,3 – různé druhy materiálů)

l.....vzdálenost mezi tryskou a opracovávaným materiálem

P..... síla působení vodního paprsku

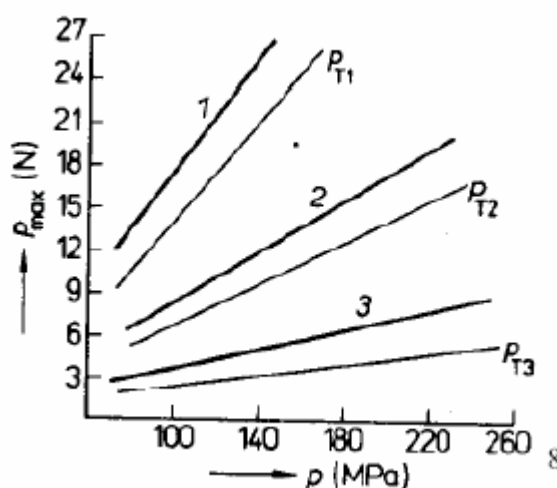
Z grafu funkcí $P - f(l)$, které jsou na (Obr. 15.), je zřejmé, že se zvětšováním vzdáleností mezi tryskou a materiálem síla řezání napřed vzrůstá až do určité hodnoty l , kde $P = P_{\max}$, a potom se zhruba lineárně zmenšuje. Hodnota síly $P_{\max}$ tedy odpovídá optimální vzdálenosti l_{opt} . Zvětšuje-li se tlak výtoku proudu kapaliny, má optimální vzdálenost l_{opt} snahu se zmenšovat (přímka I) a se zvětšením průměru trysky se naopak zmenšuje (přímka II). Na (Obr. 15.) jsou také zobrazeny teoretické hodnoty P_T pro síly působení pro daný rozsah tlaku a průměr trysek.

3.8 Vliv tlaku a řezací síly při určitém průměru trysky d_t a vzdálenosti l

Pro nejlepší využití paprsku kapaliny pro řezání byl pro l_{OPT} odvozen vztah:

$$l_{\text{OPT}} = 148 \cdot \left(\frac{P}{1000} \right)^{0,55} \cdot d_t^{0,75} \cdot e^{-1,1}$$

Kde l_{OPT}optimální délka při řezání paprskem
 ptlak působení paprsku kapaliny
 d_tprůměr trysky
 ekonstanta 2,7



Obr.16. Graf matematické závislosti sil působení
 vodního paprsku na materiál
 (1,2,3 – různé druhy materiálů)

P_{MAX} síla řezání

P tlak působení paprsku kapaliny

P_{T1}, P_{T2}, P_{T3}teoretické hodnoty pro daný rozsah tlaku a průměr trysek

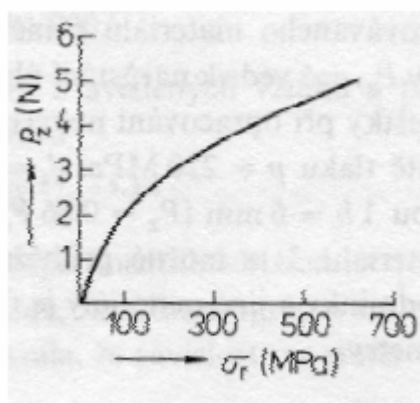
Pro stanovení závislosti tlaku paprsku na řezací síle P_{max} a pro získání matematického vztahu mezi těmito veličinami byly použity tlaky $p = 80$ až 220 MPa pro trysky s průměrem $0,12$; $0,21$ a $0,29$ mm při vzdálenostech l_{opt} . Výsledky jsou zřejmé z (Obr. 16.).

Platí vztah:

$$P_{max} = 12,6 \cdot \left(\frac{p}{1000} \right)^{1,15} \cdot d_t^{1,75}$$

3.9 Vliv mechanicko – fyzikálních vlastností materiálu na velikost řezací síly a další parametry

Při studiu vlivu mechanicko – fyzikálních vlastností materiálu byla zkoumána řada vlivů standardních pevnostních charakteristik na hodnotu osové síly řezání, která určuje stupeň opracování materiálu. Síla řezání závisí na pevnosti materiálu v tahu, jak je vidět z (Obr. 17.), dále pak na pevnosti materiálu v tlaku, modulu pružnosti materiálu a na tvrdosti materiálu.



Obr.17. Graf závislosti síly řezání na pevnosti materiálu v rozrušení σ_P

P_z osová síla řezání

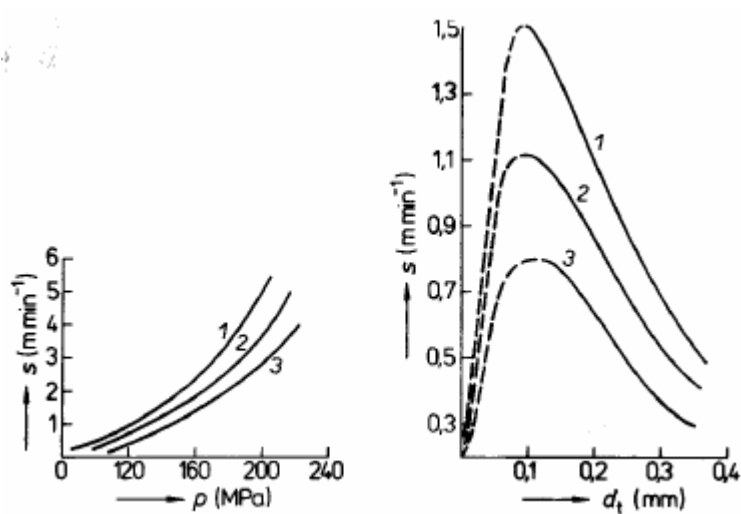
σ_P hodnota vlastnosti materiálu (pevnost materiálu)

3.10 Celkové závislosti

Jako další příklad lze vyjádřit pro určité typy materiálů a způsob experimentu závislost osové síly řezání P_z na ostatních parametrech řezání, tj. na tlaku, na geometrii trysky, výšce a posuvu řezání. Takovýto empirický vztah má tvar:

$$P_z = 933 \cdot \left(\frac{p}{1000} \right)^{5,2} \cdot d_t^{2,2} \cdot \left(\frac{\sigma_r}{1000} \right)^{0,5} \cdot h^{1,1} \cdot s^{0,5} \cdot e^{-4 \left(\frac{p}{1000} \right)}$$

Dále můžeme sledovat měnící se posuv nástroje, jak je vidět z (Obr 18.).



Obr. 18. Graf změny posuvu v závislosti na tlaku kapaliny a průměru trysky

P_z osová síla řezání

d_t průměr trysky

sposuv nástroje

hhloubka řezu

ekonstanta 2,7

ptlak působení paprsku kapaliny

σ_p hodnota vlastnosti materiálu (pevnost materiálu)

4 PŘÍKLADY VYUŽITÍ VODNÍHO PAPRSKU

Je možno vymezit některé příklady aplikací, ve kterých je použití vodního paprsku nejen **technologicky vhodné ale i ekonomicky efektivní**:

- Řezání hliníku, duralu, mědi, mosazi, bronze a pod. na čisto, případně ve větších tloušťkách hrubování
- Čisté řezání ocelí (konstrukčních a hlavně nerezových) v tloušťkách nad možnostmi laseru
- Řezání hrubých polotovarů pro následné opracování z ocelí (opět hlavně nerezí) větších tloušťek s minimálním přídavkem
- Řezání materiálů určených k tepelné úpravě - zušlechtnění nebo po tepelné úpravě, které pak nejsou řezem teplotně ovlivněny
- Řezání těžkoobrobitelných ocelí - nástrojových, kalených, abrazi odolných (hardox, abrazit, altrix ...) a pod.
- Řezání těžko opracovatelných materiálů jako sklolaminátů, gumotextitů, měkkých i tvrdých pryží, plastů, těsnění a pod.
- Řezání nesourodých vrstvených materiálů - sandwich - např. pryž na kovu, sigraflex apod.
- Řezání rozličné mozaiky hlavně pro interiérové účely (mramory a jiné kameny, dlažby, obklady, koberce, kombinace různých materiálů...)
- Řezání velice tenkých jinak těžko opracovatelných fólií (zvláště při menších sériích)
- Řezání polotovarů či hotových dílců pro interiérové doplňky ze skla, nerezí, mosazi apod.
- Řezání pěnových materiálů pro zvukové izolace či pro výplně obalů na speciální nářadí, zbraně, hudební nástroje, křehké zboží apod.

Naopak za **technicky či ekonomicky nevhodné** lze označit tyto aplikace vodního paprsku:

- Řezání ocelí v tloušťkách zvládnutelných v požadované kvalitě laserem především ve větších sériích (voda je zbytečně drahá)
- Řezání ocelí větších tloušťek tam, kde je vyhovující a technicky nezávadné pálení plasmou či plamenem (voda je zbytečně drahá)
- Řezání dílců, pro které je přesnost v řádu 0,1 mm nevyhovující a již se nepočítá s opracováním (vhodné použít elektroerozivní metody či jiné obrábění)
- Opracování již velice přesně obrobených polotovarů s požadavkem na vysokou přesnost (lepší než 0,2-0,5mm) umístění řezů (neexistuje možnost optického či jiného takto přesného zaměření polotovaru)
- Řezání materiálů, které se při kontaktu s vodou rozmočí či jinak fyzikálně či opticky poškodí
- Řezání kalených skel (při řezu se rozpadnou)
- Práce na tvarově složitých polotovarech, kde se tryska nemůže přiblížit k povrchu řezaného materiálu
- Snaha o úsporu řezáním více tvrdších desek či plechů na sobě (někdy může být úspěšné, ale většinou se nedosáhne relevantní finanční úspory a kvalita řezu na spodních deskách prudce klesá)
- Řezání dílců s požadavkem na absolutně kolmý řez (obzvláště u větších tloušťek je velice těžké realizovat až nereálné)

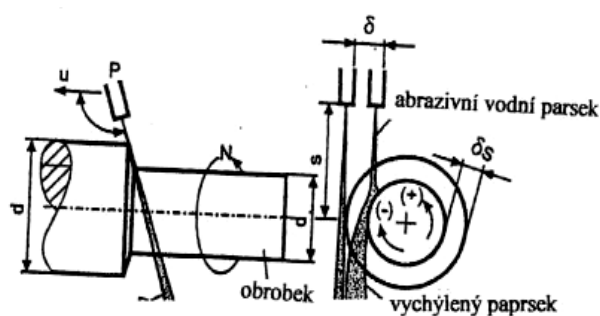
5 OBLASTI VYUŽITÍ VODNÍHO PAPRSKU

Vodní paprsek nachází stále širší použití v různých průmyslových odvětvích, od dělení plochých i tvarových materiálů jako je sklo, hliník, oceli, litiny, kompozitní a keramické materiály, až po využívání vodního paprsku jako řezného nástroje pro operace soustružení, frézování, vrtání a řezání závitů.

Operace obrábění:

1. Soustružení

Při soustružení obrobek rotuje a paprsek se posouvá ve směru osy obrobku. Úběr materiálu je zabezpečený radiálním posuvem paprsku do požadované hloubky řezu.



Obr. 19. Základní schéma soustružení vodním paprskem

2. Vrtání

V současnosti je vyvinuto několik způsobů vrtání otvorů charakterizovaných vzájemným pohybem paprsku a obrobku. Nejčastěji se používá vrtání se stacionárním paprskem a obrobkem, vrtání rotujícím paprskem nebo vibrujícím paprskem se stacionárním obrobkem.

3. Frézování

Frézování pomocí vodního paprsku se používá pro tvarově složité obrobky. Frézování vodním paprskem je proces, při kterém paprsek vícenásobně přechází po obráběné ploše a postupně tvoří tvar blízký konečnému tvaru.

6 STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Z prostudované literatury a zpracované rešerše je zřejmé, že problematika obrábění vodním paprskem má velmi široké uplatnění v průmyslových aplikacích, vývoj a zavádění těchto technologií v podnicích je velmi atraktivní. Kvalita obrobeného povrchu výrobku a jeho funkčnost v konkrétní aplikaci je závislá na parametrech zařízení a na typu polymerního materiálu.

Cílem mé práce je samotná problematika obrábění plastů vodním paprskem. Na základě dosavadních výsledků s aplikací vodního paprsku na polymerní materiály byly zvoleny tyto cíle diplomové práce:

1. Provést experimentální řezání na technologickém pracovišti
2. Zkoumat kvalitu obrábění z hlediska rozměrové přesnosti, rovinnosti řezných ploch a drsnosti
3. Provést statistické vyhodnocení výsledků a ekonomické zhodnocení získaných výsledků

II. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

7 MATERIÁLY A JEJICH CHARAKTERISTIKA

Při experimentech byly použity tyto materiály: PMMA, PVC, PERTINAX

Polymethylmetakrylát (PMMA) – je to jeden z nejpoužívanějších polymetakrylových esterů. Dobře odolává zředěným kyselinám, zásadám a roztokům solí i oxidační atmosféře. Není odolný k organickým kyselinám. Rozpouští se v polárních rozpouštědlech, např. ketonech, esterech a chlorovaných uhlovodících. Odolává alifatickým uhlovodíkům a minerálním olejům. Podléhá korozi za napětí, např. v prostředí monomerního methylmetakrylátu, acetonu, benzenu, nižších alkoholů, hexanu, heptanu. PMMA je stabilní k ultrafialovému záření a přirozenému stárnutí. Jeho polymerací v bloku se vyrábí tzv. organické sklo (plexisklo). Suspenzní polymerací se vyrábějí polymery, které se zpracovávají vytlačováním nebo vstřikováním na estetické výrobky (např. pro osvětlovací tělesa, průhledné vany, umyvadla)

Polvinylchlorid (PVC) – je nejvýznamnějším polymerem skupiny vinylových hmot. Zpracovává se buď na tvrdé výrobky bez změkčovadel, pouze se stabilizátory, mazivý a modifikátory nebo se změkčovadly na výrobky polotuhé až vysoce elastické. Účinkem změkčovadel lze v širokých mezích měnit mechanické vlastnosti PVC, aniž se zhorší jeho výborná chemická odolnost. Chemicky je PVC velmi odolný především ke kyselinám, pokud nemají oxidační vlastnosti. Oxidačním činidlům odolává daleko méně. Dobrým rozpouštědlem PVC je např. tetrahydrofuran a směs acetonu s tetrachlorethylenem nebo sirouhlík s acetonem. Změkčovadla zhoršují odolnost k rozpouštědlům zvláště proto, že se vyluhují a PVC křehne. PVC má dobré mechanické vlastnosti, zejména pevnost v tahu. Jeho velmi špatná hořlavost je velmi důležitým bezpečnostním požadavkem.. Dobře se potiskuje.

Tvrдый typ se používá na folie, desky svařené na chemicky odolné nádoby, trubky tlakové a odpadní. Měkčený typ se používá na folie, profily, hadice, izolace kabelů, podlahoviny, natíraný textil atd.

PERTINAX – obchodní název pro tvrzený papír. Desky jsou vyrobeny z celulózového papíru jako výztuže fenolytické živice, která je použita jako pojivo. Desky jsou řazeny do skupiny vrstvených izolantů vyráběné lisováním za zvýšené teploty. Používají se při výstavbě transformátorů ve formě izolačních mezistěn, různých konstrukčních

prvků. Pro vysokou elektrickou pevnost jsou vhodné k výrobě izolačních táhel a dílů elektrorozvodnic. Desky se dají opracovat řezáním, soustružením, frézováním, vrtáním.

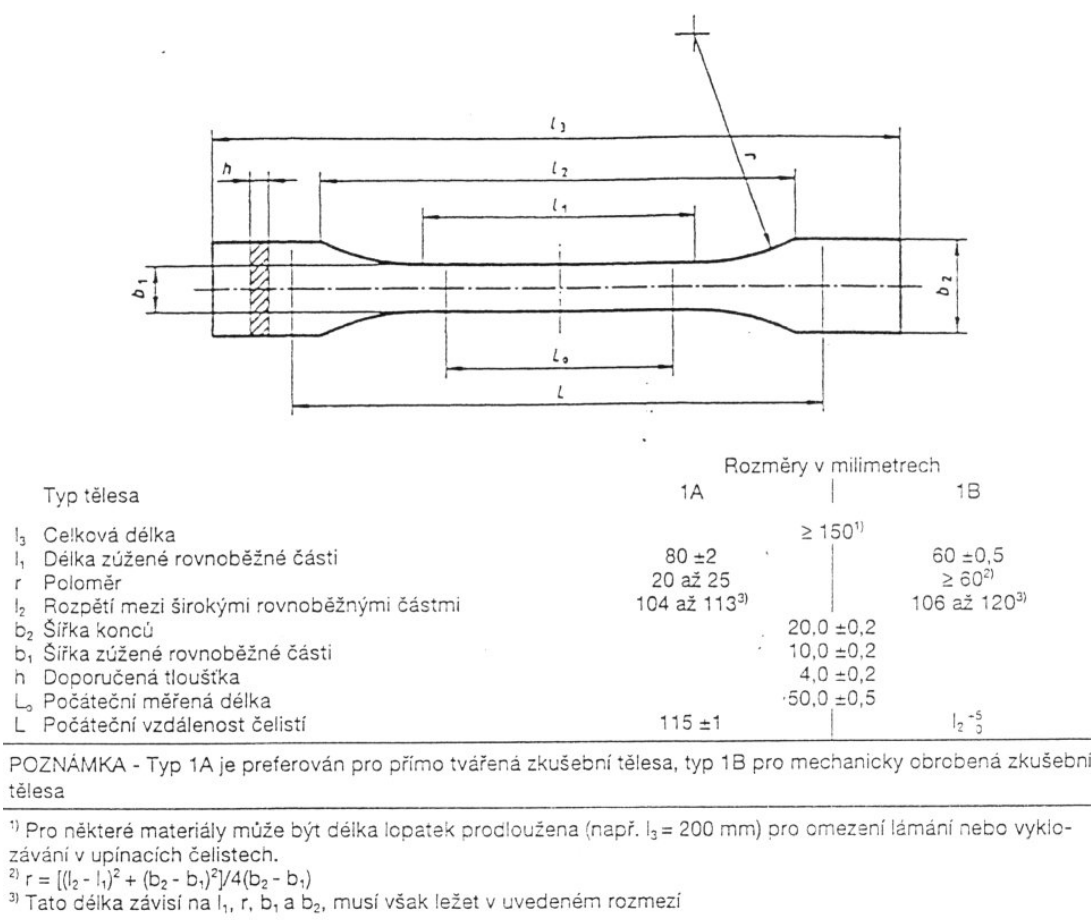
7.1 Příprava zkušebních těles

7.1.1 Zhotovení zkušebních těles vodním paprskem

Výroba vzorků se uskutečnila na paseru ve firmě MRB Sazovice spol. s.r.o. PMMA byl použit ve formě odlévaných desek o tloušťce 2, 3 a 6mm. Vzorky byly vedle sebe umístěny po čtyřech kusech, vždy pro jednu tloušťku materiálu a jednu řeznou rychlost. Byly zvoleny řezné rychlosti 500, 800, 1000, 2000, 2500, 3500mm/min.

Parametry řezání vodním paprskem: přesnost 0,1mm; tloušťka 120mm; maximální rozměr 2000x3000mm; $p = 55000\text{Pa}$; abrazivo = 30 kg/hod; $V_{\text{H}_2\text{O}} = 3,5\text{ l/min}$

7.2 Popis zkušebního tělíska



Obr. 20. Zkušební tělísko

Tab. 1 Parametry zkušebního tělíska

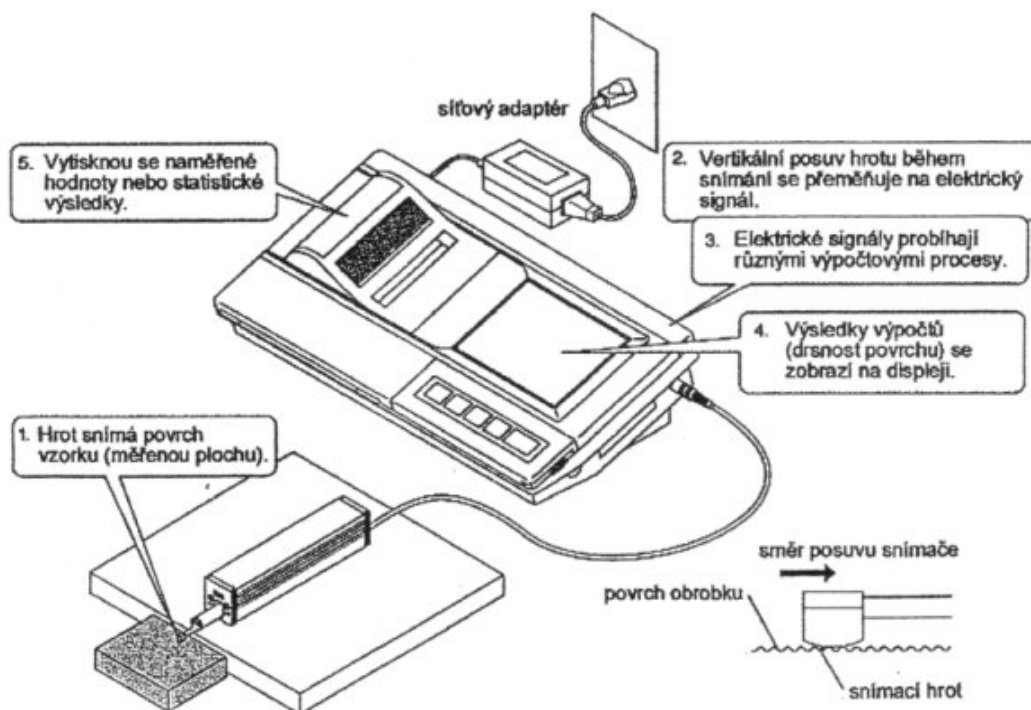
Parametr	Rozměr [mm]
Celková délka L	75
Vzdálenost hrany čelistí M	55±5
Délka pracovní části N	40±0,5
Počáteční měřená délka l0	35±0,5
Šířka upínací hlavy B	10±0,5
Šířka pracovní části b	5±0,5
Tloušťka D	2-6
Poloměr zakřivení R	30

7.3 Použitá experimentální zařízení

Digitální posuvné měřítko od firmy Mitutoyo s přesností měření 0,01mm, které jsme používali pro měření rozměrů zkušebních těles a pro měření šířky řezu na vstupu a na výstupu paprsku.

K měření drsnosti obrobené plochy byl použit přístroj Surftest SJ – 301 od firmy Mitutoyo, který je určen pro použití v dílenském provozu. Přístrojem SJ – 301 lze charakterizovat obrobenou plochu řadou parametrů podle různých národních a mezinárodních norem (JIS, DIN, ISO, ANSI). Výsledky měření se zobrazí digitálně a graficky na obrazovce přístroje a pomocí vestavěné tiskárny je možno je vytisknout. Drsnost povrchu se počítá z vertikálního posuvu snímacího hrotu, ke kterému dochází, když snímací hrot přejíždí přes nepravidelnosti povrchu.

Přístroj SJ – 301 se skládá ze zobrazovací jednotky a posunové/snímací jednotky. Posunovou/snímací jednotku je možné bezpečně uložit do odpovídajícího prostoru v zobrazovací jednotce.



Obr. 21. Přístroj na měření drsnosti povrchu SJ - 301

7.4 Provedení zkoušek

Na vzorcích vyrobených vodním paprskem byly změřeny šířky řezu na vstupu i na výstupu paprsku a byla vyhodnocena závislost šířky řezu na řezné rychlosti. Na těchto vzorcích a na vzorku z PERTINAXU byla změřena drsnost povrchu a byla vyhodnocena závislost řezné rychlosti na drsnosti. Dále byla porovnána drsnost povrchu desky z PVC a desky z PERTINAXU při šířce 3mm a řezné rychlosti 1500mm/min.

Pomocí metody Precontrol pro šířku řezu s_1 a s_2 bylo stanoveno odpovídající toleranční pole včetně jeho přesnosti.

7.4.1 Měření drsnosti povrchu řezné plochy

Vlastní měření je zahájeno kalibrací pomocí přiloženého etalonu. Dále se nastaví požadovaná měřicí dráha (dráha pojezdu měřicího hrotu), v tomto případě byla hodnota nastavení 0,8 x 3 v podélném směru a 0,25 x 3 v příčném směru. Při vlastním měření je nutno zajistit, aby zkušební vzorek a měřicí hrot byly umístěny rovnoběžně. Po projetí měřicí dráhy hrotem přístroje jsou vyhodnoceny zvolené parametry drsnosti a je možno je odečíst z displeje přístroje, vytisknout nebo převést na PC. Při měření drsnosti povrchu jsem vyhodnocoval tyto parametry:

a) střední aritmetická úchylka profilu R_a – aritmetický průměr absolutních hodnot odchylek profilu (Y_i) uvnitř vztažné dráhy.

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

b) maximální výška profilu R_z – je součet výšky Y_p nejvyššího vrcholu od střední čáry a hloubky Y_v od nejnižšího bodu od střední čáry.

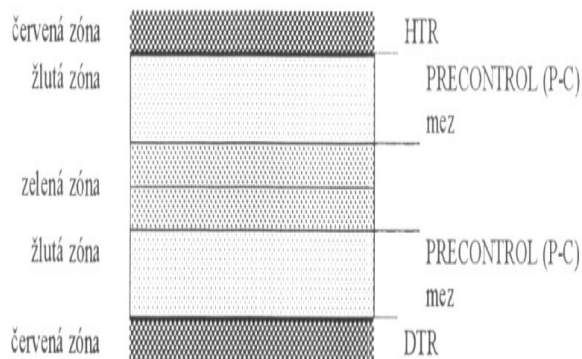
$$R_z(JIS) = Y_p + Y_v \quad (2)$$

Při výpočtu parametrů drsnosti používá přístroj filtry (λ_s – filtr definující rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln přítomnými na povrchu) k potlačení vlnitosti. Je

rozlišen základní profil (P – profil), který reprezentuje základnu pro číslíkové zpracování profilu pomocí λ_s filtru a pro výpočet parametrů profilu. Dalším je profil drsnosti (R – profil), který je odvozený ze základního profilu potlačením dlouhovlnných složek použitím filtrů λ_s .

7.4.2 Popis metody PRECONTROL

- a) Metoda začíná rozdělením vlastního tolerančního pole tělíska tak, že jeho šířku vydělíme čtyřmi. Toleranční pole je tedy rozděleno na 4 stejně široké části (Obr. 22.) Hranice střední části tolerančního pole odpovídá 2/4 šíře tolerančního pole a určují tak tzv. PRECONTROL (PC) meze. Tato část tolerančního pole se nazývá zelená zóna. Část tolerančního pole mezi horní PC mezí a horní toleranční mezí, popř. mezi dolní PC mezí a dolní toleranční mezí, se nazývají žluté zóny. Plochy nad horní, resp. dolní toleranční mezí jsou označovány jako červené zóny, (Obr. 22.).



Obr. 22. Grafické rozčlenění tolerančního pole dle metody Precontrol

- b) Způsobilost procesu ověříme tak, že provedeme výběr pěti po sobě jdoucích jednotek (výrobků). Je-li hodnota naměřeného parametru u všech pěti jednotek v zelené zóně, je proces pod kontrolou a je možné v něm pokračovat. Avšak i jediná hodnota parametru mimo zelenou zónu signalizuje, že proces není pod kontrolou a je třeba vyhledat a odstranit příčiny variability.

- c) Byl-li proces pod kontrolou a probíhá bez zásahů, provádíme dále regulaci na základě periodicky prováděných výběrů o velikosti dvou jednotek. Regulaci realizujeme dle situace, která nastane.
- je-li hodnota měřeného jakostního parametru u obou jednotek uvnitř zelené zóny, výrobní proces může pokračovat bez zásahů
 - jestliže hodnota parametru u jedné jednotky je v zelené zóně a u druhé se nachází v některé žluté zóně, proces je stále ještě pod kontrolou. Můžeme vyrábět bez zásahu dále.
 - jestliže se obě hodnoty objeví v jedné nebo ve dvou žlutých zónách, proces je mimo kontrolu a musíme výrobu zastavit a dále hledat a odstranit příčiny této variability. Poté je nutno zopakovat postup prověření způsobilosti procesu viz bod a)
 - jestliže i jedna hodnota padne do červené zóny, znamená to, že proces je mimo kontrolu (byl vyroben neshodný výrobek). Výroba musí být zastavena a příčina výroby neshodných výrobků identifikována a odstraněna či alespoň musí být její vliv redukován. I v tomto případě znovu musíme prověřit způsobilost procesu – viz bod a)

7.4.2.1 Hlavní přednosti metody PRECONTROL

- vlastní metoda má čtyři jednoduchá a jasná pravidla pro regulaci výrobního procesu
- regulační diagram je velmi jednoduchý, relativně stabilní v čase a především je velmi snadno pochopitelný
- metoda nevyžaduje komplikované a dělníkovy mnohdy nejasné propočty
- metoda není náročná na vybavení výpočetní technikou
- vzhledem k počtu výběrů jde o postup, který je časově a finančně nenáročný

7.5 Naměřené hodnoty a závislosti u vzorků nařezaných vodním paprskem

7.5.1 Vyhodnocení závislosti šířky řezu na řezné rychlosti

Štěrbiny v deskách se zkušebními tělesy z PMMA a PVC byly změřeny vždy v protilehlých místech vzorku posuvným měřidlem s přesností 0,01mm. Tyto hodnoty byly zapsány do (Tab. 2. až 7.). Širší strana šířky vzorku je označena s1, užší strana je označena s2, rozdíl mezi širší a užší stranou je označen s1-s2.

Metodu regresní analýzy jsem nevyužil z důvodu malého počtu, konkrétně jen čtyř naměřených hodnot.

Tab. 2. PMMA ($t = 2\text{mm}$) - Závislost šířky vzorku na řezné rychlost

v = 2500mm/min						
vzorek	1	2	3	4	Průměr	Směr.odch.
s1	10,22	10,25	10,18	10,21	10,215	0,03
s2	9,8	9,82	9,78	9,82	9,805	0,02
s1 - s2	0,42	0,43	0,4	0,39	0,41	0,02
v = 1500mm/min						
vzorek	1	2	3	4	Průměr	Směr.odch.
s1	10,13	10,15	10,14	10,12	10,135	0,01
s2	9,88	9,93	9,87	9,9	9,895	0,02
s1 - s2	0,25	0,22	0,27	0,22	0,24	0,02
v = 1000mm/min						
vzorek	1	2	3	4	Průměr	Směr.odch.
s1	10,11	10,13	10,7	10,9	10,46	0,35
s2	9,9	9,97	9,89	9,89	9,9125	0,03
s1 - s2	0,21	0,16	0,81	1,01	0,5475	0,37

Tab. 3. PMMA ($t = 3\text{mm}$) - Závislost šířky vzorku na řezné rychlosti

v = 2000mm/min						
vzorek	1	2	3	4	Průměr	Směr.odch.
s1	10,22	10,22	10,19	10,2	10,2075	0,01
s2	9,8	9,81	9,77	9,8	9,795	0,02
s1 - s2	0,42	0,41	0,42	0,4	0,4125	0,01
v = 1500mm/min						
vzorek	1	2	3	4	Průměr	Směr.odch.
s1	10,23	10,18	10,2	10,19	10,2	0,02
s2	9,8	9,77	9,78	9,81	9,79	0,02
s1 - s2	0,43	0,41	0,42	0,38	0,41	0,02
v = 1000mm/min						
vzorek	1	2	3	4	Průměr	Směr.odch.
s1	10,22	10,18	10,17	10,19	10,19	0,02
s2	9,8	9,76	9,87	10,88	10,0775	0,47
s1 - s2	0,62	0,42	0,3	-0,69	0,1625	0,51

Tab. 4. PMMA ($t = 6\text{mm}$) - Závislost šířky vzorku na řezné rychlosti

v = 2000mm/min						
vzorek	1	2	3	4	Průměr	Směr.odch.
s1	10,32	10,29	10,27	10,3	10,295	0,02
s2	9,79	9,68	9,69	9,74	9,725	0,04
s1 - s2	0,53	0,61	0,58	0,56	0,57	0,03
v = 1500mm/min						
vzorek	1	2	3	4	Průměr	Směr.odch.
s1	10,32	10,34	10,31	10,32	10,3225	0,01
s2	9,67	9,68	9,73	9,68	9,69	0,02
s1 - s2	0,65	0,66	0,58	0,64	0,6325	0,03
v = 1000mm/min						
vzorek	1	2	3	4	Průměr	Směr.odch.
s1	10,29	10,3	10,28	10,27	10,285	0,01
s2	9,68	9,81	9,77	9,75	9,7525	0,05
s1 - s2	0,61	0,49	0,51	0,52	0,5325	0,05

Tab. 5. PVC ($t = 4\text{mm}$, bílá deska) - Závislost šířky vzorku na řezné rychlosti

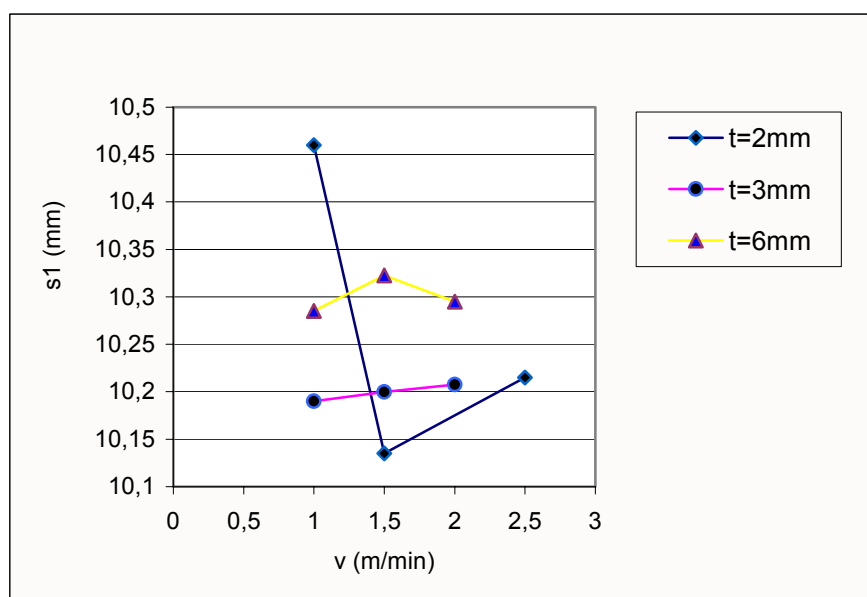
v = 2000mm/min						
vzorek	1	2	3	4	Průměr	Směr.odch.
s1	10,18	10,15	10,13	10,17	10,1575	0,02
s2	9,83	9,82	9,84	9,88	9,8425	0,02
s1 - s2	0,35	0,33	0,29	0,29	0,315	0,03
v = 1500mm/min						
vzorek	1	2	3	4	Průměr	Směr.odch.
s1	10,17	10,16	10,14	10,17	10,16	0,01
s2	9,86	9,87	9,84	9,86	9,8575	0,01
s1 - s2	0,31	0,29	0,3	0,31	0,3025	0,01
v = 1000mm/min						
vzorek	1	2	3	4	Průměr	Směr.odch.
s1	10,15	10,16	10,14	10,15	10,15	0,01
s2	9,87	9,89	9,84	9,89	9,8725	0,02
s1 - s2	0,28	0,27	0,3	0,26	0,2775	0,02

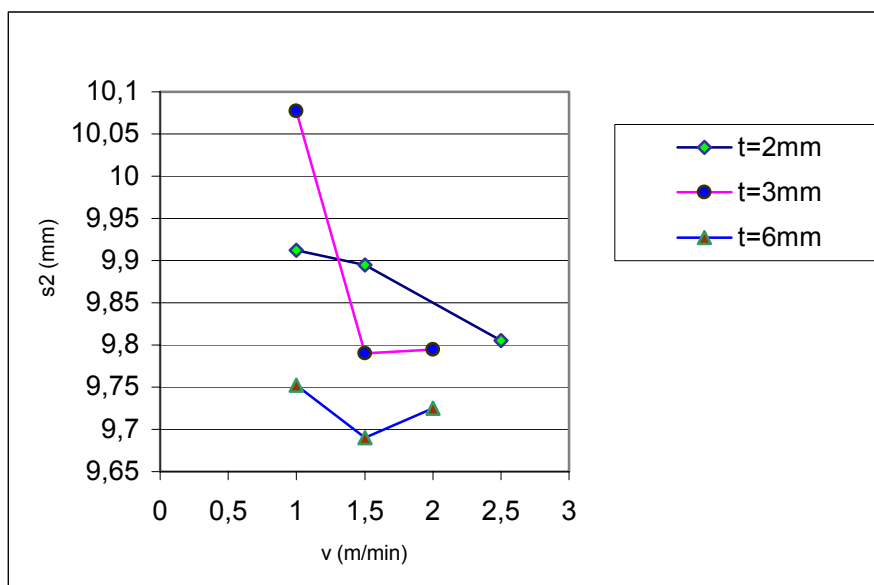
Tab. 6. PVC ($t = 4\text{mm}$, žlutá deska) - Závislost šířky vzorku na řezné rychlosti

v = 3500mm/min						
vzorek	1	2	3	4	Průměr	Směr.odch.
s1	10,17	10,15	10,14	10,13	10,1475	0,02
s2	9,85	9,81	9,82	9,81	9,8225	0,02
s1 - s2	0,32	0,34	0,32	0,32	0,325	0,01
v = 2500mm/min						
vzorek	1	2	3	4	Průměr	Směr.odch.
s1	10,19	10,14	10,16	10,18	10,1675	0,02
s2	9,83	9,83	9,81	9,84	9,8275	0,01
s1 - s2	0,36	0,31	0,35	0,34	0,34	0,02
v = 1000mm/min						
vzorek	1	2	3	4	Průměr	Směr.odch.
s1	10,19	10,17	10,14	10,16	10,165	0,02
s2	9,84	9,85	9,81	9,89	9,8475	0,03
s1 - s2	0,35	0,32	0,33	0,27	0,3175	0,03

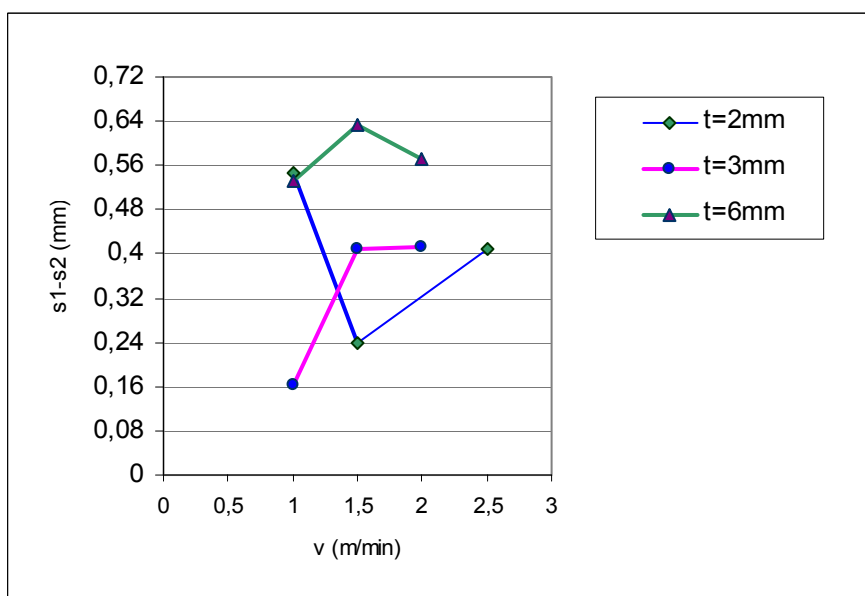
Tab. 7. PVC ($t = 4\text{mm}$, červená deska) - Závislost šířky vzorku na řezné rychlosti

$v = 2000\text{mm/min}$						
vzorek	1	2	3	4	Průměr	Směr.odch.
s1	10,17	10,14	10,16	10,13	10,15	0,02
s2	9,9	9,88	9,89	9,89	9,89	0,01
s1 - s2	0,27	0,26	0,27	0,24	0,26	0,01
$v = 800\text{mm/min}$						
vzorek	1	2	3	4	Průměr	Směr.odch.
s1	10,12	10,13	10,11	10,13	10,1225	0,01
s2	9,93	9,9	9,91	9,89	9,9075	0,02
s1 - s2	0,19	0,23	0,2	0,24	0,215	0,02
$v = 500\text{mm/min}$						
vzorek	1	2	3	4	Průměr	Směr.odch.
s1	10,18	10,16	10,13	10,09	10,14	0,03
s2	9,88	9,9	9,91	9,87	9,89	0,02
s1 - s2	0,3	0,26	0,22	0,22	0,25	0,03

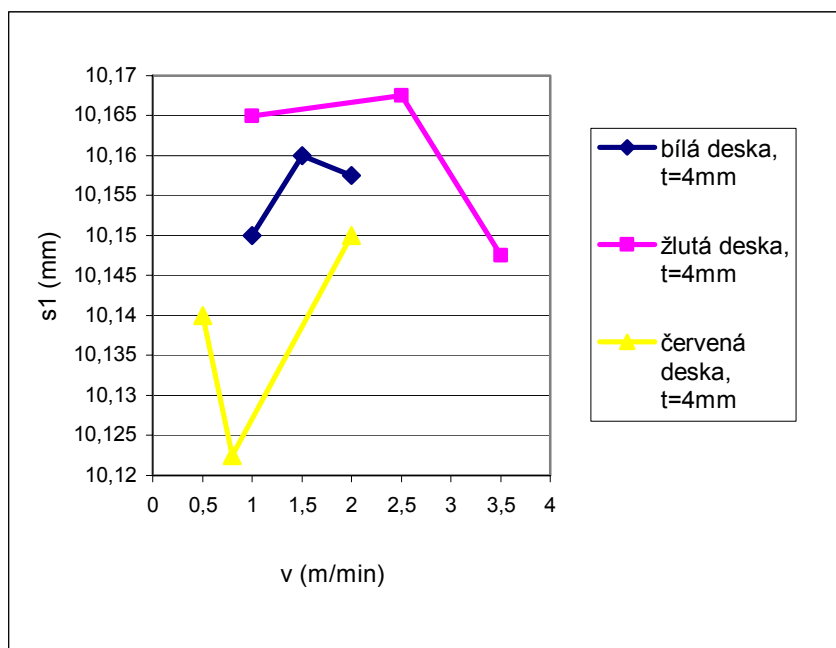
Obr. 23. PMMA – závislost šířky vzorku $s1$ na řezné rychlosti v



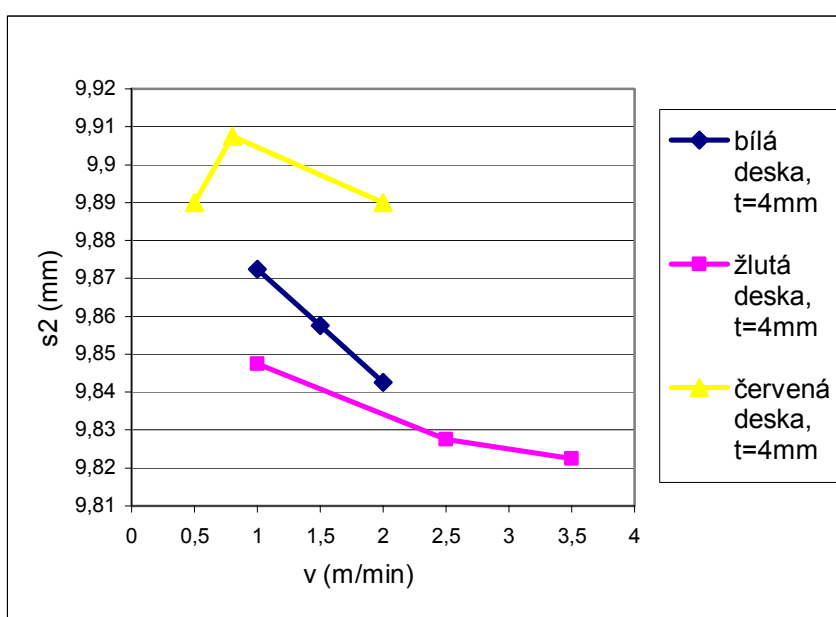
Obr. 24. PMMA – závislost šířky vzorku s_2 na řezné rychlosti v



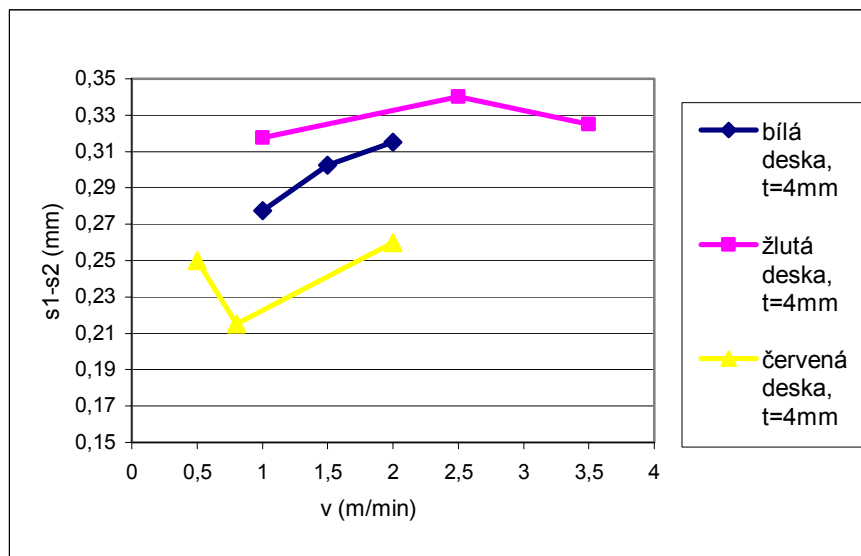
Obr. 25. PMMA – závislost rozdílu šířek vzorku s_1-s_2 na řezné rychlosti v



Obr. 26. PVC – závislost šířky vzorku s_1 na řezné rychlosti v



Obr. 27. PVC – závislost šířky vzorku s_2 na řezné rychlosti v



Obr. 28. PVC – závislost rozdílu šířek vzorku s1-s2 na řezné rychlosti v

7.5.2 Vyhodnocení závislosti drsnosti na řezné rychlosti

Drsnost povrchu řezné plochy byla měřena u vzorků PMMA a PVC a PERTINAX. U každého vzorku (pro danou řeznou rychlost a tloušťku desky) byla měřena drsnost povrchu na čtyřech místech, a to v podélném a příčném směru. Z těchto čtyř hodnot byl vypočítán aritmetický průměr.

V tabulkách (Tab. 8 až 14) jsou uvedeny změřené hodnoty drsnosti Ra a Rz.

Tab. 8. Parametry drsnosti řezné plochy pro PMMA pro tloušťku 2mm

v = 2500mm/min					v = 1500mm/min				v = 1000mm/min			
příčný směr			podélný směr		příčný směr		podélný směr		příčný směr		podélný směr	
n	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
1	9,99	51,97	2,85	16,92	8,53	49,23	2,97	15,07	7,61	41,29	2,31	14,98
2	7,36	45,78	3,21	16,16	8,07	43,33	2,73	15,46	6,71	37,21	2,14	14,12
3	7,19	40,63	3,65	15,96	7,21	37,25	3,08	15,68	7,65	37,51	2,16	13,54
4	6,87	39,5	2,77	15,93	7,42	40,13	2,81	14,91	7,51	40,89	2,32	13,63
ø	7,85	44,47	3,12	16,24	7,81	42,49	2,9	15,28	7,37	39,23	2,23	14,07

Tab. 9. Parametry drsnosti řezné plochy pro PMMA pro tloušťku 3mm

v = 2000mm/min					v = 1500mm/min				v = 1000mm/min			
příčný směr			podélný směr		příčný směr		podélný směr		příčný směr		podélný směr	
n	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
1	7,16	48,09	2,49	12,99	7,23	38,95	2,05	11,63	6,65	41,05	2,06	8,64
2	8,09	44,99	2,69	14,78	7,26	35,7	2,3	18,67	7,28	49,28	1,96	11,77
3	8,49	41,31	2,57	11,96	7,74	39,42	2,24	13,54	7,49	37,97	1,75	10,81
4	8,6	42,74	2,65	14,21	6,85	34,55	2,07	12,37	7,24	42,18	1,88	10,59
ø	8,09	44,28	2,6	13,49	7,27	37,16	2,17	14,06	7,17	42,62	1,91	10,45

Tab. 10. Parametry drsnosti řezné plochy pro PMMA pro tloušťku 6mm

v = 2000mm/min					v = 1500mm/min				v = 1000mm/min			
příčný směr			podélný směr		příčný směr		podélný směr		příčný směr		podélný směr	
n	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
1	9,13	49,61	3,33	18,2	8,43	50,52	2,56	14,79	7,34	43,82	2,18	11,67
2	8,79	48,33	3,32	15,61	7,36	39,89	2,96	15,94	6,74	40,35	2,27	11,94
3	9,17	50,34	3,4	17,42	7,84	48,25	3,01	18,09	6,69	38,89	2,42	13,24
4	9,26	48,74	3,25	15,74	8,67	46,51	2,72	14,96	6,84	43,98	2,52	12,28
ø	9,09	49,26	3,33	16,74	8,08	46,29	2,81	15,95	6,9	41,76	2,35	12,28

Tab. 11. Parametry drsnosti řezné plochy pro PVC pro tloušťku 4mm (bílá deska)

v = 2000mm/min					v = 1500mm/min				v = 1000mm/min			
příčný směr			podélný směr		příčný směr		podélný směr		příčný směr		podélný směr	
n	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
1	8,36	45,12	3,17	15,98	7,66	51,84	2,44	13,9	6,48	33,73	2,26	11,66
2	8,53	45,46	2,84	15,46	8,16	42,42	2,4	13,04	7,18	42,62	2,43	13,52
3	9,13	43,92	2,6	14,18	8,09	43,64	2,33	13,58	7,03	37,66	2,36	12,42
4	9,13	51,76	2,6	13,83	8,12	42,77	2,39	12,83	6,76	39,75	2,24	11,48
ø	8,79	46,57	2,8	14,86	8,01	45,17	2,39	13,34	6,86	38,44	2,32	12,27

Tab. 12. Parametry drsnosti řezné plochy pro PVC pro tloušťku 4mm (žlutá deska)

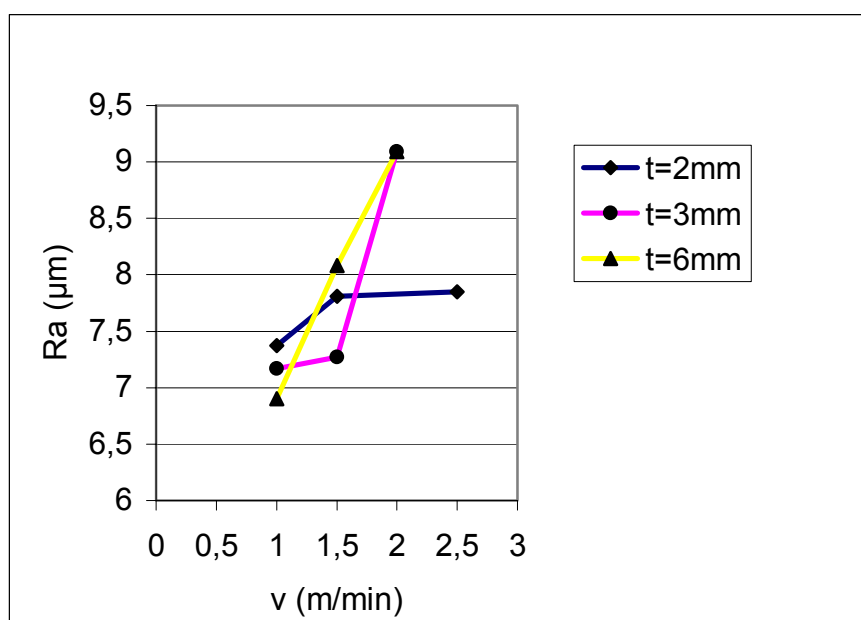
v = 3500mm/min					v = 2500mm/min				v = 1000mm/min			
příčný směr			podélný směr		příčný směr		podélný směr		příčný směr		podélný směr	
n	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
1	7,99	47,2	3,04	16,68	8,03	43,44	2,55	13,71	6,99	37,56	2,098	12,34
2	8,57	45,94	2,36	13,7	7,25	40,42	2,66	14,26	6,85	38,04	1,71	8,96
3	8,54	43,87	2,92	15,72	6,59	41,31	2,64	13,51	6,92	37,49	2,3	12,29
4	8,42	46,15	2,8	14,74	7,24	37,87	2,04	12,14	5,95	34,43	1,88	12,29
ø	8,38	45,79	2,78	15,21	7,28	40,76	2,47	13,41	6,68	36,88	2	11,47

Tab. 13. Parametry drsnosti řezné plochy pro PVC pro tloušťku 4mm (červená deska)

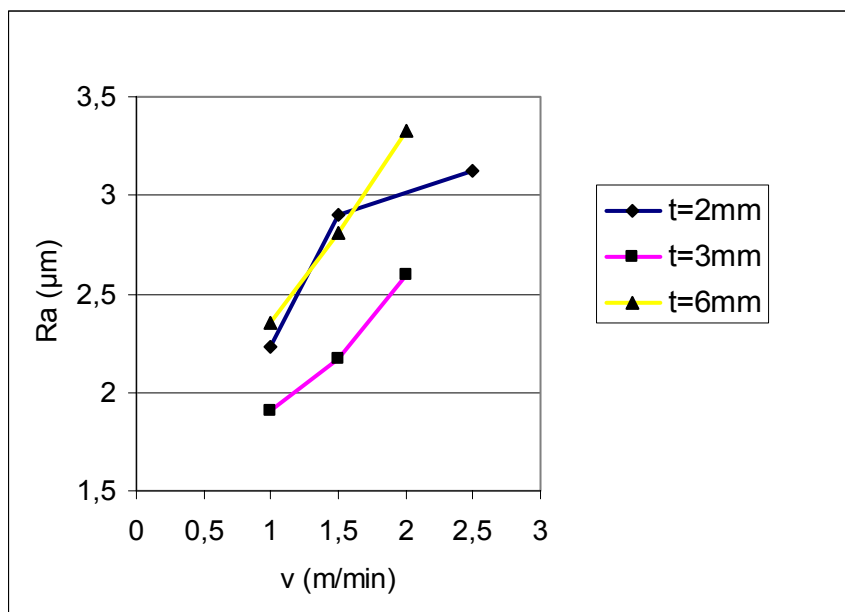
v = 3500mm/min					v = 2500mm/min				v = 1000mm/min			
příčný směr			podélný směr		příčný směr		podélný směr		příčný směr		podélný směr	
n	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
1	8,56	45,39	2,68	14,9	7,06	41,26	1,82	10,58	6,53	36,62	2,16	11,53
2	7,67	42,14	2,37	12,84	6,74	37,87	2,43	12,72	6,22	36,6	1,88	10,86
3	7,65	44,21	2,32	11,59	6,49	41,68	2,35	12,88	5,91	32,53	2,28	12,82
4	8,16	44,98	2,2	12,15	6,7	39,95	2,26	12,36	6,21	38,75	2,39	12,85
ø	8,01	44,18	2,39	12,87	6,75	40,19	2,22	12,14	6,22	36,13	2,18	12,02

Tab. 14. Parametry drsnosti řezné plochy
pro PERTINAX pro tloušťku 3mm

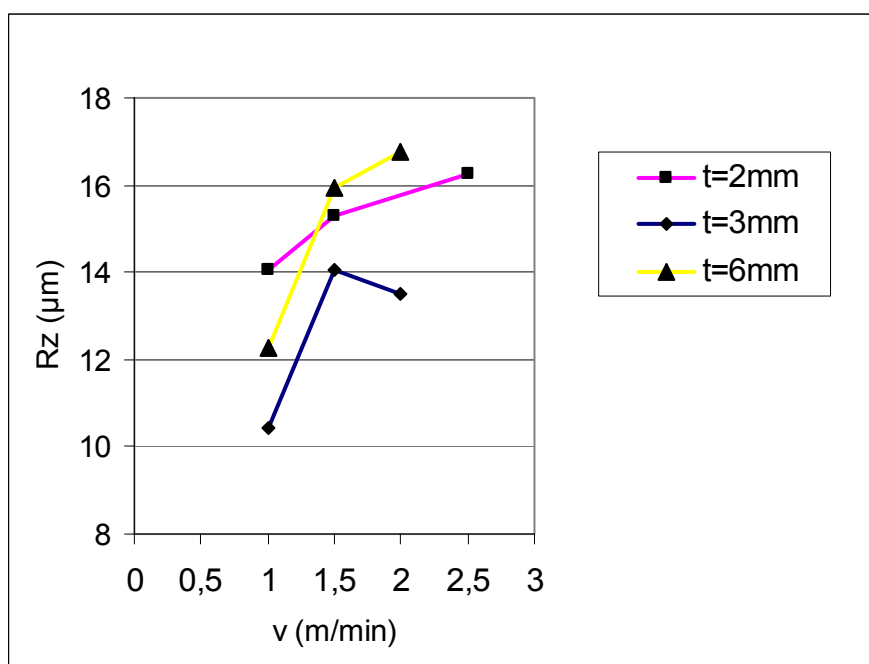
$v = 1500 \text{ mm/min}$				
příčný směr			podélný směr	
n	Ra	Rz	Ra	Rz
1	7,19	37,03	2,54	14,87
2	7,55	37,08	1,95	11,8
3	7,09	37,14	2,37	12,88
4	7,19	37,76	2,49	13,79
5	7,68	40,46	2,69	16,3
6	7,52	38,66	2,77	14,79
7	7,19	42,73	2,62	13,73
8	7,14	37,57	2,79	16,1



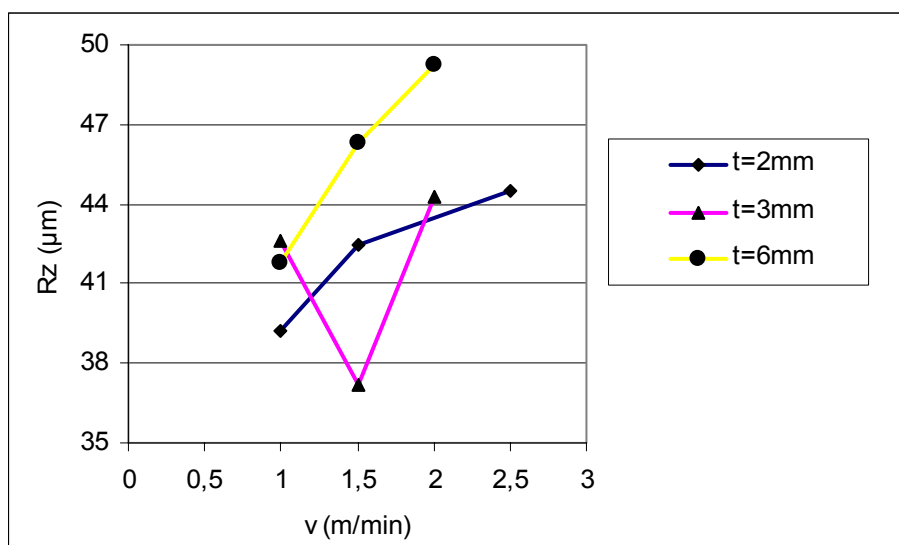
Obr. 29. PMMA – závislost Ra na různých tloušťkách (pro příčný směr)



Obr. 30. PMMA – závislost R_a na různých tloušťkách (pro podélný směr)

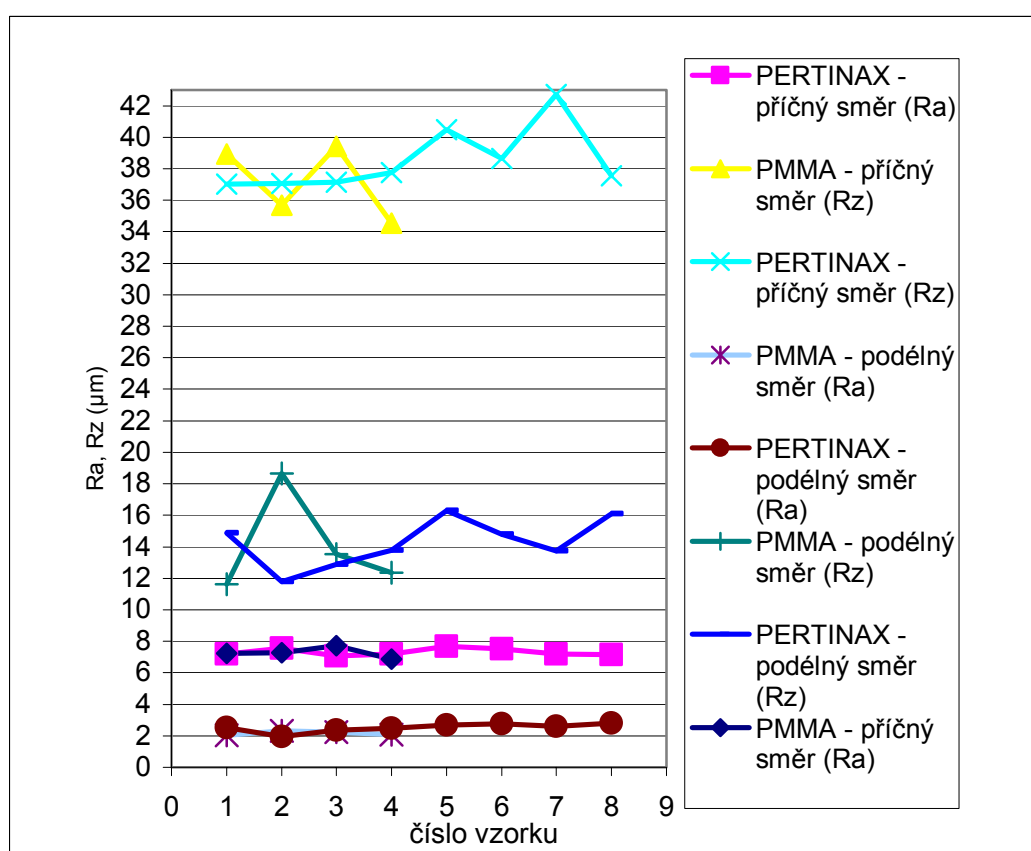


Obr. 31. PMMA – závislost R_z na různých tloušťkách (pro podélný směr)



Obr. 32. PMMA – závislost Rz na různých tloušťkách (pro příčný směr)

7.5.2.1 Porovnání PVC desky s deskou z PERTINAXU

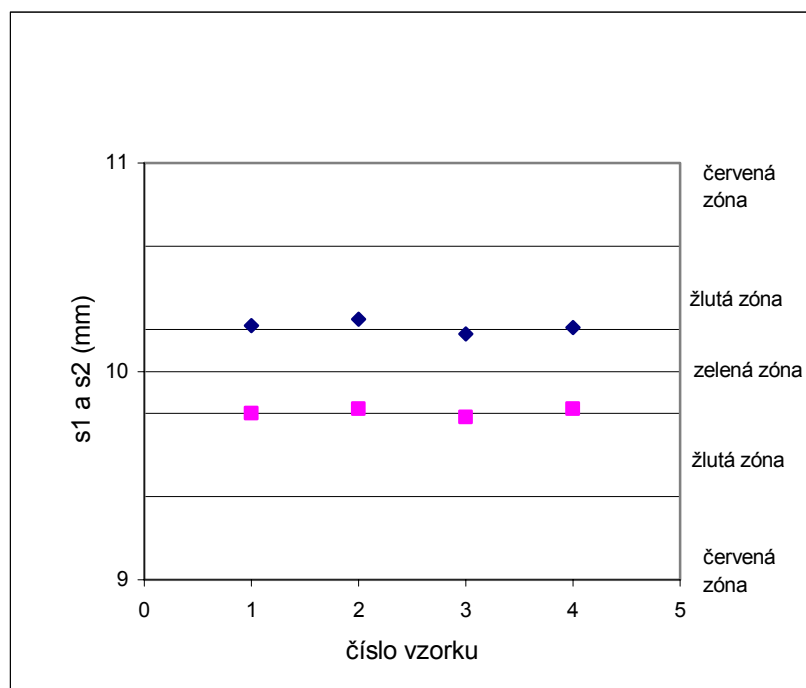


Obr. 33. Porovnání drsnosti PMMA desky s drsností PERTINAXOVÉ desky ($t = 3\text{mm}$, $v = 1500\text{m/min}$)

7.5.3 Aplikace metody Precontrol

Tuto metodu jsem použil u desek z PMMA, a to zvláště pro jednotlivé tloušťky desek 2, 3 a 6mm. Ve strojnických tabulkách jsem našel odpovídající toleranční pole a jeho přesnost. Jmenovitý rozměr byl 10mm.

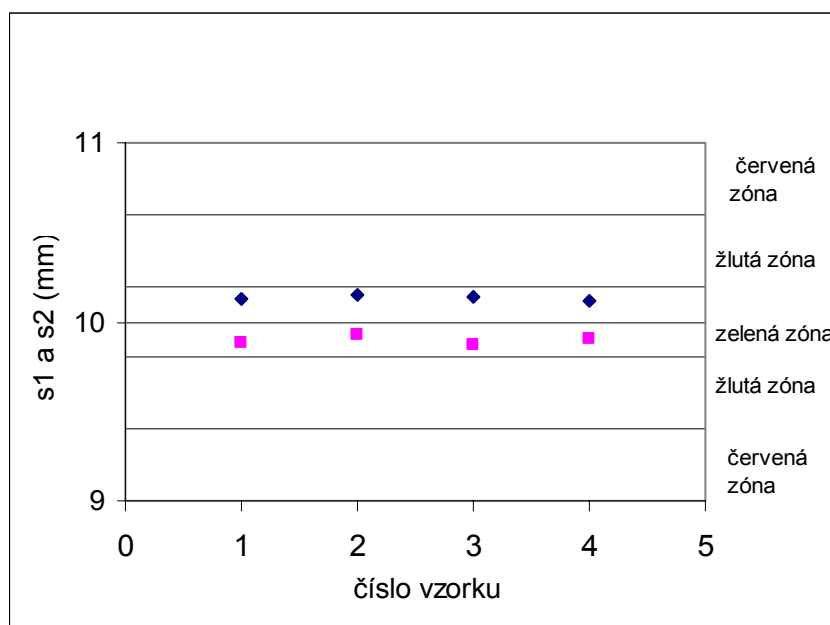
a) pro tloušťku $t = 2\text{mm}$



Obr. 34. Závislost řezné rychlosti $v = 2,5\text{m/min}$ na šířce řezu $s1$ $s2$, $t = 2\text{mm}$

jmenovitý rozměr: 10mm

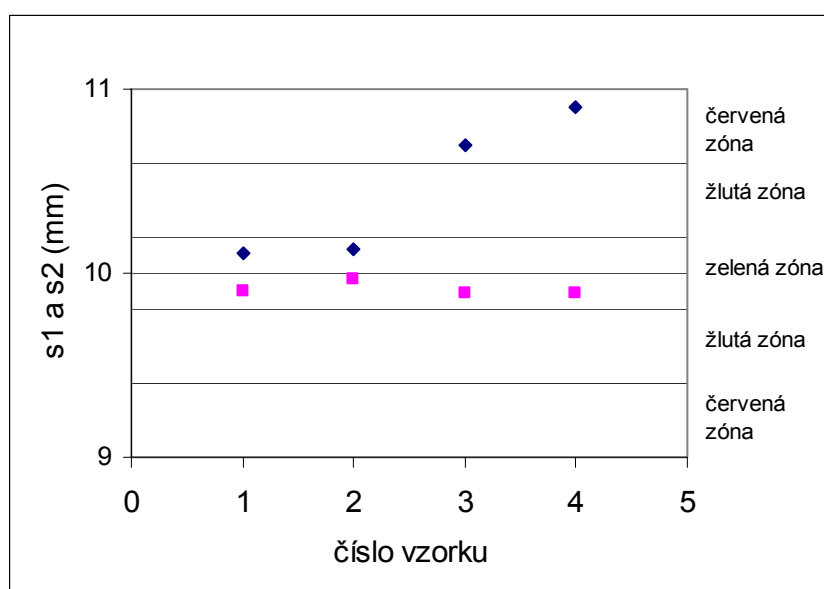
Danému tělísku odpovídá dle tabulek toleranční pole js 15, číselná hodnota $\pm 0,29\text{mm}$



Obr. 35. Závislost řezné rychlosti $v = 1,5 \text{ m/min}$ na šířce řezu $s1$ $s2$, $t = 2 \text{ mm}$

jmenovitý rozměr: 10mm

Danému tělísku odpovídá dle tabulek toleranční pole js 14, číselná hodnota $\pm 0,18 \text{ mm}$

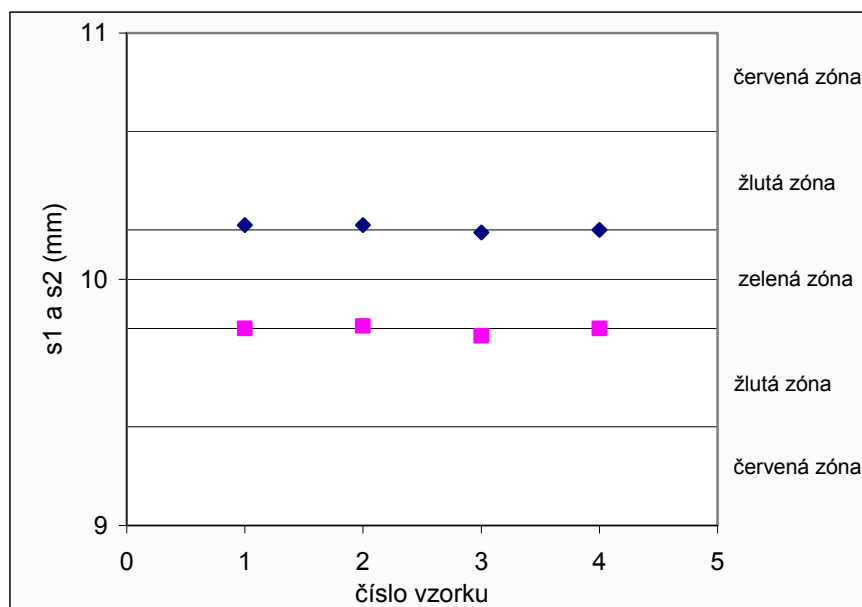


Obr. 36. Závislost řezné rychlosti $v = 1 \text{ m/min}$ na šířce řezu $s1$ $s2$, $t = 2 \text{ mm}$

jmenovitý rozměr: 10mm

Danému tělísku odpovídá dle tabulek toleranční pole js 17, číselná hodnota $\pm 0,9 \text{ mm}$

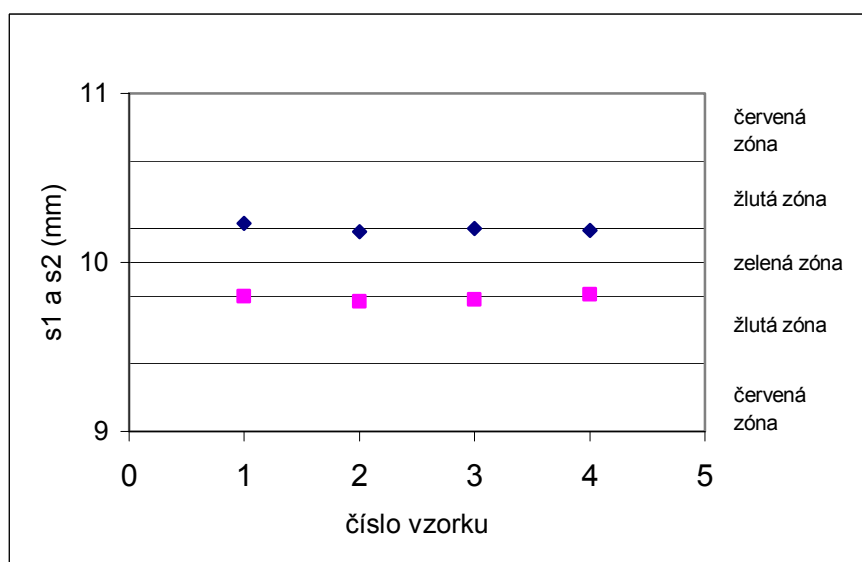
a) pro tloušťku $t = 3\text{mm}$



Obr. 37. Závislost řezné rychlosti $v = 2\text{m/min}$ na šířce řezu $s1$ $s2$, $t = 3\text{mm}$

jmenovitý rozměr: 10mm

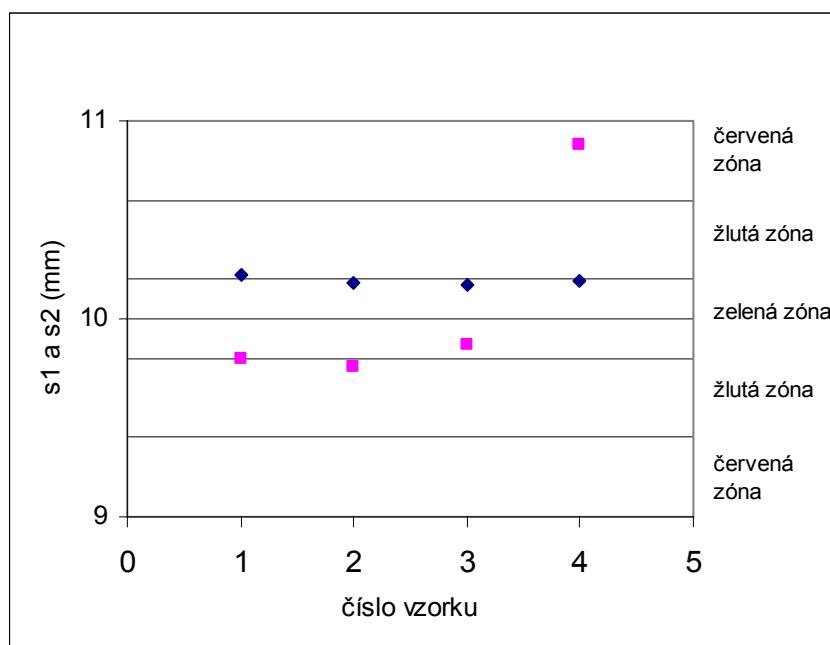
Danému tělísku odpovídá dle tabulek toleranční pole js 15, číselná hodnota $\pm 0,29\text{mm}$



Obr. 38. Závislost řezné rychlosti $v = 1,5\text{m/min}$ na šířce řezu $s1$ $s2$, $t = 3\text{mm}$

jmenovitý rozměr 10mm

Danému tělísku odpovídá dle tabulek toleranční pole js 15, číselná hodnota $\pm 0,29\text{mm}$

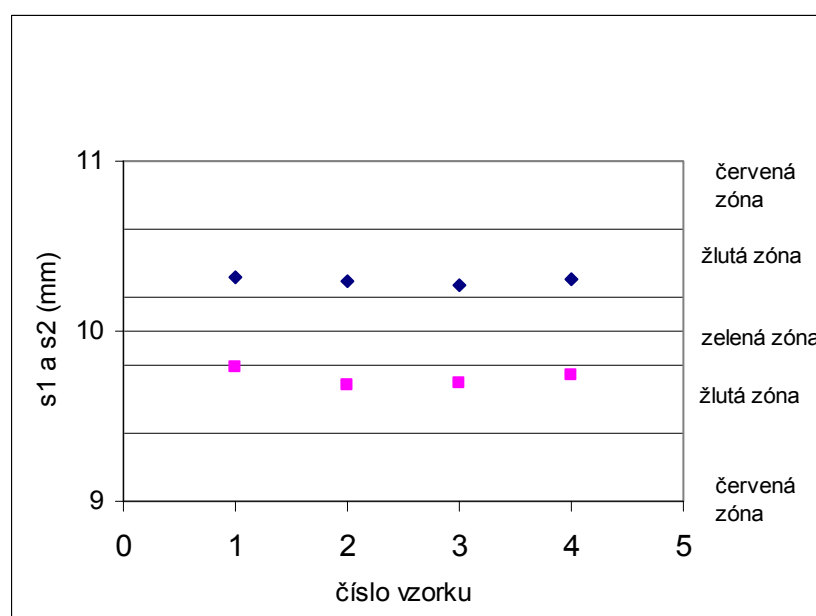


Obr. 39. Závislost řezné rychlosti $v = 1 \text{ m/min}$ na šířce řezu $s1$ $s2$, $t = 3 \text{ mm}$

jmenovitý rozměr: 10mm

Danému tělísku odpovídá dle tabulek toleranční pole js 17, číselná hodnota $\pm 0,9 \text{ mm}$

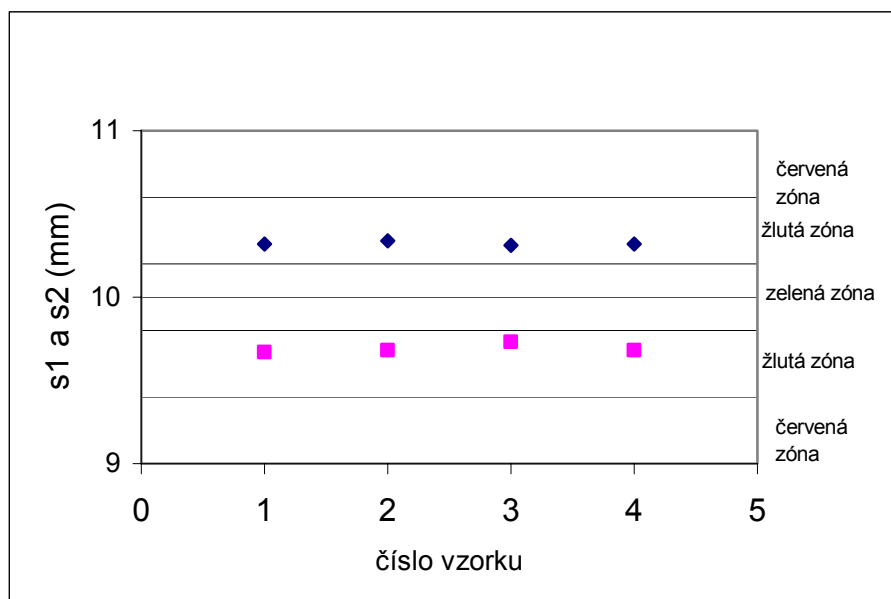
a) pro tloušťku $t = 6 \text{ mm}$



Obr. 40. Závislost řezné rychlosti $v = 2 \text{ m/min}$ na šířce řezu $s1$ $s2$, $t = 6 \text{ mm}$

jmenovitý rozměr 10mm

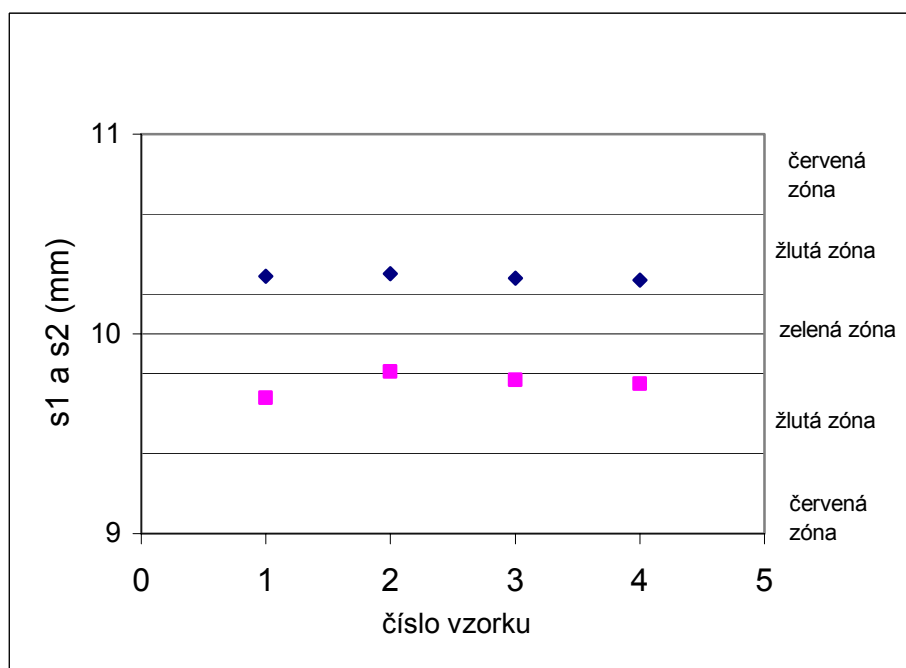
Danému tělísku odpovídá dle tabulek toleranční pole js 15, číselná hodnota $\pm 0,35 \text{ mm}$



Obr. 41. Závislost řezné rychlosti $v = 1,5 \text{ m/min}$ na šířce řezu $s1$ $s2$, $t = 6 \text{ mm}$

jmenovitý rozměr: 10mm

Danému tělísku odpovídá dle tabulek toleranční pole js 15, číselná hodnota $\pm 0,35 \text{ mm}$



Obr. 42. Závislost řezné rychlosti $v = 1 \text{ m/min}$ na šířce řezu $s1$ $s2$, $t = 6 \text{ mm}$

jmenovitý rozměr: 10mm

Danému tělísku odpovídá dle tabulek toleranční pole js 15, číselná hodnota $\pm 0,35 \text{ mm}$

ZÁVĚR

Paser – jeho použití je oprávněné v případech řezání plastů, které jsou náchylné k rychlé tepelné degradaci. Vodní paprsek žádné negeneruje. U laminátů vyztužených např. uhlíkovým vláknem, které mají větší tepelnou vodivost, tak nemůže dojít k pnutím na okrajích. Paser lze též aplikovat na plastové materiály, aniž bychom museli přemýšlet o přísadách, které jsou v něm obsaženy. Vodní paprsek je ale poněkud hlučný (až 90db). Také abraziva pro pasery jsou poněkud drahá. Je zde nutnost výměny trysky, jejíž životnost je asi 200 hodin. Oproti laseru je obtížné řídit i hloubku řezu.

Při řezání PMMA vzniká řez, který má mírně kuželovitý tvar. Řez je rovný, ale s viditelnými výstupky, což může způsobovat brusivo přidané do vody. PVC má řez hladší než PMMA.

V (Tab. 2. až 7.) jsou uvedeny naměřené a vypočtené hodnoty šířek vzorků pro materiál PMMA a PVC.

V grafech na (Obr. 23. až 25.) je znázorněna velikost šířky vzorku na rychlosti řezání pro PMMA, v grafech na (Obr. 26. až 28.) pro PVC. Šířka drážky je u vzorků nařezaných paserem větší (může to být způsobeno tím, že vodní paprsek obsahuje brusivo, které se rozstřikuje), tudíž při stejné trajektorii vodního paprsku je šířka vzorku menší než pro jiné řezné technologie.

S rostoucí rychlostí roste šířka řezu, tzn. že při stejné trajektorii vodního paprsku se šířka vzorku musí zmenšovat. Z experimentu tato závislost není patrná, což může být způsobeno různými faktory, především nedostatečným množstvím naměřených hodnot, které z finančního hlediska nebylo možno získat.

Parametry drsnosti řezné plochy pro PMMA pro různé tloušťky jsou uvedeny v (Tab. 8. až 10.).

Graf na (Obr. 29) ukazuje závislost průměrné hodnoty střední aritmetické úchyly R_a na řezné rychlosti pro různé tloušťky řezaných PMMA desek měřené v příčném směru.

Z grafu je vidět, že s rostoucí řeznou rychlostí se drsnost řezné plochy zvětšuje. Trend je takový, že vodní paprsek obsahuje brusivo, které má vliv na drsnost povrchu.

Brusivo způsobuje horší kvalitu. Je nutné volit druh brusiva podle druhu obráběného materiálu. Čím tvrdší materiál, tím tvrdší brusivo.

Řezná rychlost nemá tak velký vliv na drsnost řezné plochy, hodnoty jsou si blízké.

Graf na (Obr. 30) ukazuje závislost průměrné hodnoty střední aritmetické úchylky R_a

na řezné rychlosti pro různé tloušťky řezaných PMMA desek měřené v podélném směru. Graf opět ukazuje, že s rostoucí rychlostí se zvyšuje drsnost řezné plochy.

Graf na (Obr. 31) ukazuje závislost průměrné hodnoty R_z na řezné rychlosti pro různé tloušťky řezaných PMMA desek měřené v podélném směru. S rostoucí rychlostí se zvyšuje drsnost.

Graf na (Obr. 32) ukazuje závislost průměrné hodnoty R_z na řezné rychlosti pro různé tloušťky řezaných PMMA desek měřené v příčném směru.

Naměřené hodnoty drsností měřené v příčném směru jsou vyšší než hodnoty získané měřením v podélném směru. To je způsobeno tím, že v příčném směru hrot přístroje přejíždí přes všechny nerovnosti, kdežto v podélném směru se hrot dostane do malé drážky a nemá tak velké nerovnosti. Nerovnosti způsobuje rovněž brusivo, které je přidáváno do vodního paprsku.

V (Tab. 11. až 13.) jsou parametry drsnosti řezné plochy pro PVC pro tloušťku 4mm. Hodnoty jsou podobné jako u materiálu PMMA a vykazují stejný průběh.

V (Tab. 14.) jsou uvedeny hodnoty R_a a R_z pro materiál PERTINAX řezaný řeznou rychlostí 1500mm/min. Hodnoty naměřené v podélném směru vzorku jsou menší než hodnoty měřené v příčném směru.

V grafu na (Obr. 33.) je uvedeno porovnání drsnosti řezné plochy desek z PMMA a PERTINAXU (tloušťka desek $t = 3\text{mm}$, $v = 1500\text{m/min}$). Materiál vykazuje v příčném i podélném směru pro R_a i R_z téměř stejné hodnoty.

Přesnost šířky vzorků byla zjišťována pomocí metody Precontrol. Z grafů na (Obr. 34 až 42) je vidět, jaké musí být PC meze a toleranční meze pro jednotlivé materiály a řezné rychlosti, aby výroba těchto vzorků paserem mohla být považována

za dostatečně přesnou a tedy vyhovující. Odpovídající toleranční pole se stupněm přesnosti je uvedeno pod každým grafem.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] www.chps.cz
- [2] www.lavap.cz
- [3] www.plehaso.cz
- [3] www.ft.vslib.cz
- [5] www.techtydenik.cz - plazmová technologie
- [6] GORFOLOVÁ, R.: POROVNÁNÍ KVALITY LASEROVÉHO A PASEROVÉHO OBRÁBĚNÍ – DIPLOMOVÁ PRÁCE UTB FT, ZLÍN 2004

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Al_2O_3	oxid hlinitý
B_4C	karbid bóru
B	šířka upínací hlavy zkušebního tělíska (mm)
CAD	computer adalaid design
CNC	computer numerical control
D	tloušťka zkušebního tělíska (mm)
L	celková délka zkušebního tělíska (mm)
L_0	počáteční měřená délka zkušebního tělíska (mm)
M	vzdálenost hrany od čelistí (mm)
N	délka pracovní části zkušebního tělíska (mm)
P	síla působení vodního paprsku (N)
P_{T1} , P_{T2} a P_{T3}	teoretické hodnoty pro daný rozsah tlaku a průměr trysek
P_z	síla řezání (MPa)
PC	Precontrol meze
PMMA	polymethylmetakrylát
PVC	polyvinylchlorid
$P_{\max}$	maximální síla působení vodního paprsku (MPa)
R	poloměr zakřivení zkušebního tělíska (mm)
R_a	střední aritmetická úchylka profilu (μm)
R_z	maximální výška profilu (μm)
JIS, DIN, ISO, ANSI	národní a mezinárodní normy pro stanovení drsnosti povrchu
b1	šířka zúžené rovnoběžné části zkušebního tělíska (mm)
b	šířka pracovní části zkušebního tělíska (mm)

dt	průměr trysky (mm)
e	konstanta 2,7
h	hloubka řezu (mm)
lopt	optimální vzdálenost trysky od materiálu (mm)
l	vzdálenost mezi tryskou a materiálem (mm)
p	tlak při výtoku z trysky (MPa)
s	posuv materiálu (m/min)
s1	šířka zkušebního tělíska na vstupu do materiálu (mm)
s2	šířka zkušebního tělíska na výstupu z materiálu (mm)
s1 – s2	rozdíl šířek zkušebního tělíska na vstupu a na výstupu vodního paprsku (mm)
t	tloušťka zkušebního tělíska (mm)
v	řezná rychlost (m/min)
λ_s	filtr definující rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln přítomnými na povrchu
σ_p	pevnost materiálu v tahu (MPa)

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1. Řezání s abrazivem
- Obr. 2. Řezání bez abraziva
- Obr. 3. Závislost hloubky řezu na materiálu brusiva
- Obr. 4. Dvě zóny vznikající při řezání vodním paprskem
- Obr. 5. Tvarová omezení řezu v ostrých vnitřních úhlech vlivem kruhového průřezu paprsku
- Obr. 6. Ukázka nápisu řezaného paserem
- Obr. 7. Ukázka loga řezaného paserem
- Obr. 8. Ukázka skleněného vzorku řezaného paserem
- Obr. 9. Ukázka skleněného vzorku řezaného paserem
- Obr. 10. Ukázka skleněného vzorku řezaného paserem
- Obr. 11. Ukázka skleněného vzorku řezaného paserem
- Obr. 12. Úkosity při řezání vodním paprskem
- Obr. 13. Schéma vyřezávání listového materiálu paprskem kapaliny
- Obr. 14. Schéma formování v závislosti na poloze vodní trysky vzhledem k materiálu
- Obr. 15. Graf závislosti mezi tryskou a opracovávaným materiálem a silou působení vodního paprsku, (1,2,3 – různé druhy materiálů)
- Obr.16. Graf matematické závislosti sil působení vodního paprsku na materiál (1,2,3 – různé druhy materiálů)
- Obr.17. Graf závislosti síly řezání na pevnosti materiálu v rozrušení σ_P
- Obr. 18. Graf změny posuvu v závislosti na tlaku kapaliny a průměru trysky
- Obr. 19. Základní schéma soustružení vodním paprskem
- Obr. 20. Zkušební tělísko
- Obr. 21. Přístroj na měření drsnosti povrchu SJ - 301
- Obr. 22. Grafické rozčlenění tolerančního pole dle metody Precontrol
- Obr. 23. PMMA – závislost šířky vzorku s1 na řezné rychlosti v
- Obr. 24. PMMA – závislost šířky vzorku s2 na řezné rychlosti v
- Obr. 25. PMMA – závislost rozdílu šířek vzorku s1-s2 na řezné rychlosti v
- Obr. 26. PVC – závislost šířky vzorku s1 na řezné rychlosti v
- Obr. 27. PVC – závislost šířky vzorku s2 na řezné rychlosti v
- Obr. 28. PVC – závislost rozdílu šířek vzorku s1-s2 na řezné rychlosti v
- Obr. 29. PMMA – závislost Ra na různých tloušťkách (pro příčný směr)

Obr. 30. PMMA – závislost R_a na různých tloušťkách (pro podélný směr)

Obr. 31. PMMA – závislost R_z na různých tloušťkách (pro podélný směr)

Obr. 32. PMMA – závislost R_z na různých tloušťkách (pro příčný směr)

Obr. 33. Porovnání drsnosti PMMA desky s drsností PERTINAXOVÉ desky
($t = 3\text{mm}$, $v = 1500\text{m/min}$)

Obr. 34. Závislost řezné rychlosti $v = 2,5\text{m/min}$ na šířce řezu s_1 s_2 , $t = 2\text{mm}$

Obr. 35. Závislost řezné rychlosti $v = 1,5\text{m/min}$ na šířce řezu s_1 s_2 , $t = 2\text{mm}$

Obr. 36. Závislost řezné rychlosti $v = 1\text{m/min}$ na šířce řezu s_1 s_2 , $t = 2\text{mm}$

Obr. 37. Závislost řezné rychlosti $v = 2\text{m/min}$ na šířce řezu s_1 s_2 , $t = 3\text{mm}$

Obr. 38. Závislost řezné rychlosti $v = 1,5\text{m/min}$ na šířce řezu s_1 s_2 , $t = 3\text{mm}$

Obr. 39. Závislost řezné rychlosti $v = 1\text{m/min}$ na šířce řezu s_1 s_2 , $t = 3\text{mm}$

Obr. 40. Závislost řezné rychlosti $v = 2\text{m/min}$ na šířce řezu s_1 s_2 , $t = 6\text{mm}$

Obr. 41. Závislost řezné rychlosti $v = 1,5\text{m/min}$ na šířce řezu s_1 s_2 , $t = 6\text{mm}$

Obr. 42. Závislost řezné rychlosti $v = 1\text{m/min}$ na šířce řezu s_1 s_2 , $t = 6\text{mm}$

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Parametry zkušebního tělíska

Tab. 2. PMMA ($t = 2\text{mm}$) - Závislost šířky vzorku na řezné rychlost

Tab. 3. PMMA ($t = 3\text{mm}$) - Závislost šířky vzorku na řezné rychlosti

Tab. 4. PMMA ($t = 6\text{mm}$) - Závislost šířky vzorku na řezné rychlosti

Tab. 5. PVC ($t = 4\text{mm}$, bílá deska) - Závislost šířky vzorku na řezné rychlosti

Tab. 6. PVC ($t = 4\text{mm}$, žlutá deska) - Závislost šířky vzorku na řezné rychlosti

Tab. 7. PVC ($t = 4\text{mm}$, červená deska) - Závislost šířky vzorku na řezné rychlosti

Tab. 8. Parametry drsnosti řezné plochy pro PMMA pro tloušťku 2mm

Tab. 9. Parametry drsnosti řezné plochy pro PMMA pro tloušťku 3mm

Tab. 10. Parametry drsnosti řezné plochy pro PMMA pro tloušťku 6mm

Tab. 11. Parametry drsnosti řezné plochy pro PVC pro tloušťku 4mm (bílá deska)

Tab. 12. Parametry drsnosti řezné plochy pro PVC pro tloušťku 4mm (žlutá deska)

Tab. 13. Parametry drsnosti řezné plochy pro PVC pro tloušťku 4mm (červená deska)

Tab. 14. Parametry drsnosti řezné plochy pro PERTINAX pro tloušťku 3mm