



Problematika vrtání do kompozitních materiálů

Diplomová práce

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie a materiály
Autor práce: Bc. Artur Knap
Vedoucí práce: doc. Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.
Katedra obrábění a montáže





Problematics of drilling into composite materials

Master thesis

Study programme: N2301 Mechanical Engineering

Study branch: Engineering Technology and Materials

Author: Bc. Artur Knap

Supervisor: doc. Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.

Department of Machining and Assembly





Zadání diplomové práce

Problematika vrtání do kompozitních materiálů

Jméno a příjmení: **Bc. Artur Knap**
Osobní číslo: S19000233
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie a materiály
Zadávací katedra: Katedra obrábění a montáže
Akademický rok: **2020/2021**

Zásady pro vypracování:

1. Shrnutí dosavadních poznatků o vrtání do kompozitních materiálů.
2. Volba rezných nástrojů (vrtáků) a rezných podmínek včetně vhodných procesních médií.
3. Návrh metodiky experimentů pro vrtání do kompozitních materiálů – studie z hlediska opotřebení rezného nástroje, teplot a sil při obrábění, tvorby třísky a celkové integrity obrobeneho povrchu.
4. Realizace experimentů.
5. Hodnocení získaných výsledků v rámci opotřebení rezného nástroje, teplot a sil při obrábění, tvorby třísky a celkové integrity obrobeneho povrchu.
6. Shrnutí a zhodnocení dosažených výsledků a vyvození závěrů.

<i>Rozsah grafických prací:</i>	dle potřeby
<i>Rozsah pracovní zprávy:</i>	50 – 60 stran textu
<i>Formazpracování práce:</i>	tištěná/elektronická
<i>Jazyk práce:</i>	Čeština

Seznam odborné literatury:

1. KOCMAN, K., PROKOP, K. Technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERN Brno, s.r.o., 2001. 274 s. ISBN 80–214–196–2.
2. BILÍK, O. Obrábění II. (1.Díl): Fyzikálně mechanické záležitosti procesu obrábění. Ostrava: Vysoká škola báňská –TU Ostrava, 1994. 132 s. ISBN 80–7078–228–5.
3. HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Praha: MM publishing s.r.o, 2008. 235 s. ISBN: 8025422502.
4. MÁDL, J., JERSÁK, J., HOLEŠOVSKÝ, F., kol. Jakost obráběných povrchů. Ústí nad Labem: UJEP, 2003. 179 s. ISBN 80–7044–539–4.

Vedoucí práce: doc. Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.
Katedra obrábění a montáže

Datum zadání práce: 6. října 2020

Předpokládaný termín odevzdání: 6. dubna 2022

L.S.

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

doc. Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mě požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 07. 06. 2021

Podpis:

Anotace

Obsahem diplomové práce je výzkum problematiky vrtání do kompozitních materiálů.

Teoretická část obsahuje nezbytné základní pojmy týkající se řešené problematiky. Do této části práce jsou zahrnuty informace o technologii vrtání, nástrojových a kompozitních materiálech.

Experimentální část obsahuje informace o použitých strojích, zařízeních a metodice pro jednotlivé experimenty. V závěru práce jsou popsány naměřené hodnoty a zhodnocení experimentu.

Klíčová slova: vrtání, kompozitní materiál, epoxidová pryskyřice, uhlíková vlákna.

Annotation

The diploma thesis deals with a research of problematics of drilling into composite materials.

All necessary basic terms concerning researched topic are mentioned in the theoretical part of the thesis. This theoretical chapter includes knowledge of drilling, tool and composite materials.

The experimental part contains information about used machines, devices and methodology for individual experiments. There are reports on measured values and processed results at the end of the thesis.

Key words: drilling, composite material, epoxide resin, carbon fibre.

Katedra obrábění a montáže

Evidenční číslo práce: KOM 1309

Jméno a příjmení: Bc. Artur Knap

Vedoucí práce: doc. Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.

Konzultant: Ing. Miloslav Ledvina, Ph.D.

Počet stran: 109

Počet příloh: 1

Počet tabulek: 52

Počet obrázků: 23

Počet grafů: 60

Obsah

1. ÚVOD	12
2. TEORETICKÁ ČÁST	14
2.1. Vrtání do kompozitních materiálů	14
2.2. Řezný nástroj.....	15
2.2.1. Geometrie řezného nástroje.....	16
2.2.2. Volba materiálu řezného nástroje.....	18
2.3. Volba řezných podmínek	20
2.4. Pokročilé technologie vrtání.....	20
2.5. Vývoj vrtání kompozitních materiálů	22
2.6. Kompozitní materiály	24
2.6.1. Mechanismus porušení	24
2.6.2. Adheze	26
3. METODIKA MĚŘENÍ A HODNOCENÍ EXPERIMENTU	28
3.1. Zkušební vzorky.....	28
3.2. Popis strojů, nástrojů, měřících zařízení a pomůcek.....	30
3.2.1. Pásová pila.....	31
3.2.3. Frézka FNG 32.....	32
3.2.4. Použité nástroje.....	33
3.2.5. Elektrický odporový dynamometr	34
3.2.6. Laboratorní profiloměr Mitutoyo.....	34
3.2.7. Dílenský mikroskop ZEISS	35
3.2.8. Měření teploty.....	36
3.2.9. Ruční refraktometr Brix 0-18 % ATC	36
3.2.10. Řezná kapalina Blasocut® BC 25 MD.....	37
3.2.11. Dutinový mikrometr	37
3.3. Řezné podmínky	38
3.4. Metodika experimentů.....	39
3.4.1. Příprava vzorků	39
3.4.2. Příprava nástrojů	39
3.4.3. Příprava PM	39
3.4.4. Proces vrtání	39
3.4.5. Krouticí moment a řezná síla.....	39
3.4.6. Měření teploty.....	40
3.4.7. Měření opotřebení nástroje VB.....	40
3.4.8. Drsnost povrchu vzorků.....	40
3.4.9. Rozměrová stabilita.....	40

3.5.	Vyhodnocení výsledků působících krouticích momentů a řezných sil.....	41
3.5.1.	Čistá epoxidová pryskyřice.....	41
3.5.2.	Epoxidová pryskyřice + roving 3700 TEX 50K	44
3.5.3.	Epoxidová pryskyřice + tkanina 800 TEX 12K.....	47
3.5.4.	Kompozitní materiál ČVUT	50
3.6.	Vyhodnocení teplot.....	53
3.6.1.	Čistá epoxidová pryskyřice.....	53
3.6.2.	Epoxidová pryskyřice + roving 3700 TEX 50K	54
3.6.3.	Epoxidová pryskyřice + tkanina 800 TEX 12K.....	55
3.6.4.	Kompozitní materiál ČVUT	56
3.7.	Vyhodnocení opotřebení.....	57
3.7.1.	Čistá epoxidová pryskyřice.....	57
3.7.2.	Epoxidová pryskyřice + roving 3700 TEX 50K	61
3.7.3.	Epoxidová pryskyřice + tkanina 800 TEX 12K.....	65
3.7.4.	Kompozitní materiál ČVUT	69
3.8.	Vyhodnocení drsnosti	73
3.8.1.	Čistá epoxidová pryskyřice.....	73
3.8.2.	Epoxidová pryskyřice + roving 3700 TEX 50K	77
3.8.3.	Epoxidová pryskyřice + tkanina 800 TEX 12K.....	81
3.8.4.	Kompozitní materiál ČVUT	85
3.9.	Vyhodnocení rozměrové stability	89
3.9.1.	Čistá epoxidová pryskyřice.....	89
3.9.2.	Epoxidová pryskyřice + roving 3700 TEX 50K	91
3.9.3.	Epoxidová pryskyřice + tkanina 800 TEX 12K.....	93
3.9.4.	Kompozitní materiál ČVUT	95
3.10.	Tvorba třísky.....	97
3.11.	Integrita povrchu.....	98
4.	Diskuze	99
5.	Závěr	103
6.	Seznam použité literatury.....	106

Seznam použitých symbolů a zkratk

ZKRATKA/SYMBOL	JEDNOTKY	NÁZEV
CFRP	[-]	carbon fiber reinforced polymer
CNC	[-]	computer numerical control
CVD	[-]	chemical vapour deposition
f	[mm·ot ⁻¹]	posuv
F	[N]	řezná síla
HSS	[-]	rychlořezná ocel
HSS-Co	[-]	rychlořezná ocel s obsahem cobaltu
HSS-TiN	[-]	rychlořezná ocel s TiN povlakem
M	[N.m]	kroucí moment
n	[ot·min ⁻¹]	otáčky
PBO	[-]	poly-para-fenylenebisoxazolone
PCD	[-]	polycrystalline Diamond
PES	[-]	polyester
PM	[-]	procesní médium
R_a	[μm]	střední aritmetická úchylna profilu
R_t	[μm]	celková výška profilu
R_z	[μm]	největší výška profilu
RTM	[-]	resin transfer moulding
SiC	[-]	karbid křemíku

SK	[-]	slinutý karbid
SK-TiAlN	[-]	slinutý karbid s TiAlN povlakem
v_f	$[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$	posuvová rychlost
VBD	[-]	vyměnitelná břitová destička
Δ	$[\text{°}]$	úhel vyklopení nástroje

1. ÚVOD

Vysoká dynamika rozvoje vláknově vyztužených kompozitních materiálů s pryskyřičnými matricemi a vědecky podložené pochopení základních principů těchto materiálů se v současné době projevuje prudkým nárůstem jejich komerčního využití v tradičních i netradičních aplikacích. [10]

K hlavním důvodům patří zejména nízká měrná hmotnost, volitelná pevnost (dána druhem vyztužujících vláken a jejich distribucí), vysoká korozivzdornost, nízký útlum elektromagnetických vln, vynikající poměr hustoty k pevnosti atd. Ačkoliv kompozitní materiály jsou většinou vyráběny do téměř finálních rozměrů, zvyšující se požadavky na jakost funkčních a estetických vlastností výrobků vedou k nutnosti aplikovat technologii obrábění. K nejrozšířenějším obráběcím operacím při výrobě dílů z vláknově vyztužených kompozitů patří soustružení, frézování, řezání, broušení a zejména vrtání, sloužící k výrobě děr pro různé spojovací součásti. [8, 10]

V současnosti je na trhu dostupné relativně široké spektrum kompozitních materiálů lišících se druhem matrice, typem a charakterem výztuží (typ vláken, tkaniny, rohože, rouna) a mnohdy i způsobem výroby (laminace, tažení, navíjení, odstředivé lití, RTM). Kombinací těchto jednotlivých aspektů lze získat nepřeberné množství materiálů o naprosto odlišných mechanických a fyzikálních vlastnostech. [8, 10]

Výhoda těchto materiálů ve srovnání s tradičními kovovými materiály spočívá v jejich vyšších měrných hodnotách pevnosti a tuhosti. Velkou předností je i odolnost proti korozi, odolnost proti opotřebení, minimální tepelná vodivost (300x nižší než u hliníku), elektroizolační vlastnosti aj. Na druhou stranu při obrábění kompozitních materiálů dochází k mnoha poškozením, která jsou svým vzhledem, mechanismy vzniku a porušování jiná než u kovových materiálů. Nejčastějším typem poškození je delaminace, která je spojována především s vrtáním a může k ní docházet jak při vstupu (odlupování povrchové vrstvy), tak i výstupu (odlupování neobrobené vrstvy pod nástrojem) vrtáku z materiálu. Kvalita obrobeného povrchu je zhoršována i tepelným ovlivněním z řezného procesu – vyplavením pryskyřice s následným vydíráním povrchu. Na všechny tyto uvedené průvodní jevy je třeba reagovat volbou správného typu nástrojového materiálu a speciálně uzpůsobenou geometrií řezného nástroje. [10]

Hlavním cílem předkládané práce je zjištění sil při obrábění, teplot, opotřebení rezného nástroje, drsnosti povrchu, rozměrové stability obráběného materiálu tvorby třísky a celkové integrity obrobeného povrchu při vrtání do kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými vlákny.

Diplomová práce je rozdělena do tří základních částí: teoretické, experimentální a závěrečné.

Teoretická část předkládané práce souvisí se současným stavem řešené problematiky, obsahuje základní informace vztahující se k vrtání, nástrojovým materiálům, kompozitním materiálům a problematice jejich obrábění.

Experimentální část popisuje přípravu experimentů a jejich výsledky. Zabývá se přípravou polotovaru, volbou rezných podmínek a procesem obrábění. Dále popisuje stroje a zařízení, které byly využity v rámci měření.

Závěrečná část zhodnocuje a diskutuje výsledky získané v rámci výzkumu.

2. TEORETICKÁ ČÁST

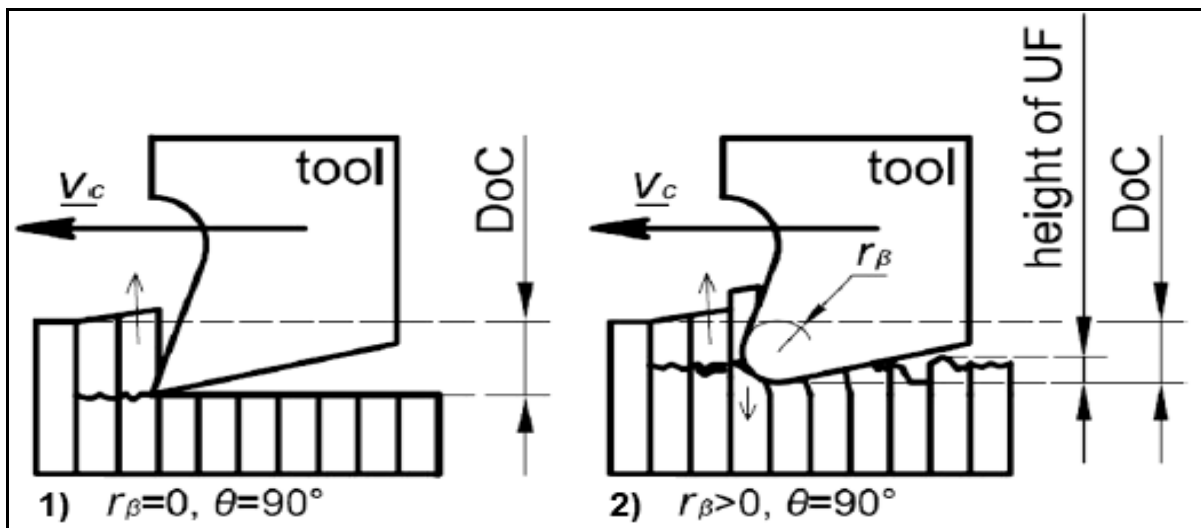
2.1. Vrtání do kompozitních materiálů

K nejčastěji používaným kompozitním materiálům patří materiály používající uhlíková vlákna a pryskyřici (CFRP). Tyto materiály nabízejí atraktivní vlastnosti, jako je např. poměr hmotnosti vůči síle a vysoká odolnost. [6]

CFRP materiály jsou pro každou konstrukci jedinečné a stejně tak klade jejich struktura vysoké nároky i na obrábění, pro které je nutné používat speciální nástroje. Toto platí i pro proces vrtání kompozitních materiálů. Konstrukce nástrojů pro vrtání klade velký důraz na geometrii a použité materiály nástroje spolu s ohledem na možné poruchové režimy. [6]

Zatímco obrábění tvárných kovů je založeno na stříhu, obrábění kompozitů zahrnuje několik mechanismů: tlakem nebo ohybem indukované zlomení zesilujícího vlákna, stříh, poddajnost a prasknutí matrice či dělení na hranici vrstev, nebo narušení podkladové vrstvy. Při působení nástroje hrají významnou roli i další faktory, jako je např. poloha vláken, strukturální dutiny, materiálové vlastnosti, geometrie nástroje atd, viz obr 1. To vše vyžaduje nasazení nástrojů, které při práci s kompozitními materiály co nejvíce eliminují rizikové faktory. [2]

Při obrábění kompozitních materiálů převládá výroba děr, při které jsou využívány různé typy zařízení a vrtáků, které prošly intenzivním technologickým vývojem. V současnosti představuje problém výroba otvorů s vyšší přesností, kvalitou opracování, dostatečně vysokou efektivitou a spolehlivostí. [6]



Obr. 1 – Vliv řezné geometrie nástroje na proces obrábění kompozitního materiálu s vláknovou výztuží. [5]

1 – poloměr zaoblění špičky nástroje $r_{\beta}=0^{\circ}$; 2 – poloměr zaoblění špičky nástroje $r_{\beta}>0^{\circ}$

v_c – řezná rychlost; θ – úhel nastavení nástroje, tool – nástroj, DoC – hloubka záběru; height of UF – výška neodříznutých vláken

2.2. Řezný nástroj

Řezný nástroj musí v řezu generovat velmi malé množství tepla a toto teplo navíc účinně odvádět. Z tohoto důvodu je třeba volit pozitivní geometrii břitu s nízkým sklonem k adhezi, a to spolu s vhodnými řeznými podmínkami. Samotný řezný materiál nebo povlak by měl mít dostatečnou tvrdost, zajišťující odolnost vůči opotřebení, odpovídající pevnost pro podporu ostré geometrie a větší tepelnou vodivost při vysoké otěruvzdornosti. Pozitivní geometrie minimalizuje namáhání materiálu, které může způsobit delaminaci, využívá se ostrá geometrie pro řezání vláken s lokalizovaným, indukovaným napětím. Odstranění třísek není u kompozitních materiálů nezbytné, ale musí být odstraňován prach vznikající při jejich opracování. [8]

Kvalita díry je obvykle spojována se stupněm oddělení vrstev ve spodní části obráběného materiálu a také s množstvím zbytkových vyčnívajících částí vláken uvnitř otvoru. Ty však jako takové nejsou přímo měřitelné, a navíc představují složitý problém z hlediska vytvoření podmínek pro správný záběr obráběcího nástroje. Mimo jiné ke zhoršení kvality díry často dochází dříve, než jsou na nástroji patrné známky opotřebení. [8, 9, 10]

Nástroj pak také musí zabezpečit uspokojivé utváření třísek a jejich odvádění. Správné použití vhodného specializovaného obráběcího nástroje je klíčem k dosažení uspokojivé kvality děr a potlačení tvorby prachových částic při obrábění součástí z kompozitních materiálů. Kvalitativní parametry díry používané při vrtání kovových materiálů nelze přímo aplikovat na vrtání kompozitů. Nedochozí totiž ke vzniku třísek a konvenční posuzování kvality opracování obvykle není vhodným ukazatelem. [9]

2.2.1. Geometrie řezného nástroje

Z dosavadní praxe se doporučuje pro obrábění kompozitních materiálů speciální geometrie vrtáků, která je znázorněna na obr. 2. Vrtáky s běžně ostřenou špičkou by měli mít, pokud možno, co nejmenší velikost příčného ostří, kterou lze ovlivnit způsobem ostření hřbetní plochy nástroje, viz obr. 3. Velikost příčného ostří má negativní vliv na proces řezání, protože v důsledku negativního úhlu čela nastává zvýšení odporu materiálu proti vniknutí nástroje a kvůli nízké řezné rychlosti se materiál spíše vytlačuje než řeže. Negativní úhel čela a nízká rychlost může vést až ke vzniku delaminace materiálu. [2, 5]

Nejdůležitějšími aspekty nástrojů se speciální geometrií je snížení výrobních časů, působení přítlačných a axiálních sil, které mají významný vliv na vznik delaminace a celkovou integritu obráběného materiálu. [5]

Dvojhrotý spirálový vrták, viz obr. 2-1, oproti konvenčnímu vrtáku, vykazuje nižší hodnoty působících sil a delaminace. Při vrtání je otvor nejprve předvrtán a díky konstrukci druhé řezné hrany je zhotoven finální povrch otvoru. K zajištění vyšší jakosti obrobeného povrchu, ale také vyšší produktivity práce, lze opatřit nástroj diamantovým povlakem. [5]

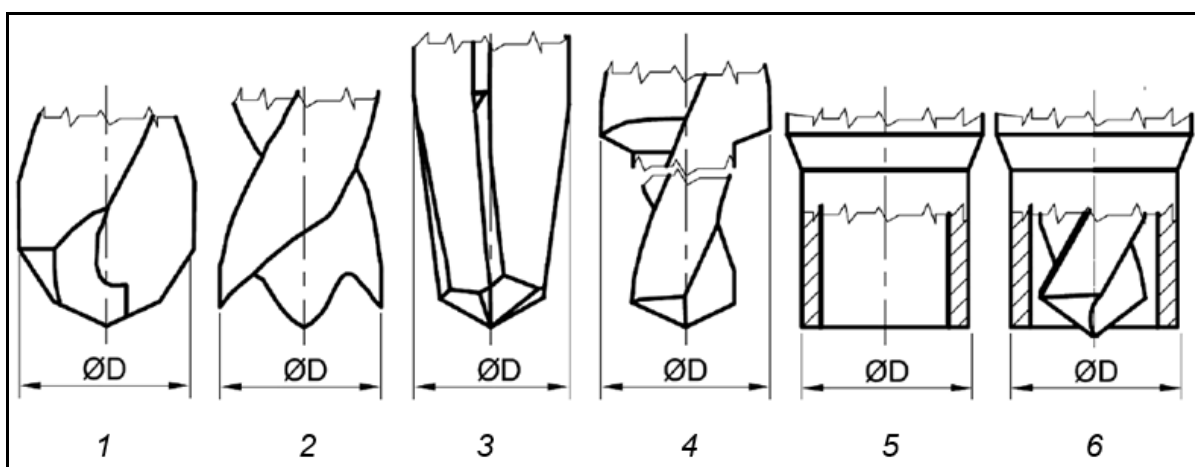
Výborných parametrů produktivity práce spolu s nízkou delaminací lze docílit za použití svícnového vrtáku. Konstrukce této speciální geometrie nástroje zajišťuje předepnutí vrtané vrstvy s následným odříznutím a vytlačěním z místa řezu. Schéma nástroje viz obr. 2-2. [5]

Dýkový vrták je jiným typem dvojhrotého vrtáku, který je charakteristický čtyřmi dlouhými řeznými hranami. Při požadavku výborné kvality povrchu je dýkový vrták

z tvrdokovu vhodnou volbou, je však nutné brát v potaz delší výrobní časy, které jsou způsobeny charakteristickou geometrií nástroje, viz obr. 2-3. [5]

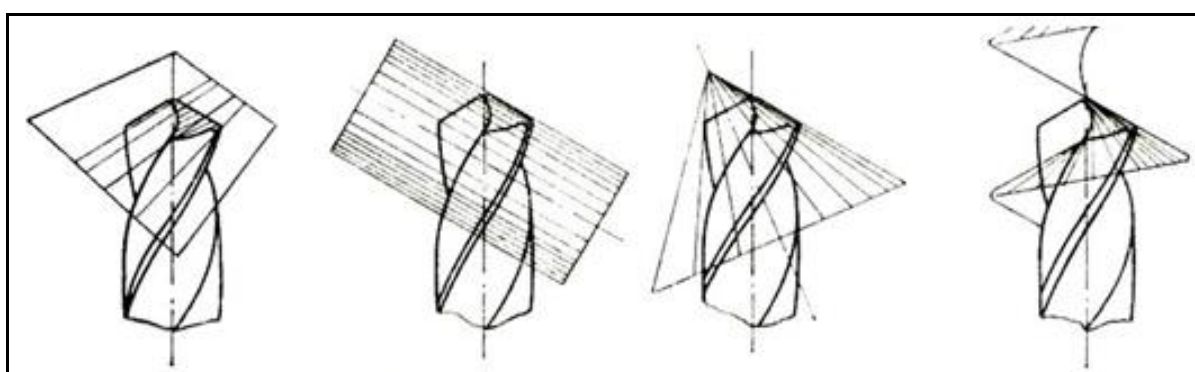
Principu předvrtání a následným vyvrtáním finálního průměru otvoru využívají i krokové vrtáky, které jsou charakteristické vysokou produktivitou a nízkou delaminací na vstupní i výstupní vrstvě kompozitu. Krokový vrták je znázorněn na obr. 2-4. [5]

Jádrové vrtáky, viz obr. 2-5, 6, jsou duté brousící vrtáky. Vrtáky brousí finální rozměry otvoru za využití diamantového abraziva, tím je dosaženo minimální velikosti delaminace. [5]



Obr. 2 – Přehled používané geometrie pro obrábění kompozitních materiálů. [5]

1 – dvojhrotý spirálový vrták; 2 – svíčkový vrták; 3 – dýkový vrták; 4 – krokový vrták; 5 – jádrový vrták; 6 – speciální jádrový vrták;



Obr. 3 – Způsoby broušení hřbetní plochy konvenčního nástroje. [1]

1 – rovinné broušení; 2 – válcové broušení; 3 – kuželové broušení; 4 – šroubovitě broušení

2.2.2. Volba materiálu řezného nástroje

Pro obrábění kompozitních materiálů lze použít i nástroje z rychlořezné oceli, ale je nutné brát v úvahu nižší hodnoty trvanlivosti a s tím spojenou častou výměnu a ostření nástroje. Rychlořezné oceli v porovnání s ostatními řeznými materiály nedosahují takové tvrdosti a z tohoto důvodu mají nižší abrazivní odolnost. Dalším nedostatkem rychlořezné oceli je relativně nízká tepelná vodivost, která je 3 až 4x nižší než u slinutých karbidů a vysoké teploty v oblasti ostří nástroje snižují trvanlivost břitu. Tepelná vodivost je pro obrábění kompozitních materiálů důležitá, protože vzniklé teplo je v maximální míře odváděno z místa řezu nástrojem. Odolnost proti opotřebení a tím i trvanlivost nástroje lze zvýšit použitím různých otěruvzdorných povlaků. I při použití povlaků je intenzita opotřebení stále výrazná, z toho lze usoudit, že povlak není příliš významný. [2]

Nástroje ze slinutých karbidů oproti nástrojům z rychlořezné oceli dosahují výrazně lepších výsledků, a to zejména díky lepším mechanickým vlastnostem. Ty závisí zejména na velikosti zrna karbidické fáze a obsahu pojiva. Tvrdost nástroje lze zvýšit jemnějším zrnem karbidické fáze, zatímco hrubší zrna a vyšší podíl pojiva naopak zvyšují houževnatost. Proto se při obrábění kompozitních materiálů vyztužených vlákny používají jemnozrné slinuté karbidy. Stejně jako u nástrojů z rychlořezné oceli, lze využít různé druhy povlaků, které zvýší odolnost proti opotřebení. Povlaky mohou být na bázi karbidů, nitridů, oxidů nebo diamantu. Při obrábění je však nutné zohlednit nižší hodnoty houževnatosti nástroje, zejména pokud dochází k dynamickému zatížení břitu. [8, 9]

Při obrábění kompozitních materiálů dosahují nejlepších výsledků nástroje z polykrystalického diamantu a jeho povlaků. Vyznačují se zejména vysokou tvrdostí, která dokáže odolávat vysokému abrazivnímu účinku. Dále vynikající tepelnou vodivostí, díky ní dochází k rychlému odvodu tepla z místa řezu, to je předpokladem pro výbornou kvalitu obrobeneho povrchu a dlouhou trvanlivost nástroje. Trvanlivost nástrojů je mnohonásobně vyšší než u nástrojů ze slinutých karbidů. Vhodnou aplikací nástroje při obrábění kompozitních materiálů je možné zvýšení produktivity o 50 až 100 % a to v důsledku zvýšení řezných podmínek, zejména řezné rychlosti. [6]

Diamantový povlak vykazuje téměř 10násobné zlepšení životnosti nástrojů oproti vrtání s využitím slinutého karbidu. Diamantové povlaky vyžadují speciální karbidové substráty pro nejlepší přilnavost, které však někdy postrádají houževnatost požadovanou pro náročné aplikace. Příklady nástrojů vhodných pro vrtání kompozitních materiálu jsou zobrazeny na obr. 4.[6]

V současné době jsou na trhu pouze tři typy konvenčních nástrojů, které splňují požadavky na geometrii i materiál vyhovující pro práci s kompozity:

- **vrtáky s PCD složkami** – PCD povlak je sintrován přímo na karbid (umožňuje komplexní tvarování geometrie),
- **diamantové vrtáky** (CVD diamantový povlak má vyšší tvrdost než PCD a je možná libovolná geometrie),
- **orbitální vrtáky** (šikmé frézování otvoru snižuje tah a tím i riziko odlomení či delaminace kompozitního materiálu). [6]



Obr. 4 – Příklady nástrojů od firmy SECO splňujících požadavky na geometrii i materiál pro práci s kompozity. [16,17]

1 – vrták SD203A-6.06-21-6R1-CX2 s částí nástroje z PCD; 2 – vrták SD205-6.00-31-6R1-CX31 s povlakem z PCD

2.3. Volba řezných podmínek

Řezná rychlost pro obrábění kompozitních materiálů je volena o 25 až 30 % nižší, než jsou hodnoty pro obrábění ocelových materiálů. Naopak hodnoty posuvu se volí o 15 až 20 % vyšší. Vyšší posuvy a nižší řezné rychlosti jsou voleny z důvodů zamezení vzniku problémů při obrábění, zejména tavení a vytahování vláken z matrice. [2]

Řezné podmínky se při vrtání pohybují v širokém rozsahu a jsou závislé zejména na druhu vrtáku. [6]

Hloubka záběru při vrtání do plného materiálu je dána poloměrem nástroje, v případě vrtání do předvrtaných otvorů je určena rozdílem poloměru otvoru před a po obrábění. Jestliže požadujeme otvor s vyšší přesností a jakostí obrobené plochy, je nutno zajistit pro jednotlivé operace dostatečný přídavek na obrábění. [4]

Posuv na otáčku se pohybuje obvykle v rozsahu 0,05 až 1,1 mm/ot. Velikost posuvu závisí zejména na druhu nástroje a obráběném materiálu. [4]

Řezné rychlosti jsou v porovnání se soustružením a frézováním nižší v důsledku nepříznivých podmínek, ve kterých nástroj pracuje. Hlavním důvodem nižších pracovních rychlostí je špatný odvod tepla z místa řezu. To vede ke značnému tepelnému zatížení břitu, proto se v naprosté většině případů používá chlazení chladicí kapalinou. Řezné rychlosti se zpravidla pohybují v rozsahu 10 až 300 m.min⁻¹. [4, 8]

2.4. Pokročilé technologie vrtání

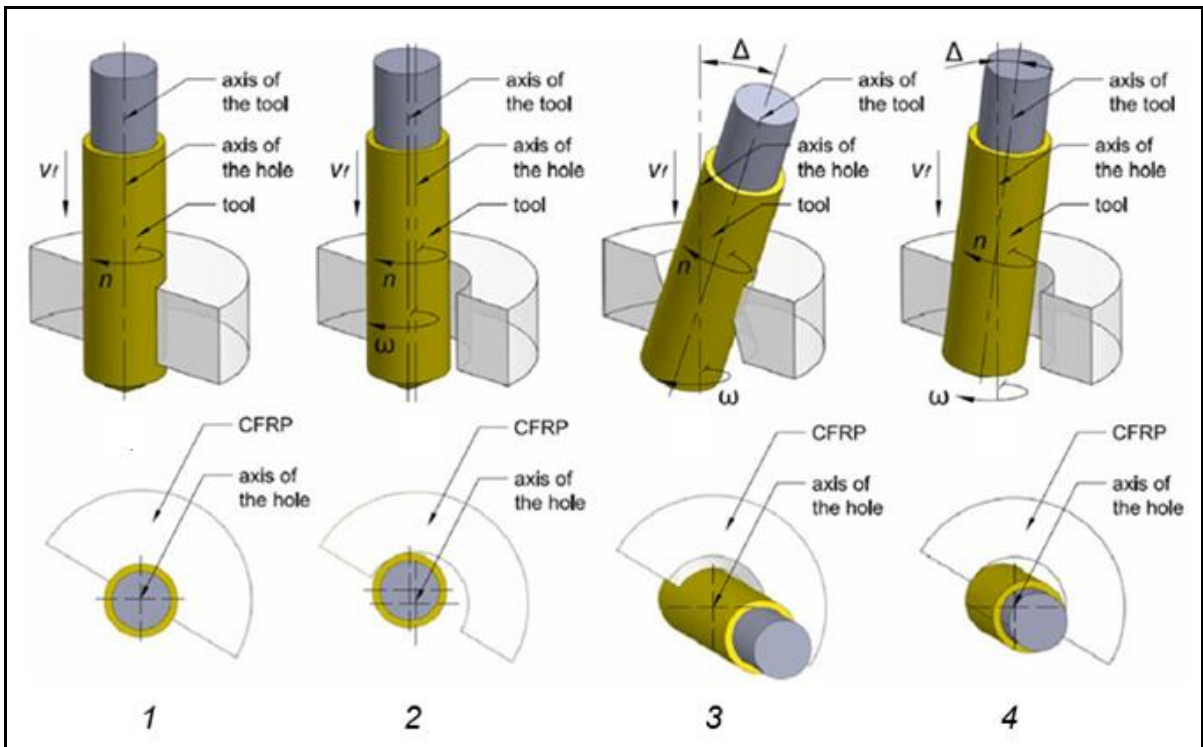
K zajištění optimálních výsledků během procesu vrtání kompozitních materiálů lze kromě speciální geometrie a konvenční dráhy nástroje využít i pokročilé technologie vrtání. Mezi pokročilé technologie vrtání řadíme orbitální, kyvné a nakloněné spirálovité vrtání. [5]

U konvenčního vrtání, viz obr. 5-1, se nástroj otáčí kolem vlastní osy, má trvalý kontakt s okrajem otvoru, přičemž ve středu vrtáku je rychlost úběru materiálu nulová. Průměr otvoru je stejný jako průměr vrtáku, přičemž průběžně vznikají třísky. [5]

Při orbitálním vrtání u kompozitních materiálů probíhá proces jiným způsobem. Průměr řezného nástroje je menší než průměr otvoru. Nástroj rotuje kolem své vlastní osy (mimo osu otvoru) a obíhá kolem vnitřního okraje otvoru, přičemž řezná hrana je v kontaktu s okrajem otvoru přerušovaně. Schéma orbitálního vrtání viz obr. 5-2. Snížená síla vytváří při orbitálním vrtání v CFRP otvory bez delaminací. Přerušované řezání a částečně zapojené ostří zajišťují nižší teplotu v místě řezu a tím i snížené riziko roztavení matrice, řezný nástroj i povrch otvoru mohou být efektivněji chlazeny. Menší průměr nástroje, než je průměr otvoru, znamená, že jeden nástroj lze využít pro otvory s různými průměry a tím zredukovat i zásobu nástrojů, ale také snazší odvod třísek a snížené riziko poškození třískami. Výraznou nevýhodou této technologie jsou 2 až 4x delší výrobní časy oproti konvenčnímu vrtání. [5]

Porovnáním konvenční a kyvné technologie vrtání bylo zjištěno, že 5osým kyvným vrtáním otvorů bylo dosaženo výrazně nižšího mechanického poškození otvorů a celkově vyšší kvality obráběných ploch. Přestože je implementace technologie kyvného vrtání do výrobního procesu velmi náročná, lze nalézt průmyslová odvětví, kde jsou nasazeni průmysloví roboti a tato technologie nalezne uplatnění, např. letecký a vesmírný průmysl. [5]

Analýzou řezných rychlostí konvenčního a nakloněného spirálového vrtání bylo poukázáno na skutečnost výskytu nulové řezné rychlosti v případě konvenční technologie. Při správném nastavení technologických parametrů: posuvová rychlost v_f a úhel vyklopení nástroje Δ , a za použití nakloněného spirálového vrtání lze efektivně eliminovat nulovou řeznou rychlost, zlepšit kvalitu povrchu otvoru a úběr třísek. [5]



Obr. 5 – Schéma používaných technologií vrtání kompozitních materiálů. [5]

1 – konvenční vrtání; 2 – orbitální vrtání; 3 – kyvné vrtání; 4 – nakloněné spirálové vrtání

v_r – posuvová rychlost; n – otáčky nástroje; ω – úhlová rychlost nástroje; Δ – úhel sklonu nástroje

Ačkoliv pokročilé technologie vrtání nabízí velké množství výhod je potřeba brát v potaz technologickou náročnost jednotlivých způsobů vrtání. Speciální geometrie a pokročilá dráha nástrojů zvyšuje množství faktorů, které mají výrazný dopad na proces vrtání a ve většině případů prodlužují výrobní časy. [5]

2.5. Vývoj vrtání kompozitních materiálů

Měnicí se průmyslové prostředí a ochrana životního prostředí přináší nové výzvy pro výzkumné pracovníky ke snížení výrobních časů a nákladů se současným zvyšováním efektivity výrobních procesů, zvýšení udržitelnosti, ekologičnosti a k vývoji pružných a chytrých procesů. [5]

Jedním z příkladů je proces výroby letadel, kdy je potřeba zhotovit tisíce otvorů do celé konstrukce z kompozitních materiálů, převážně CFRP. Současně je potřeba zajistit maximální efektivitu a výkon vrtání při minimálních výrobních časech v návaznosti na rozměrové požadavky. Proto je nevyhnutelný vývoj pokročilých výrobních technologií. [5]

V současné době je velmi využívaná technologie ultrazvukového asistovaného obrábění. Tato technologie zajišťuje velmi dobré výsledky v návaznosti na minimalizaci rozměrových vad a problematiku vrtání kompozitních materiálů (delaminace a neodříznutá vlákna). [5]

Další alternativou jsou speciální nástroje se snímači uloženými v těle nástroje a chytré CNC programy, které v reálném čase s pomocí vyhodnocovacího algoritmu řídí výrobní proces. [5]

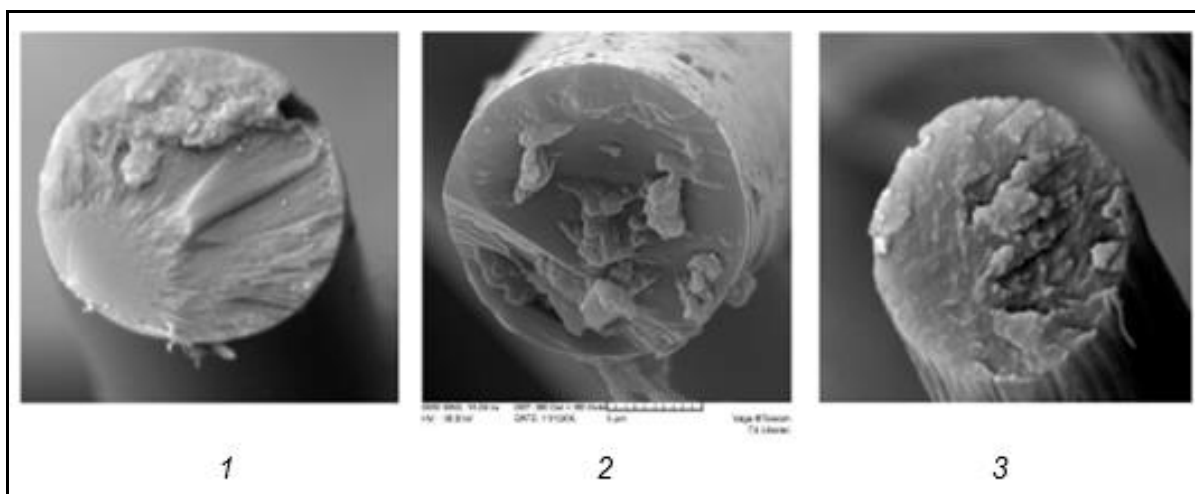
Toto a další řešení jsou v současné době předmětem vývoje a výzkumu. Na druhou stranu, stále větší pozornosti a důležitosti se dostává i udržitelnému obrábění v návaznosti na životní prostředí. Hlavním cílem spojeným s udržitelným obráběním je minimalizovat spotřebu energie a procesních kapalin, zvýšit recyklovatelnost řezných nástrojů a odpadu spojeného s technologiemi třískového obrábění. Důležitou oblastí výzkumu je i snížení škodlivého vlivu obrobených uhlíkových vláken na lidské zdraví a životní prostředí. [5]

2.6. Kompozitní materiály

V průmyslovém sektoru jsou nejčastěji používanými kompozitními materiály vlákny vyztužené plasty a dále tzv. sendvičové struktury. S těmito materiály se setkáváme v každodenním životě: používají se mimo jiné v konstrukci dopravních prostředků, včetně kolejových vozidel, dopravních letadel a také lodí. Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů je předurčují také pro použití ve vysoce namáhaných aplikacích. [7]

2.6.1. Mechanismus porušení

Mechanismus porušení se posuzuje z morfologie lomové plochy vláken při prasknutí vlivem tahového namáhání. Pro vlákna skleněná, vlákna keramická a uhlíková je typický křehký lom, obr. Křehký lom je iniciován trhlinou nebo defektem, kde se koncentruje napětí. To má za následek růst trhliny (zrcadlová část na lomové ploše) a vznik dalších trhlin způsobujících lom vlákna. Příklady křehkých a houževnatých lomů jsou zobrazeny na obr. 6, 7.[7]



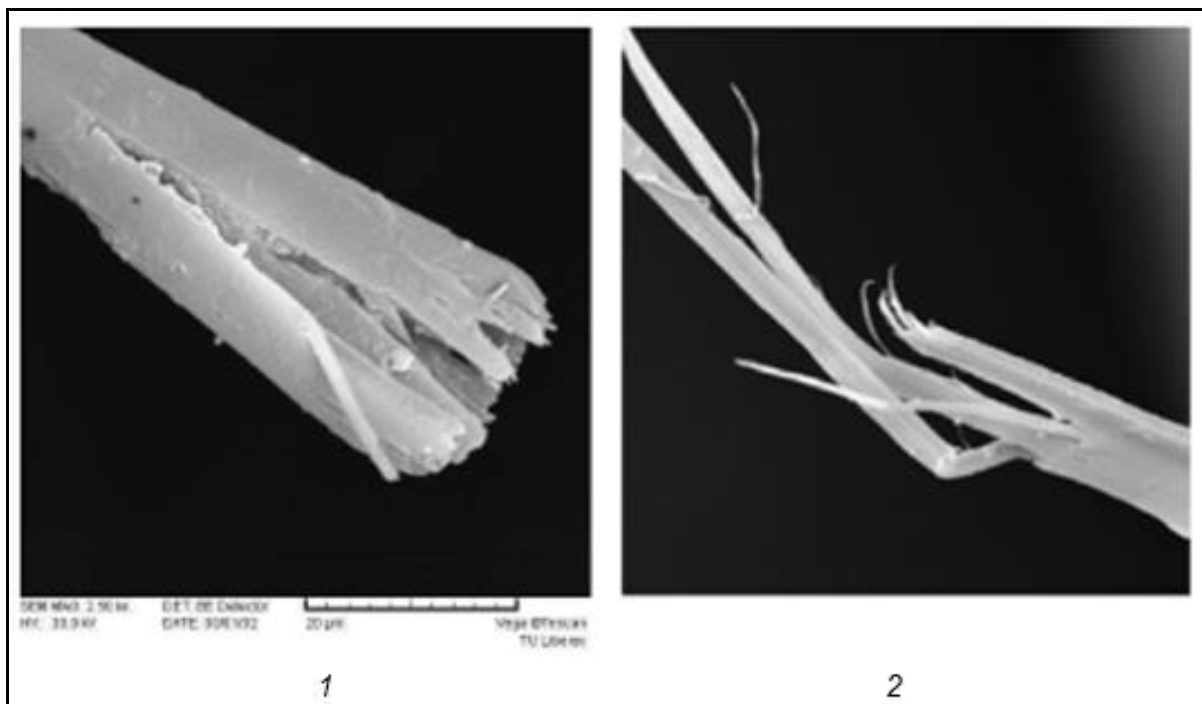
Obr. 6 – Příklady křehkých lomů vlákna. [7]

1 – skleněné vlákno; 2 – keramické vlákno; 3 – uhlíkové vlákno



Obr. 7 – Příklady houževnatého lomu PES vláken. [7]

. U většiny syntetických vláken zvlákněvaných z taveniny dochází k houževnatému lomu. Zde je charakteristické pomalé šíření trhliny způsobující typický V zářez na lomové ploše, který je doprovázen plastickým kluzem na druhé straně vlákna od V zářezu, což způsobí jeho porušení. U vysoce pevných vláken typu aromatických polyamidů PBO atd. dochází k typickému axiálnímu štěpení, viz obr. 8. [7]



Obr. 8 – Příklady axiálního štěpení u vysoce pevných vláken. [7]

1 – Kevlar; 2 – Nomex

Toto štěpení (délka je zhruba 100násobek průměru vlákna) je důsledek povrchového porušení, které vede ke vzniku smykového napětí oddělujícího polymerní řetězce (meziřetězcové vazby jsou podstatně slabší). Zajímavé je, že z původního jednoho štěpení se postupně oddělují další fibrily (trhlina se větví). Vlivem tohoto štěpení je průměr vlákna v místě přetržení 2 až 4 μm , což je zhruba 3 až 6x méně než průměr výchozího vlákna. U vláken zvlákněvaných z roztoku a vláken mikroporézních (obsahujících síť mikroductin) je typický granulární lom. Kritické napětí zde způsobí porušení fibrilárního elementu. Trhlina se však šíří nikoliv přímočaře, ale vlivem přenosu napětí praskají postupně vláknenné elementy v jejím okolí. Granulární lom je typický pro taková keramická a uhlíková vlákna, u kterých existují mikropóry nebo síť slabých míst v průřezu vlákna. Křehký lom způsobuje obyčejné rychlé porušení vláken. Houževnatý lom a axiální štěpení je pomalejší, protože vlákno je schopné absorbovat více energie, než dojde k porušení. [7]

2.6.2. Adheze

Adhezi v kompozitech lze definovat jako schopnost materiálů (vláken a matrice) k sobě přilnout. Nejslabším místem v kompozitech je právě rozhraní mezi matricí a vlákny. Přilnavost jednotlivých složek kompozitu má tedy zásadní vliv na výsledné mechanické vlastnosti. Tomuto místu je proto kladena vysoká pozornost a je předmětem výzkumů. Adhezi ovlivňuje soubor mechanismů, jimiž jsou adsorpce, smáčení, elektrostatická interakce, kovalentní vazba povrchu matrice s vlákny, reakční vazby a nevázané interakce. Důležitá je také morfologie vláken a jejich rozmístění v matrici. V případě slabé adheze si jednotlivé vrstvy nepřekáží a mají volnou tepelnou roztažnost. V tuto chvíli však už kompozit neplní svou funkci a je pravděpodobné, že došlo k delaminaci vrstev. Je tedy nutné zajistit kvalitní spojení na rozhraní vláken a matrice. Soudržnost vláken a matrice v kompozitním materiálu je vždy závislá především na možnostech přenosu sil na jejich rozhraní. Tyto síly je možné rozdělit dle jejich zdroje na:

- **Mechanické zaklínění** – předpokládá, se že žádné těleso nemůže být absolutně rovné. Platí to tedy i pro stykové plochy mezi matricí a plnivem. Styková plocha vždy obsahuje různé výstupky a prohloubeniny. Tyto povrchové nedokonalosti při zatížení brání vzájemnému pohybu matrice a plniva. S rostoucí drsností hranic se zlepšuje vzájemný styk a zaklínění je tak větší. Při porušení této soudržnosti by muselo dojít k vzájemnému usmýknutí jednotlivých složek.

Mechanická zaklínění mohou výrazně ovlivnit třecí síly, jež působí při vzájemném pohybu matrice a plniva. Tyto síly mohou dosahovat vysokých hodnot, neboť vlivem rozdílné tuhosti matrice a plniva dochází na rozhraní k velkým tlakovým silám

- **Fyzikální působení** – souvisí s van der Waalsovou vazbou mezi jednotlivými částicemi plniva na rozhraní plniva s matricí. Tato vazba může působit do vzdálenosti až 0,5nm a její teoretická pevnost může dosahovat až 7 GPa. Pokud se podaří dosáhnout vysokých hodnot této teoretické pevnosti, lze vazbu považovat za dostatečně pevnou a vhodnou pro rozhraní. Tato vazba je dále úzce spojena se vzájemnou smáčivostí matrice a plniva. Smáčivost jednotlivých složek kompozitních materiálů lze vyjádřit pomocí povrchového napětí, či povrchové energie. Při výrobě kompozitu je matrice zpravidla kapalná látka a plnivo tuhá. [7]

- **Chemické působení** –vazby jsou velice přínosné, neboť mohou dosáhnout teoretické pevnost až 70 GPa do vzdálenosti 0,3 nm. K chemickým vazbám dochází, pouze pokud vzájemně difundují vlákna a matrice. Na rozhraní dojde ke vzniku difúzní mezivrstvy s velmi silnou adhezí. Dalším předpokladem vzniku chemické vazby je vzájemná chemická reakce matrice a vláken. Mezivrstva je pak tvořena chemickou sloučeninou. I přes pozitivní vliv chemické vazby na adhezní síly se zde také vyskytují vlivy, které mohou naopak negativně ovlivnit vlastnosti kompozitu. Jedná se o zkřehnutí a snížení pevnosti vlivem difuze mezivrstvy. V této mezivrstvě pak bude přednostně docházet k tvorbě a šíření poruch v kompozitu. V případě silné difuze může dojít k poškození větší plochy vlákna a snížení tak jeho pevnosti. Vlákna jsou proto rozdělována na vlákna pro polymerní matrice, nebo na vysokoteplotní aplikace. Vlákna pro vysokoteplotní aplikace jsou opatřena mezivrstvou tvořící difuzní bariéru. Příkladem mohou být borová vlákna a SiC difuzní bariéra tzv. Borsic. [7]

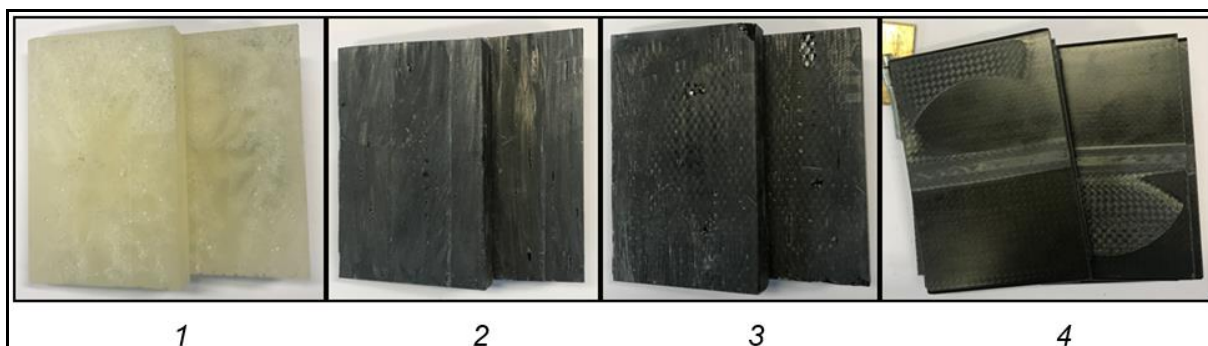
3. METODIKA MĚŘENÍ A HODNOCENÍ EXPERIMENTU

Experimentální část je zaměřena na samotný experiment, který zkoumá vliv geometrie řezného nástroje a řezných podmínek na proces vrtání, řezné síly a drsnost obrobených ploch. Nejprve jsou v této kapitole popsány vzorky, dále zařízení, která byla k dílčím experimentům použita, a pomůcky. Poté následuje samotná metodika experimentu. V závěru této podkapitoly jsou uvedeny dosažené výsledky při dílčích experimentech.

Všechny přípravy a experimenty probíhaly v laboratoři Katedry obrábění a montáže na Technické univerzitě v Liberci. Zde také probíhala veškerá měření.

3.1. Zkušební vzorky

Pro experimentální část bylo vytvořeno 8 vzorků. Vzorky o rozměrech 250 x 180 x 25 mm byly nařezány pro potřeby experimentů na dílčí vzorky o polovičních délkách, viz obr. 9., na pásové pile, viz obr.12. Ideální řezné podmínky pro vrtání kompozitních materiálů byly vybrány dle literatury [4,] a dle zkušeností s výrobním strojem. Přehled zvolených řezných podmínek viz kap. 3.3.



Obr. 9 – Zkušební vzorky.

1 – čistá epoxidová pryskyřice; 2 – epoxidová pryskyřice + roving 3700 TEX 50K; 3 – epoxidová pryskyřice + tkanina 800 TEX 12K; 4 – kompozitní materiál ČVUT

Pro výrobu kompozitních vzorků byla jako matrice zvolena dvousložková nízkomolekulární epoxidová pryskyřice CHS-EPOXY 520 (Districhem a.s.). K vytvrzování pryskyřice bylo použito tvrdidlo T0492, přidávané v hmotnostním poměru 100:26 (Districhem a.s.). Uhlíková vlákna byla použita ve dvou formách. Uhlíkový roving 3700 TEX 50K (HAVEL COMPOSITES CZ, s.r.o.) a uhlíková tkanina 800 TEX 12K (HAVEL COMPOSITES, CZ, s.r.o.). Tkanina byla kolmo k podélnému uspořádání uhlíkových vláken protkána polyesterovými vlákny s označením 7,6 dtex. Měrná hmotnost tkaniny byla 380 g·m⁻². Pro výrobu vzorků bylo použito 180 g

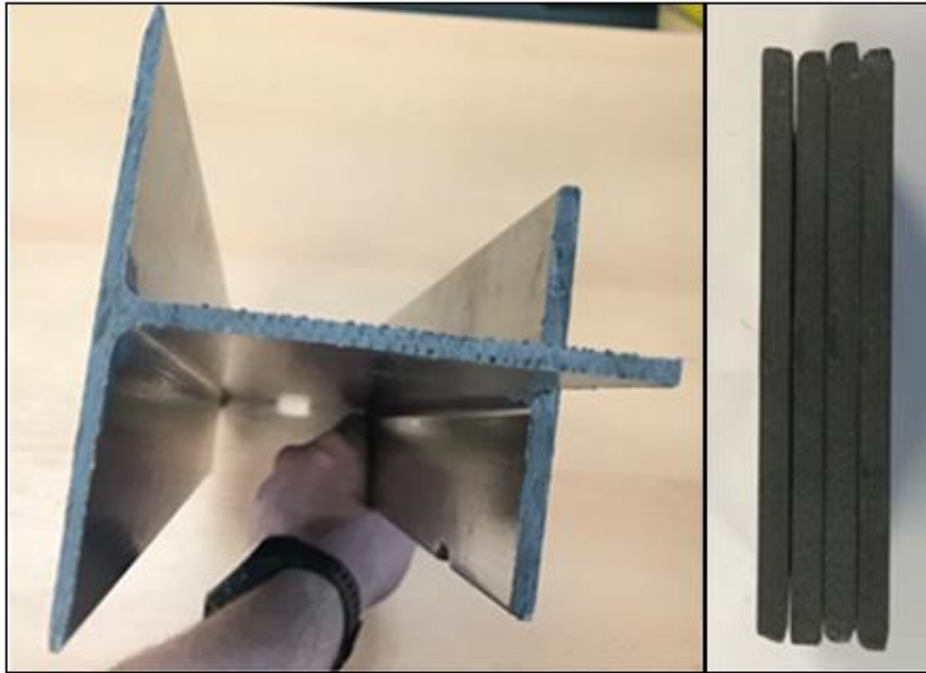
uhlíkové výztuže (uhlíkový roving, tkanina) a 300 g epoxidové pryskyřice s adekvátním množstvím tvrdidla. Bylo použito celkem 17 vrstev tkaniny. Vzorky byly vyrobeny tak, že vrstvy vláken a tkaniny byly v separované formě kladeny na sebe a prosycovány epoxidovou pryskyřicí s tvrdidlem. Při přípravě vzorků bylo dbáno na to, aby pryskyřice obalila uhlíková vlákna a vytvořila požadované mezifázové rozhraní. Vzorky byly po dobu 24 hodin vytvrzovány při teplotě $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Po vyjmutí z formy byly všechny vzorky následně dotvrzeny při teplotě 50°C po dobu 10 hodin. Při vytvrzování ani dotvrzování nebyl použit zvýšený tlak.

Po vytvrzení vzorků bylo nutné jejich obrobení a zaúhlování, viz obr 10. Obrobením byla zajištěna rozměrová přesnost všech vzorků pro plánované experimenty. Odlitky byly zbaveny povrchových nerovností. Obráběcí operace byly prováděny na pásové pile, viz kap. 3.2.1. a frézce FNG 32, viz kap. 3.2.2, pomocí frézovací hlavy s VBD.

Materiál s označením kompozit ČVUT byl dodán ve formě I profilu, viz obr. 11. Profil byl rozdělen na dílčí části, které byly následně mechanicky spojeny do dvou kompaktních celků.



Obr. 10 – Proces zaúhlování vzorku z čisté epoxidové pryskyřice.



Obr. 11 – Kompozitní materiál ČVUT.

3.2. Popis strojů, nástrojů, měřících zařízení a pomůcek

V této podkapitole jsou popsány všechny stroje, přípravky, měřidla a měřící zařízení, které byly použity pro přípravu zkušebních vzorků a pro samotné měření dílčích experimentů. Všechny stroje, přípravky, měřidla a měřící zařízení byly k dispozici v laboratoři Katedry obrábění a montáže na Technické univerzitě v Liberci. Zde také probíhala všechna měření.

3.2.1. Pásová pila

Vzorky byly nařezány z polotovarů o rozměrech 250 x 180 x 25 mm na poloviční délky. K tomu byla použita pásová pila typu ARG 300 Plus H.F. od firmy Pilous. Parametry pily jsou uvedeny v tabulce 1.

Charakteristika	Hodnota	Jednotka
Rozměr pilového pásu	3 110 x 27 x 0,9	[mm]
Maximální rozměr řezu čtvercového průřezu 90°; 40°; 60°	300/230/150	[mm]
Maximální rozměr řezu kruhového průřezu 90°; 40°; 60°	300/240/155	[mm]
Výkon motoru 400 V	2,3	[kW]
Rychlost pilového pásu	15–90	[m·min ⁻¹]
Rozměry stroje	1600 x 950 x 1600	[mm]
Hmotnost stroje	570	[kg]

Tab. 1 – Parametry pásové pily ARG 300 Plus H.F. [3]



Obr. 12 – Pásová pila ARG 300 Plus H.F.

3.2.2. Frézka FNG 32

Veškeré obráběcí operace prováděné pro účely experimentu byly realizovány na frézce FNG 32, viz obr. 13, od výrobce TOS Olomouc s.r.o. Parametry obráběcího stroje jsou uvedeny v tab. 2.

Charakteristika	Hodnota	Jednotka
Rozměr pracovní plochy	800 x 400	[mm]
Počet upínacích drážek	7	[-]
Výkon hlavního motoru	4	[kW]
Výkon posuvového motoru	1,1	[kW]
Pracovní zdvih podélný (osa X)	600	[mm]
Pracovní zdvih příčný (osa Y)	400	[mm]
Pracovní zdvih svislý (osa Z)	400	[mm]
Maximální zatížení stolu	350	[kg]

Tab. 2 – Parametry frézky FNG 32. [4]



Obr. 13 – Frézka FNG 32.

3.2.3. Použité nástroje

Pro obrábění vzorků byly použity nástroje od firmy Premus. Jedná se o vrtáky o průměru 5 mm, délce 86 mm, s úhlem špičky 118° a s kuželově broušenou hřbetní plochou vhodné pro širokou škálu aplikací např. obrábění nelegované i legované oceli, šedé litiny a kompozitních materiálů. Jednotlivé vrtáky se liší nástrojovými materiály a povrchovou úpravou. Jednotlivé nástroje jsou zobrazeny na obr. 14.

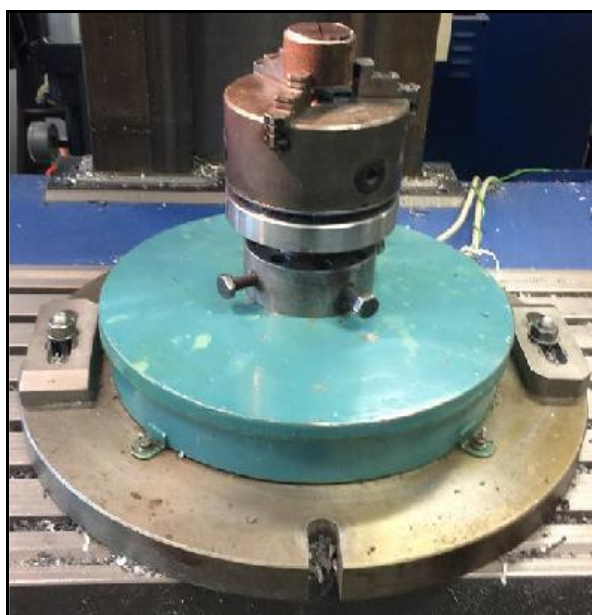


Obr. 14 – Nástroje použité pro experiment. [11, 12, 13, 14, 15]

1 – HSS; 2 – HSS-Co; 3 – HSS-Co TiN; 4 – SK; 5 – SK-TiAlN

3.2.4. Elektrický odporový dynamometr

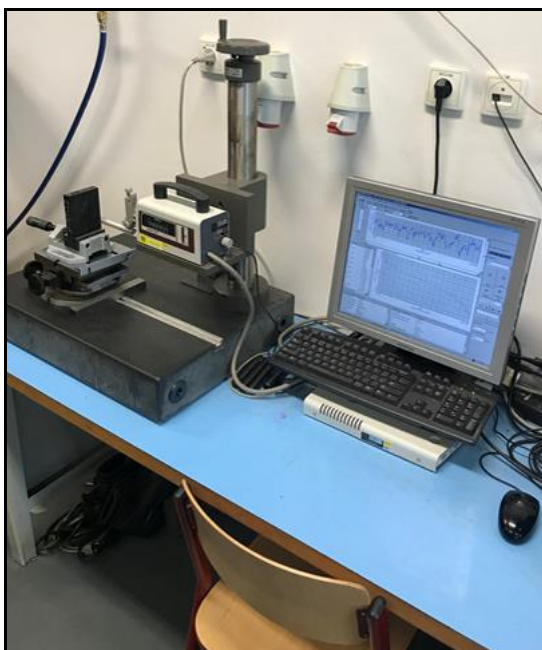
Elektrický odporový dynamometr, viz obr.15, byl použit pro snímání krouticího momentu M_k a svislé řezné síly F při operaci vrtání. Dynamometr byl propojen s počítačem obsahující software Kromos, který zobrazoval výsledky měření. Před začátkem každého měření bylo nutné provést kalibraci dynamometru z důvodu zajištění správnosti měření. Výstupem měření bylo grafické znázornění působící svislé řezné síly F a krouticího momentu M_k . [7]



Obr. 15 – Elektrický odporový dynamometr. [4]

3.2.5. Laboratorní profiloměr Mitutoyo

Jakost povrchu při dílčích experimentech jednotlivých vzorků byla měřena na laboratorním profiloměru Mitutoyo SV-2000 N2, viz obr. 16. Profiloměr pracuje na principu dotykového snímání povrchu. Data jsou poté vyhodnocena na počítači v softwarovém programu Surfpak-SV Verze 1.100, který vytvoří textovou i grafickou formu dat. Na profiloměru byly zkoumány vybrané parametry profilu R_a , R_t a R_z . [3]



Obr. 16 – Profiloměr Mitutoyo SV 2000N2 s pracovní stanicí Surfpak SV Verze 1.100.

3.2.6. Dílenský mikroskop ZEISS

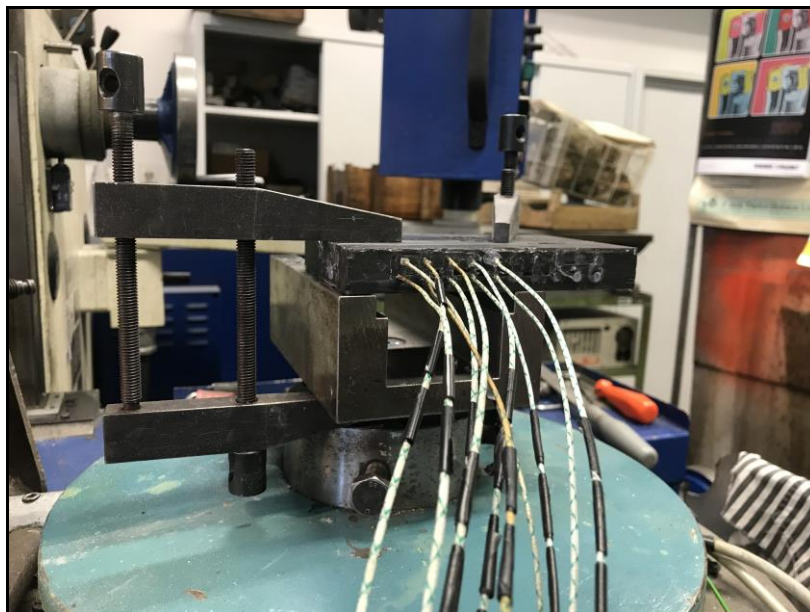
Mikroskop ZEISS, viz obr. 17, byl použit pro určení velikosti opotřebení nástroje. Stůl mikroskopu umožňuje vykonávat lineární posuv v osách X, Y. Pohyb stolu je zajištěn pomocí mikrometrických šroubů na vodících lištách. Odečtení hodnot opotřebení je prováděno pomocí mikrometrických hlavic s rozlišením 0,01 mm. Pomocí nitkového kříže je optickým způsobem přes okulár prováděno polohování měřeného vzorku. [4]



Obr. 17– Dílenský mikroskop ZEISS.

3.2.7. Měření teploty

Pro měření teplot při procesu vrtání bylo využito umělých termočlánků typu K. Tyto termočlánky snímají teploty od $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do teplot $1372\text{ }^{\circ}\text{C}$ (vodiče byly tvořeny z materiálů Ni-Cr (+) a Ni-Al (-)). Termočlánky byly dále zapojeny do sběrnice, která převádí mV na $^{\circ}\text{C}$. Náhled na proces měření teploty viz obr. níže. [4]



Obr. 18 – Zapojení termočlánků při procesu měření teploty při vrtání.

3.2.8. Ruční refraktometr Brix 0-18 % ATC

Pro ověření správné koncentrace naředěné procesní kapaliny byl použit ruční refraktometr Brix 0-18 % ATC s přesností měření $\pm 0,15\%$, viz. obr 19.



Obr. 19 – Ruční refraktometr Brix 0-18 % ATC. [3]

3.2.9. Řezná kapalina Blasocut® BC 25 MD

Blasocut® BC 25 MD je řezná kapalina na bázi minerálního oleje, nemísitelná s vodou, se speciálními aditivy pro obrábění neželezných materiálů. Řezná kapalina je určena pro všeobecné použití při obrábění a broušení litiny, oceli a slitin hliníku, mědi a zinku. K ověření koncentrace pro obrábění 7 až 10 % byl použit ruční refraktometr, viz 3.2.9.



Obr. 20 – Řezná kapalina Blasocut® BC 25 MD.

3.2.10. Dutinový mikrometr

Pro měření rozměrové stability vyvrtaných otvorů byl použit dutinový mikrometr, viz obr. 21. Metodika měření je uvedena v kapitole 3.4.



Obr. 21 – Dutinový mikrometr.

3.3. Řezné podmínky

Řezné podmínky pro měření velikosti krouticího momentu a řezných sil, teploty při vrtání, opotřebení nástroje, drsnosti a rozměrové stability jsou zaneseny do tabulek 3, 4. Konstantní a ideální řezné podmínky pro vrtání do kompozitních materiálů byly zvoleny dle literatury [4] a následně nadefinovány dle potřeb experimentu.

Kroucí moment, řezná síla; Drsnost; Rozměrová stabilita								
Nástroj	Řezné podmínky							
	Konstantní				Optimální			
	Bez procesního média		Procesní médium		Bez procesního média		Procesní médium	
	n [ot.min ⁻¹]	f [mm.ot ⁻¹]	n [ot.min ⁻¹]	f [mm.ot ⁻¹]	n [ot.min ⁻¹]	f [mm.ot ⁻¹]	n [ot.min ⁻¹]	f [mm.ot ⁻¹]
HSS	2000	0,2	2000	0,2	1250	0,2	1250	0,2
HSS-Co					1500		1500	
HSS-Co TiN					1750		1750	
SK					3000		3000	
SK-TiAlN					3500		3500	

Tab. 3 – Řezné podmínky pro měření krouticího momentu a řezné síly, drsnosti a rozměrové stability při vrtání.

Teplota; Opotřebení nástroje				
Nástroj	Řezné podmínky			
	Konstantní			
	Bez procesního média		Procesní médium	
	n [ot.min ⁻¹]	f [mm.ot ⁻¹]	n [ot.min ⁻¹]	f [mm.ot ⁻¹]
HSS	2000	0,2	2000	0,2
HSS-Co				
HSS-Co TiN				
SK				
SK-TiAlN				

Tab. 4 – Řezné podmínky pro měření teploty a opotřebení řezného nástroje při vrtání.

3.4. Metodika experimentů

3.4.1. Příprava vzorků

Zkoumané vzorky byly nařezány z polotovaru o rozměrech 250 x 180 x 25 mm na poloviční délky pomocí pásové pily. Kompozitní materiál s označením ČVUT a ve formě I profilu byl rozdělen na dílčí části, které byly následně mechanicky spojeny do dvou kompaktních celků. Celkem bylo zhotoveno 8 vzorků.

3.4.2. Příprava nástrojů

Pro potřeby experimentu byly použity nástroje, viz kap. 3.2.3, o průměru 5 mm a délce 86 mm s úhlem špičky 118° od výrobce Premus.

3.4.3. Příprava PM

Řezná kapalina Blasocut® BC 25 MD byla naředěna dle pokynů výrobce. Výsledná koncentrace byla ověřena odebráním vzorku kapaliny a změřena pomocí ručního refraktometru. Výsledná koncentrace byla 9 %. Pro dávkování média byla použita aparatura, která je součástí stroje FNG 32, viz kap. 3.2.2.

3.4.4. Proces vrtání

Pro vrtání byla použita frézka FNG 32, viz kap 3.2.2. Před zahájením experimentu byly vzorky zarovnány a následně byly obráběny dle nadefinovaných řezných podmínek, viz tab. 3 a 4.

3.4.5. Krouticí moment a řezná síla

Experimenty byly provedeny za podmínek popsanych v tab. 3. Z jednotlivých záznamů působících sil a momentů byly zjištěny hodnoty síly $F=F_z$ a M_k . Před začátkem každého měření bylo nutné provést kalibraci dynamometru z důvodu zajištění správnosti měření. Výstupem měření bylo grafické znázornění působící svislé řezné síly F a krouticího momentu M_k . Výsledné grafické vyhodnocení bylo vyhodnoceno pomocí softwaru Excel.

Pro jednotlivé zvolené řezné podmínky daného řezného nástroje byly uskutečněny celkem 3 opakování měření. Z provedených měření byla vypočtena průměrná hodnota se statistickým intervalem spolehlivosti měření. Výpočty a záznamy měření jsou uvedeny v příloze 1.

3.4.6. Měření teploty

Pro zjištění teploty byly použity 2 termočlánky, které byly umístěny k místu řezu obráběného vzorku. Rozložení termočlánků je znázorněno na obr. 18. Pro uchycení jednotlivých termočlánků bylo potřeba navrtat vzorky, tak aby bylo možné jednotlivé termočlánky pevně uchytit. V důsledku nahřátí konců termočlánků došlo k přitavení v dutině vzorku a pevné fixaci v blízkosti místa řezu. Měření teploty probíhalo za řezných podmínek uvedených v tab. 4.

Pro každý řezný nástroj bylo uskutečněno celkem 5 měření a z provedených měření byla vypočtena průměrná hodnota se statistickým intervalem spolehlivosti měření. Výpočty a záznamy měření jsou uvedeny v příloze 1.

3.4.7. Měření opotřebení nástroje VB

Měření opotřebení nástroje VB bylo provedeno pomocí dílenského mikroskopu ZEISS. Jednotlivé nástroje byly proměřeny poté, co špička hlavního ostří urazila vzdálenost 5,5 m, 11 m, 16,5 m, 22 m, 27,5 m a 33 m. Nástroje byly jednotlivě upnuty do držáku mikroskopu a hodnoty opotřebení hlavních a vedlejších ostří byly změřeny pomocí mikrometrických hlavic a pomocí nitkového kříže.

Tímto způsobem byly proměřeny vždy 2 nástroje z daného řezného materiálu a dle podmínek viz. tab. 4. Výpočty a záznamy měření jsou uvedeny v příloze 1.

3.4.8. Drsnost povrchu vzorků

Drsnost jednotlivých obrobených ploch byla měřena na 3 obrobených otvorech pro každý nástroj a dané řezné podmínky, viz kap. 3.3. Každý z otvorů byl rozdělen na 2 oblasti, v každé z nich byla provedena 3 měření parametrů drsnosti. Z naměřených hodnot parametrů R_a , R_t a R_z byla vypočtena průměrná hodnota se statistickým intervalem spolehlivosti měření. Výpočty a záznamy měření jsou uvedeny v příloze 1.

3.4.9. Rozměrová stabilita

Dle řezných podmínek viz. tab. 3 byly zhotoveny pro každý řezný nástroj 3 otvory a každý z nich byl proměřen. Otvor byl rozdělen na 2 oblasti, v každé z nich byla provedena 3 měření. Z naměřených hodnot průměru děr byla vypočtena průměrná hodnota se statistickým intervalem spolehlivosti měření. Výpočty a záznamy měření jsou uvedeny v příloze 1.

3.5. Vyhodnocení výsledků působících krouticích momentů a řezných sil

Tato kapitola obsahuje výsledky z měření krouticích momentů a řezných sil při stanovených řezných podmínkách, viz tab. 3 kap. 3.3

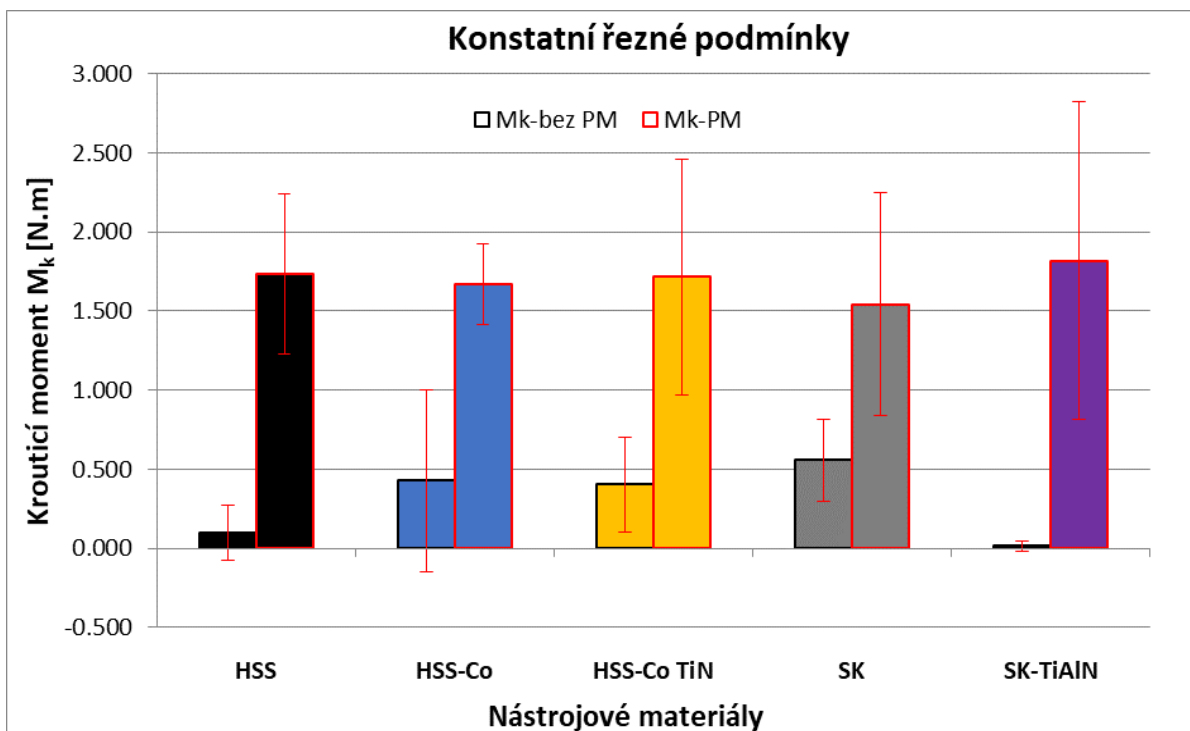
3.5.1. Čistá epoxidová pryskyřice

Kroucí moment, řezná síla										
Nástroj	Čistá epoxidová pryskyřice									
	Řezné podmínky									
	Konstantní									
	Bez procesního média				Procesní médium					
	M_k [N.m]	Konfideční interval M_k [N.m]	F [N]	Konfideční interval F [N]	M_k [N.m]	Konfideční interval M_k [N.m]	F [N]	Konfideční interval F [N]		
HSS	0.099	± 0.172	115	± 38	1.734	± 0.509	206	± 143		
HSS-Co	0.427	± 0.577	77	± 52	1.670	± 0.258	90	± 54		
HSS-Co TiN	0.404	± 0.300	96	± 31	1.717	± 0.744	115	± 48		
SK	0.557	± 0.258	58	± 46	1.543	± 0.705	51	± 82		
SK-TiAlN	0.014	± 0.032	61	± 16	1.820	± 1.006	53	± 25		

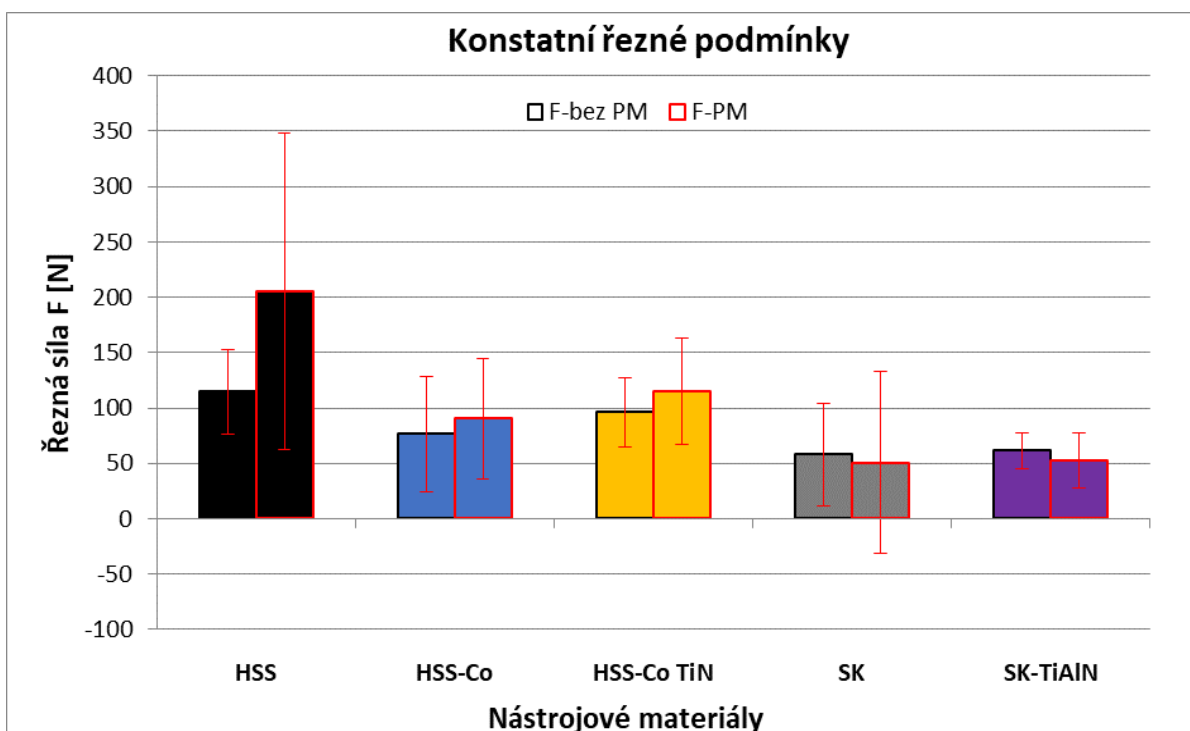
Tab. 5 – Působící krouticí momenty a síly při vrtání za konstantních řezných podmínek do čisté epoxidové pryskyřice.

Kroucí moment, řezná síla										
Nástroj	Čistá epoxidová pryskyřice									
	Řezné podmínky									
	Optimální									
	Bez procesního média				Procesní médium					
	M_k [N.m]	Konfideční interval M_k [N.m]	F [N]	Konfideční interval F [N]	M_k [N.m]	Konfideční interval M_k [N.m]	F [N]	Konfideční interval F [N]		
HSS	0.804	± 0.642	113	± 49	1.781	± 0.262	54	± 65		
HSS-Co	0.848	± 1.318	241	± 108	1.296	± 0.742	21	± 67		
HSS-Co TiN	0.889	± 0.276	211	± 34	1.287	± 1.396	24	± 17		
SK	0.862	± 0.068	52	± 38	0.734	± 0.933	99	± 10		
SK-TiAlN	0.850	± 0.657	75	± 14	0.698	± 0.695	116	± 24		

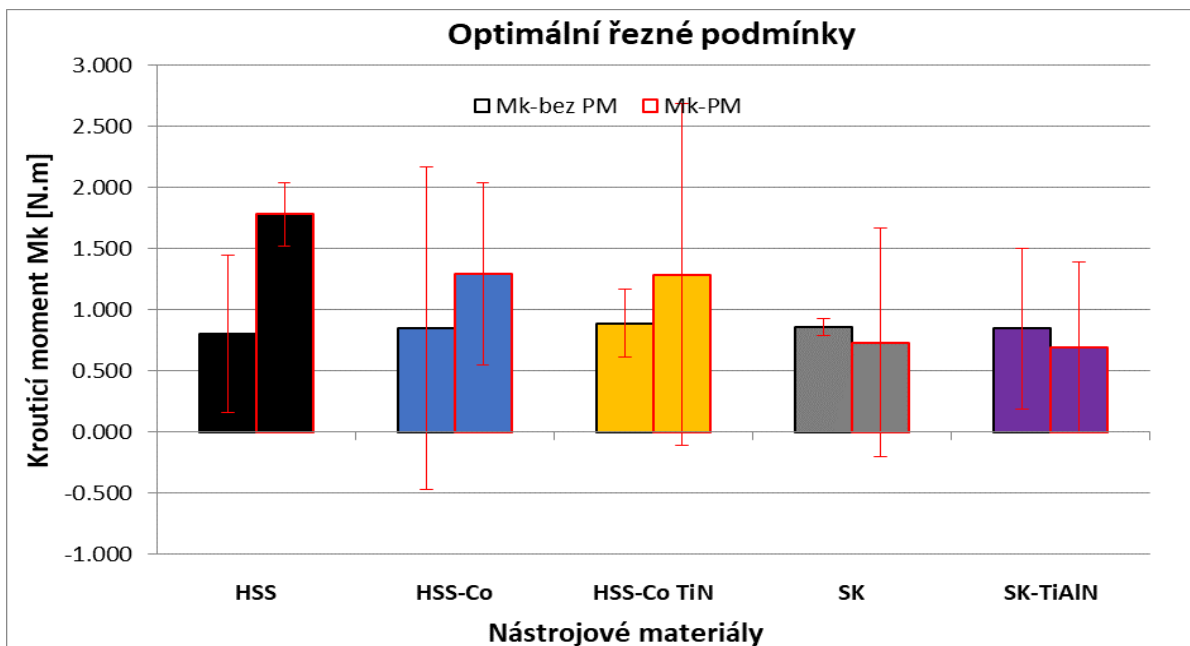
Tab. 6 Působící krouticí momenty a síly při vrtání za optimálních řezných podmínek do čisté epoxidové pryskyřice.



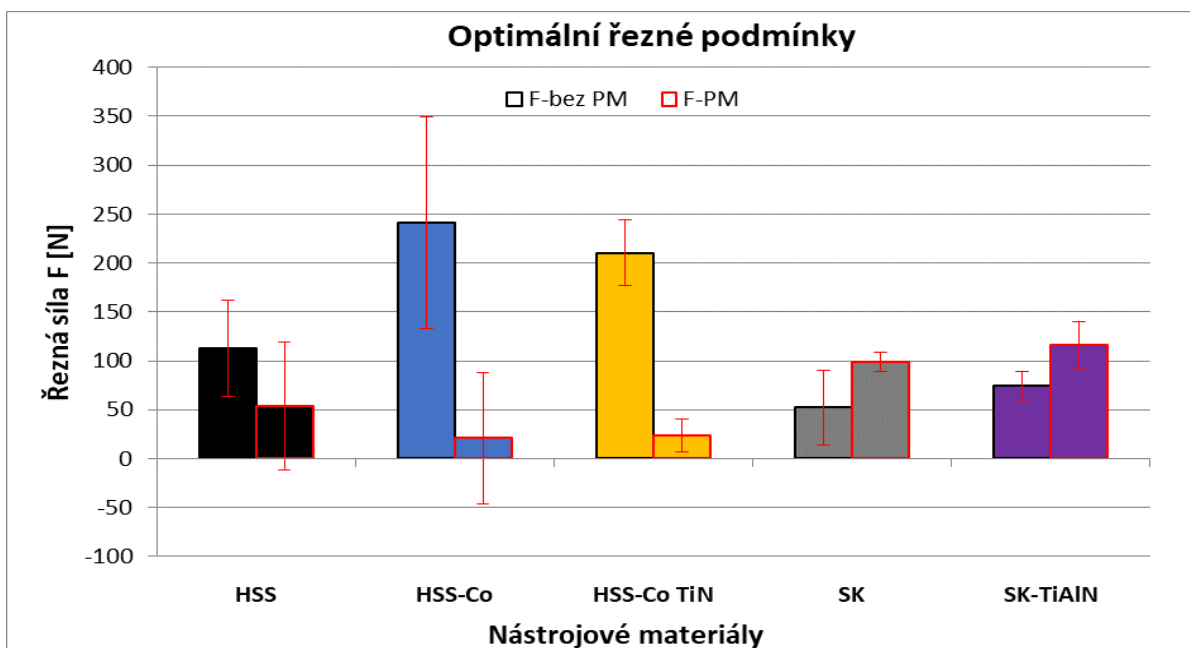
Graf 1 – Působící kroucí momenty při vrtání za konstantních řezných podmínek do čisté epoxidové pryskyřice.



Graf 2 – Působící řezné síly při vrtání za konstantních řezných do podmínek čisté epoxidové pryskyřice.



Graf 3 – Působící kroucí momenty při vrtání za optimálních řezných podmínek do čisté epoxidové pryskyřice.



Graf 4 – Působící řezné síly při vrtání za optimálních řezných podmínek do čisté epoxidové pryskyřice.

Z hlediska zvolených konstantních řezných podmínek byl naměřen nejmenší kroucí moment při použití nástroje z materiálu SK-TiAlN a nejmenší řezné síly při použití nástroje z SK, viz tab. 5. Vrtáním při optimálních řezných podmínkách bylo dosaženo nejnižších hodnot kroucího momentu při použití nástroje z HSS a řezné síly při použití nástroje z HSS-Co.

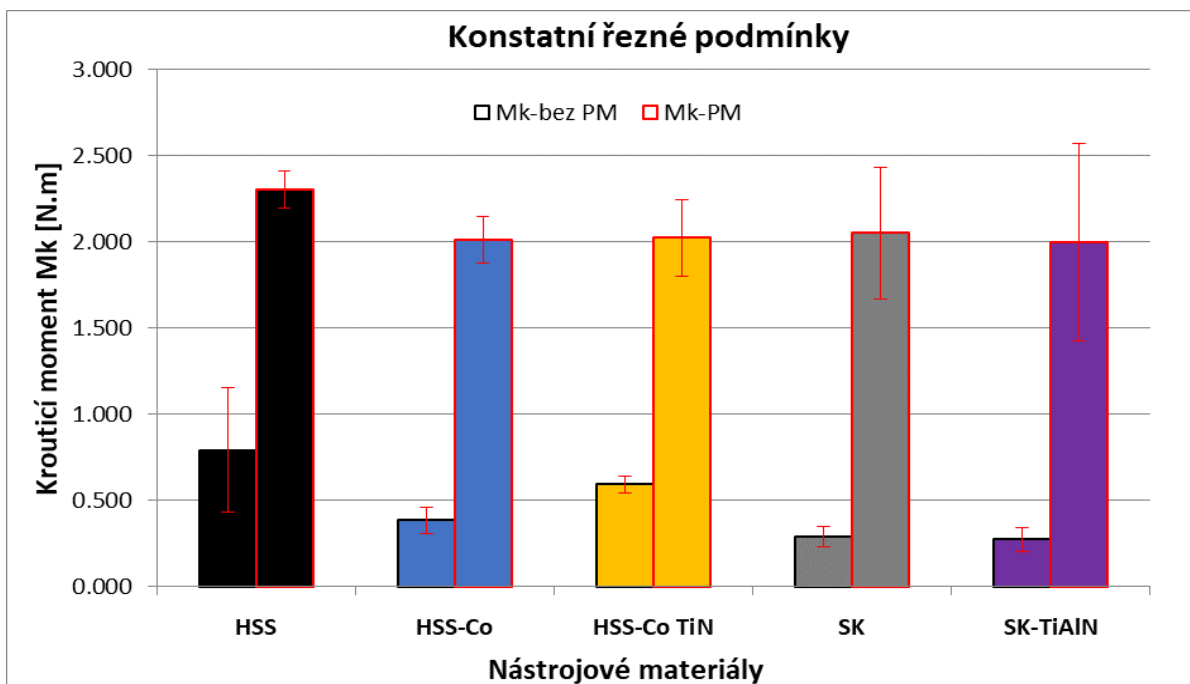
3.5.2. Epoxidová pryskyřice + roving 3700 TEX 50K

Kruticí moment, řezná síla										
Nástroj	Epoxidová pryskyřice + roving 3700 TEX 50K									
	Řezné podmínky									
	Konstantní									
	Bez procesního média				Procesní médium					
	M_k [N.m]	Konfideční interval M_k [N.m]	F [N]	Konfideční interval F [N]	M_k [N.m]	Konfideční interval M_k [N.m]	F [N]	Konfideční interval F [N]	M_k [N.m]	Konfideční interval M_k [N.m]
HSS	0.079	± 0.361	208	± 136	2.305	± 0.108	298	± 344		
HSS-Co	0.039	± 0.077	135	± 65	2.013	± 0.137	101	± 84		
HSS-Co TiN	0.059	± 0.048	131	± 43	2.024	± 0.224	115	± 36		
SK	0.029	± 0.060	163	± 17	2.052	± 0.381	57	± 22		
SK-TiAlN	0.275	± 0.070	101	± 24	1.997	± 0.573	91	± 39		

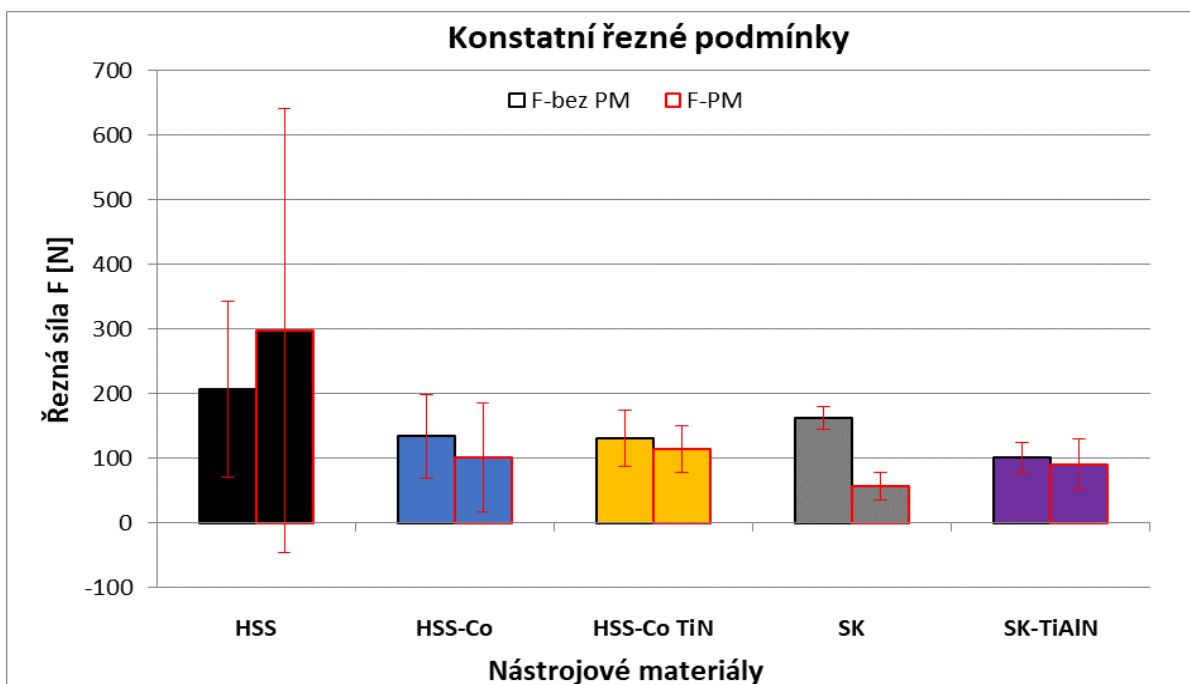
Tab. 7 — Působící kruticí momenty a síly při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené vlákny.

Kruticí moment, řezná síla										
Nástroj	Epoxidová pryskyřice + roving 3700 TEX 50K									
	Řezné podmínky									
	Optimální									
	Bez procesního média				Procesní médium					
	M_k [N.m]	Konfideční interval M_k [N.m]	F [N]	Konfideční interval F [N]	M_k [N.m]	Konfideční interval M_k [N.m]	F [N]	Konfideční interval F [N]	M_k [N.m]	Konfideční interval M_k [N.m]
HSS	1.152	± 0.469	313	± 36	1.055	± 0.331	252	± 62		
HSS-Co	1.035	± 0.060	177	± 54	0.496	± 0.554	189	± 71		
HSS-Co TiN	0.888	± 0.124	254	± 52	0.453	± 0.604	136	± 53		
SK	0.959	± 0.190	57	± 36	0.220	± 1.146	48	± 46		
SK-TiAlN	0.909	± 0.185	119	± 76	0.565	± 1.814	86	± 24		

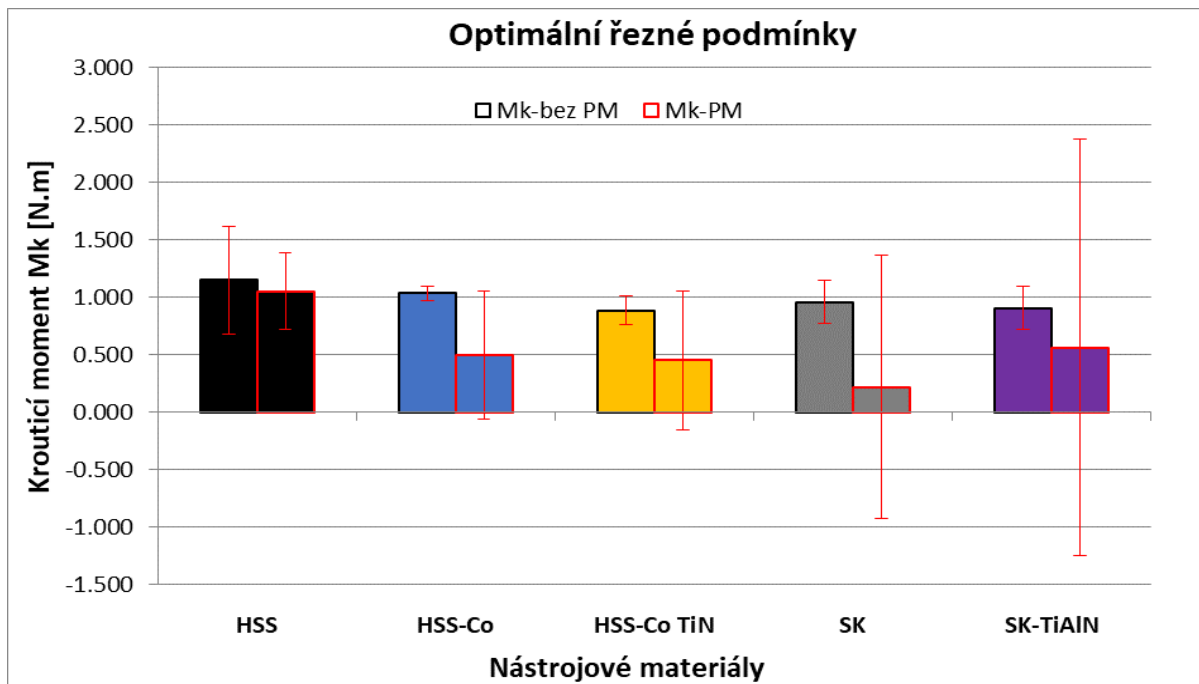
Tab. 8 – Působící kruticí momenty a síly při vrtání za optimálních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené vlákny.



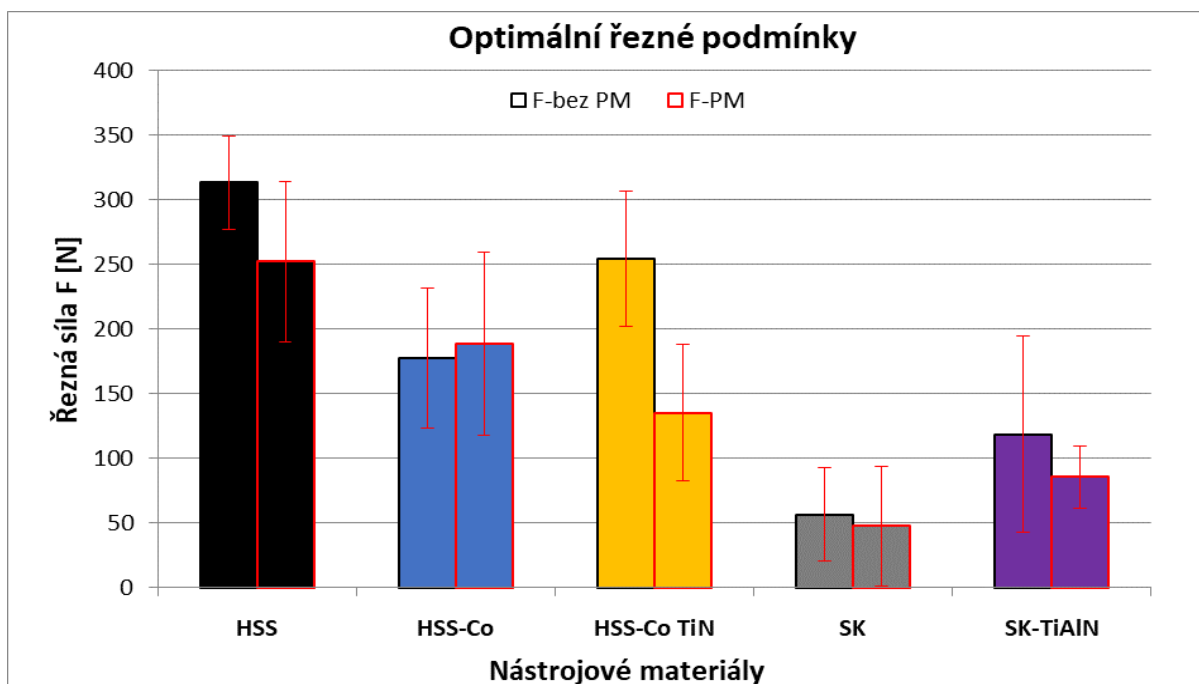
Graf 5 – Působící kroucí momenty při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené vlákny.



Graf 6 – Působící řezné síly při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené vlákny.



Graf 7 – Působící kroucí momenty při vrtání za optimálních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené vlákny.



Graf 8 – Působící řezné síly při vrtání za optimálních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené vlákny.

Aplikací nástroje ze slinutého karbidu bylo dosaženo nejnižší hodnot zkoumaných paramerů při obrábění za konstantních podmínek, viz tab. 7 a grafy 5, 6. Z tab. 8 je zřejmé, že nejlepších hodnot zkoumaných parametrů bylo opět dosaženo obráběním pomocí nástroje z SK.

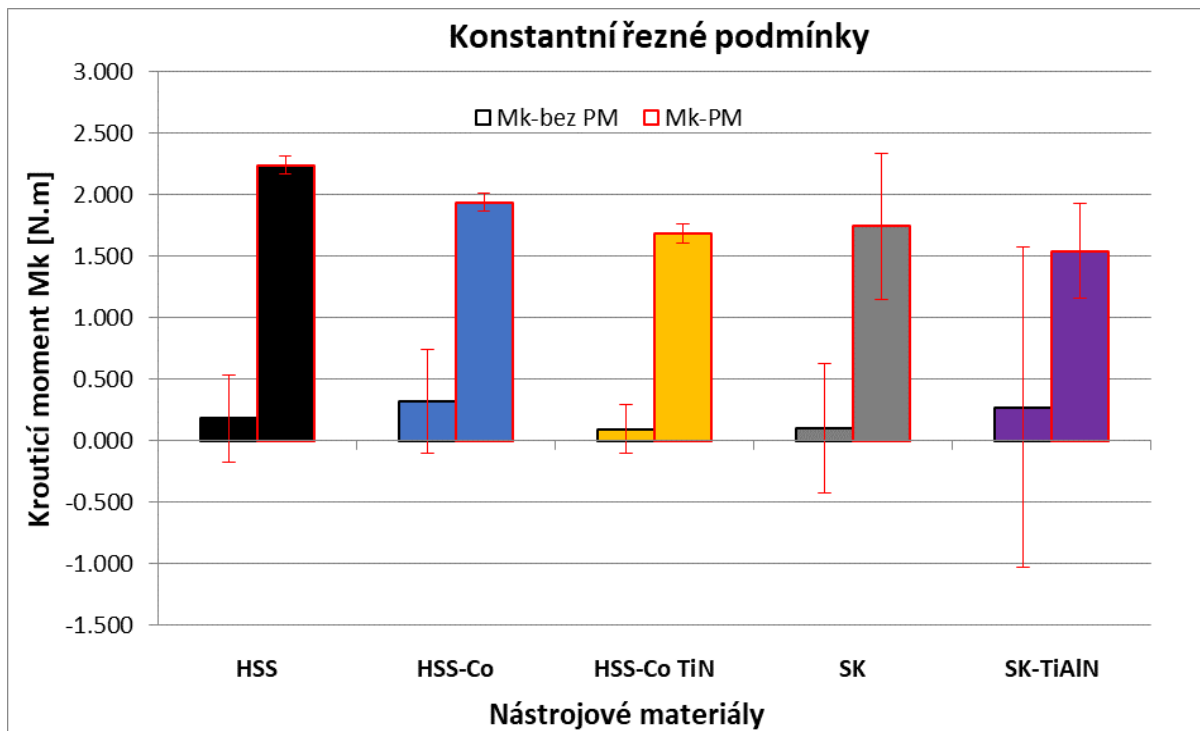
3.5.3. Epoxidová pryskyřice + tkanina 800 TEX 12K

Kroucí moment, řezná síla										
Nástroj	Epoxidová pryskyřice + tkanina 800 TEX 12K									
	Řezné podmínky									
	Konstantní									
	Bez procesního média				Procesní médium					
	M _k [N.m]	Konfideční interval M _k [N.m]	F [N]	Konfideční interval F [N]	M _k [N.m]	Konfideční interval M _k [N.m]	F [N]	Konfideční interval F [N]		
HSS	0.183	± 0.353	228	± 130	2.241	± 0.070	373	± 181		
HSS-Co	0.323	± 0.421	170	± 72	1.937	± 0.073	153	± 137		
HSS-Co TiN	0.096	± 0.195	189	± 78	1.685	± 0.081	106	± 28		
SK	0.104	± 0.524	107	± 14	1.744	± 0.594	36	± 64		
SK-TiAlN	0.272	± 1.302	130	± 17	1.544	± 0.382	49	± 59		

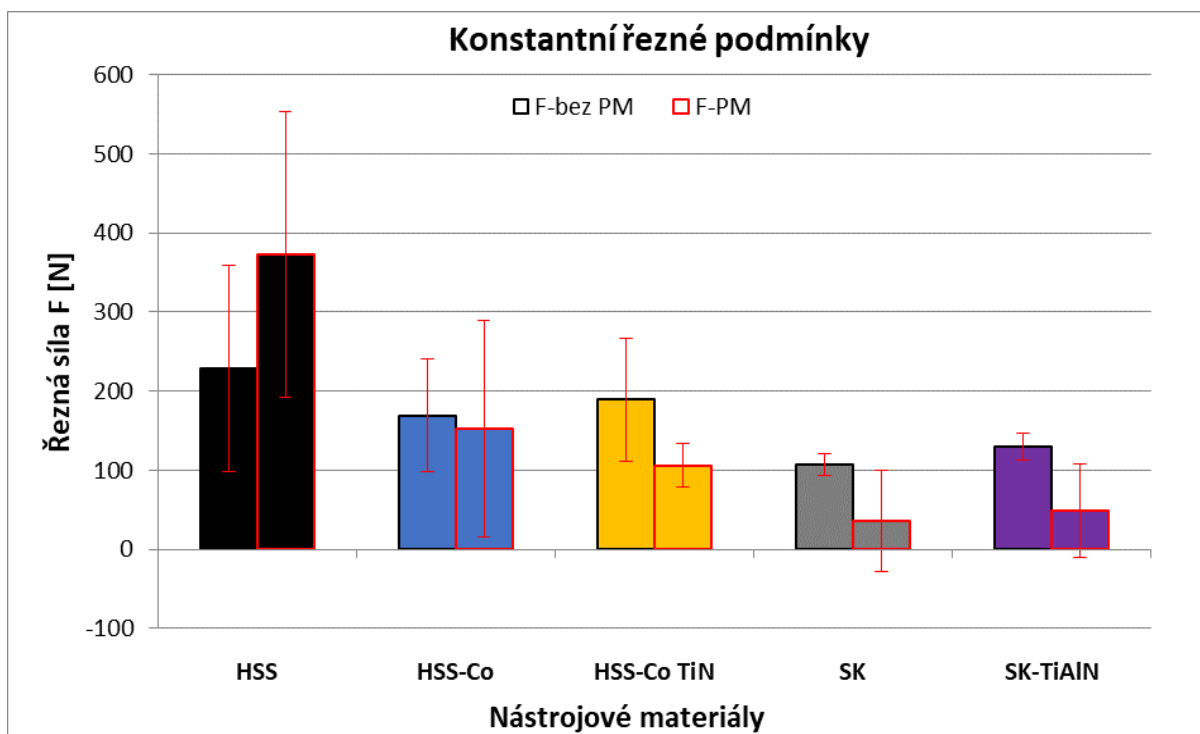
Tab. 9 – Působící kroucí momenty a síly při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené tkaninou.

Kroucí moment, řezná síla										
Nástroj	Epoxidová pryskyřice + tkanina 800 TEX 12K									
	Řezné podmínky									
	Optimální									
	Bez procesního média				Procesní médium					
	M _k [N.m]	Konfideční interval M _k [N.m]	F [N]	Konfideční interval F [N]	M _k [N.m]	Konfideční interval M _k [N.m]	F [N]	Konfideční interval F [N]		
HSS	1.046	± 1.015	218	± 155	0.677	± 0.460	293	± 133		
HSS-Co	1.199	± 0.388	220	± 69	0.530	± 0.330	197	± 16		
HSS-Co TiN	1.005	± 0.417	308	± 127	0.445	± 0.067	110	± 33		
SK	0.991	± 0.191	71	± 21	0.501	± 0.127	25	± 20		
SK-TiAlN	1.052	± 0.072	98	± 22	0.420	± 0.220	52	± 55		

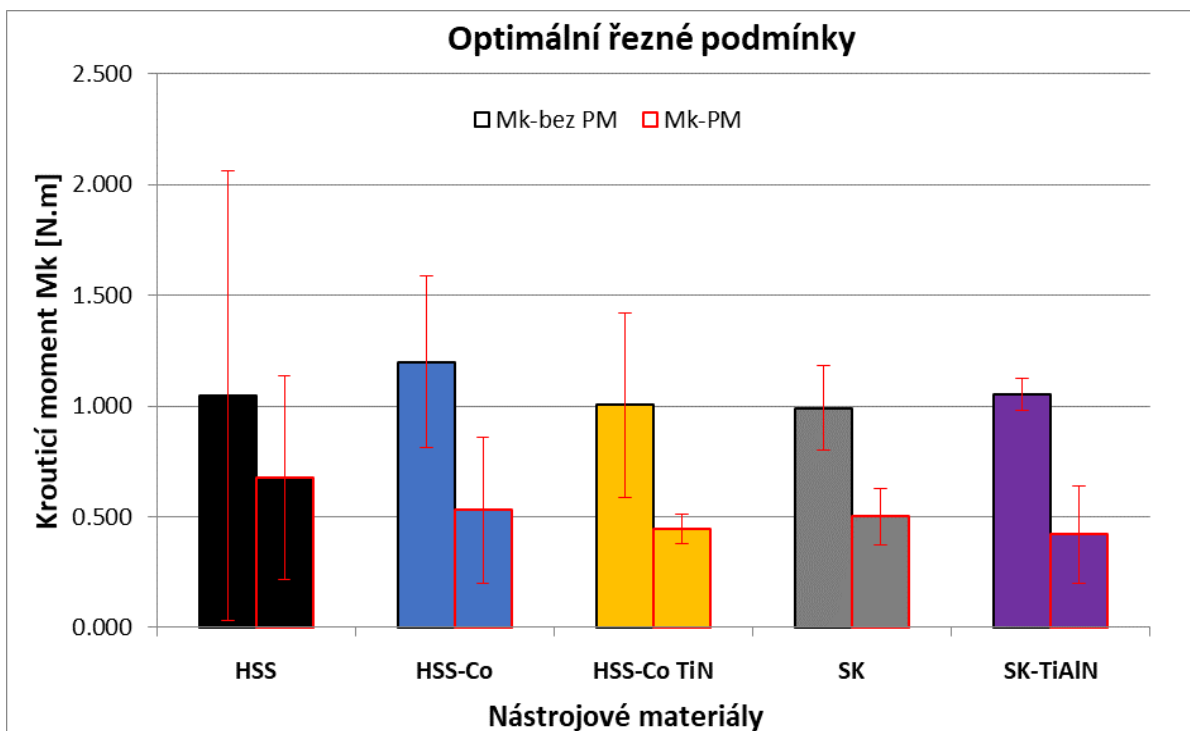
Tab. 10 – Působící kroucí momenty a síly při vrtání za optimálních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené tkaninou.



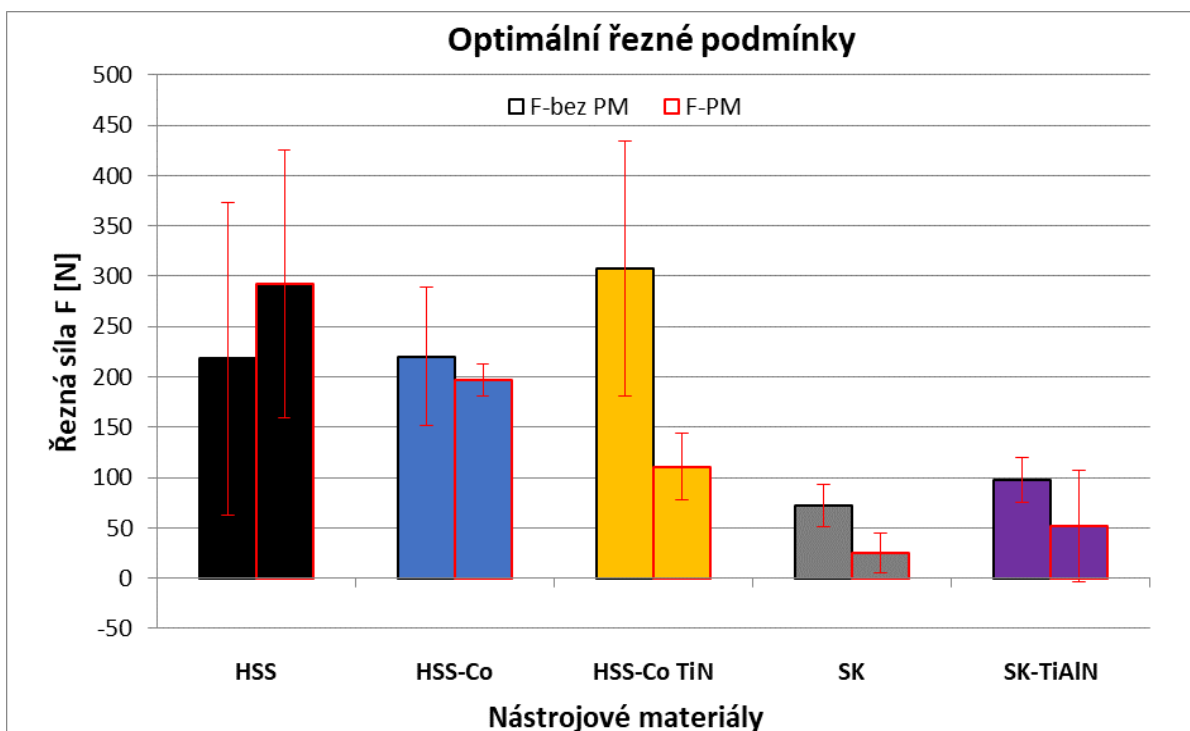
Graf 9 – Působící kroucí momenty při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené tkaninou.



Graf 10 – Působící řezné síly při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené tkaninou.



Graf 11 – Působící kroucí momenty při vrtání za optimálních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené tkaninou.



Graf 12 – Působící řezné síly při vrtání za optimálních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené tkaninou.

U experimentu s vrtáním do materiálu vyztuženého uhlíkovou tkaninou došlo k výraznému nárůstu hodnot řezných sil F vůči kap. 3.5.1. Velikosti kroucíh momentů M_k vykazují velmi podobné hodnoty jako u kapitoly 3.5.2.

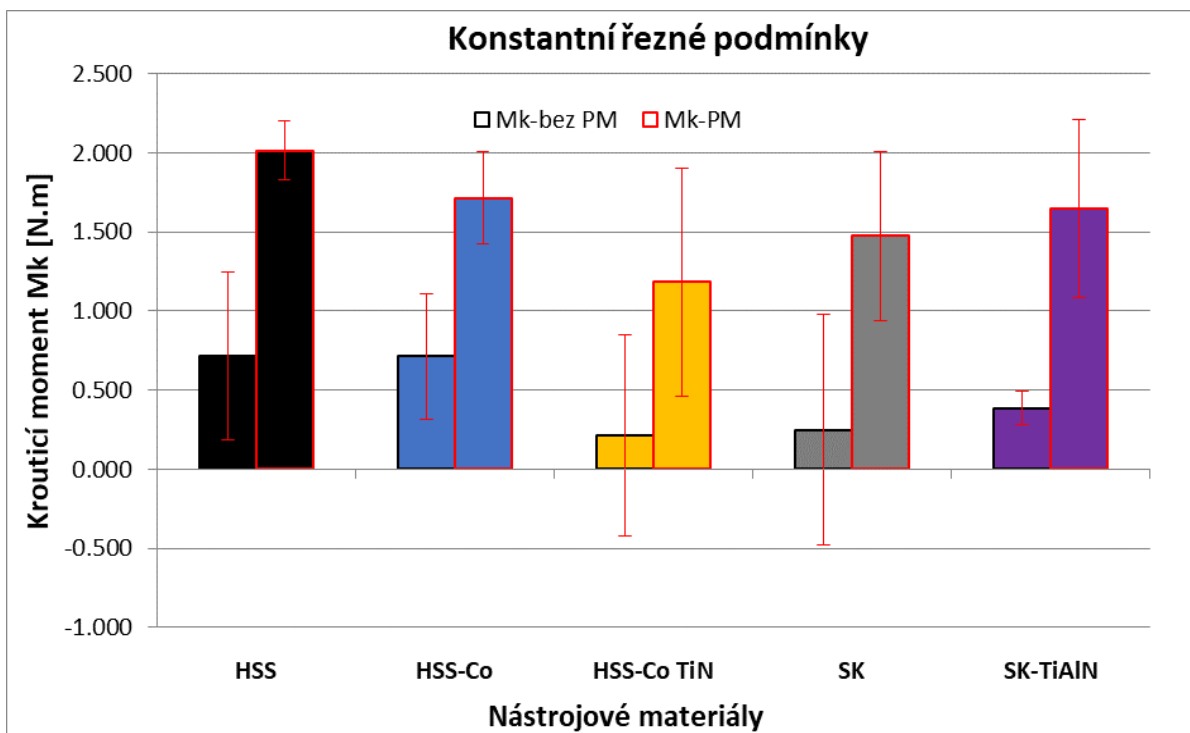
3.5.4. Kompozitní materiál ČVUT

Kroucí moment, řezná síla									
Nástroj	Kompozitní materiál ČVUT								
	Řezné podmínky								
	Konstantní								
	Bez procesního média				Procesní médium				
	M _k [N.m]	Konfideční interval M _k [N.m]	F [N]	Konfideční interval F [N]	M _k [N.m]	Konfideční interval M _k [N.m]	F [N]	Konfideční interval F [N]	
HSS	0.719	± 0.529	316	± 200	2.014	± 0.187	946	± 361	
HSS-Co	0.714	± 0.396	376	± 147	1.716	± 0.290	387	± 206	
HSS-Co TiN	0.213	± 0.634	176	± 51	1.183	± 0.720	167	± 92	
SK	0.250	± 0.731	124	± 42	1.474	± 0.532	46	± 42	
SK-TiAlN	0.387	± 0.104	159	± 86	1.649	± 0.565	95	± 83	

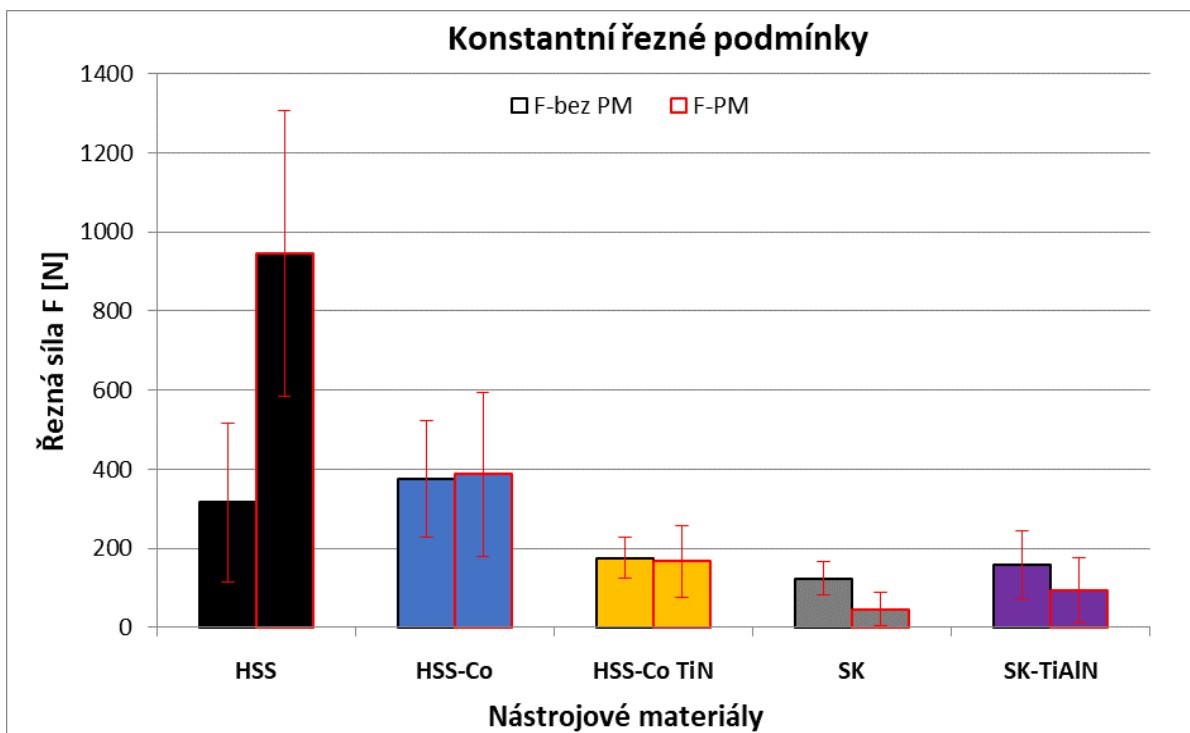
Tab. 11 – Působící kroucí momenty a síly při vrtání za konstantních řezných podmínek do kompozitního materiálu ČVUT.

Kroucí moment, řezná síla									
Nástroj	Kompozitní materiál ČVUT								
	Řezné podmínky								
	Optimální								
	Bez procesního média				Procesní médium				
	M _k [N.m]	Konfideční interval M _k [N.m]	F [N]	Konfideční interval F [N]	M _k [N.m]	Konfideční interval M _k [N.m]	F [N]	Konfideční interval F [N]	
HSS	1.584	± 0.470	395	± 179	1.050	± 0.377	689	± 324	
HSS-Co	1.660	± 0.325	429	± 49	0.850	± 0.147	448	± 130	
HSS-Co TiN	1.413	± 0.122	212	± 47	0.507	± 0.246	234	± 51	
SK	1.227	± 0.191	116	± 80	0.411	± 0.106	66	± 44	
SK-TiAlN	1.194	± 0.157	149	± 31	0.303	± 0.302	146	± 151	

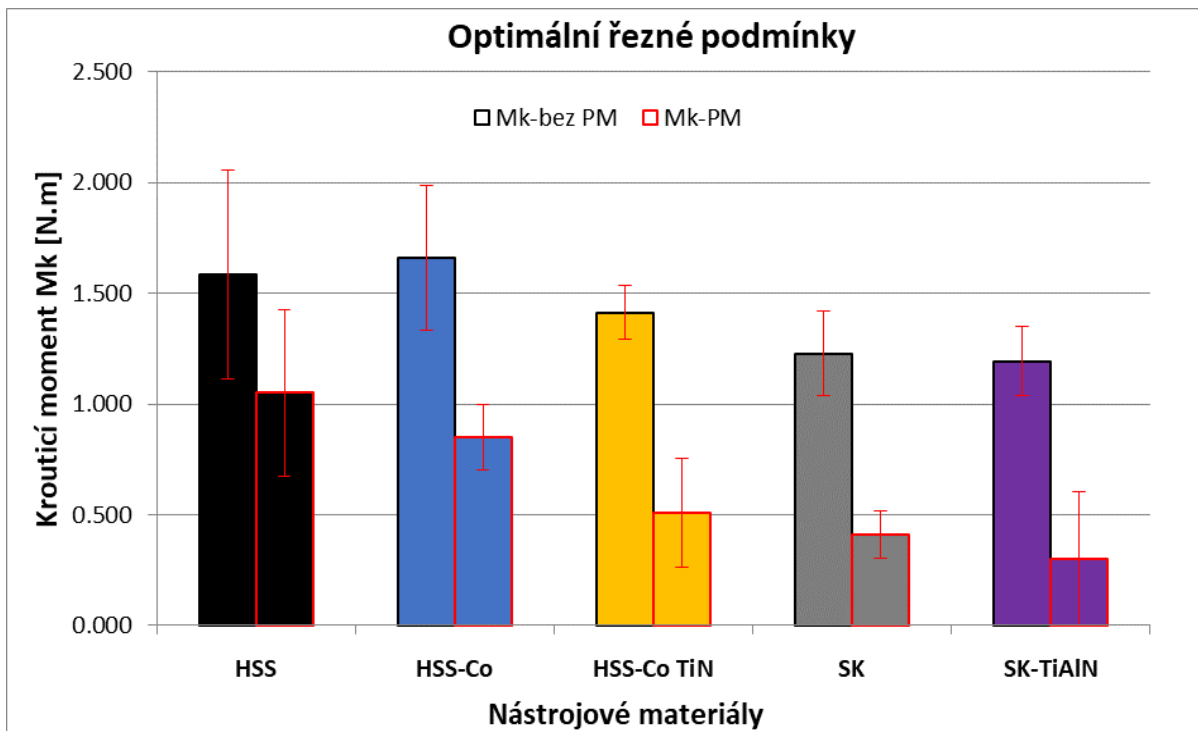
Tab. 12 – Působící kroucí momenty a síly při vrtání za optimálních řezných podmínek do kompozitního materiálu ČVUT.



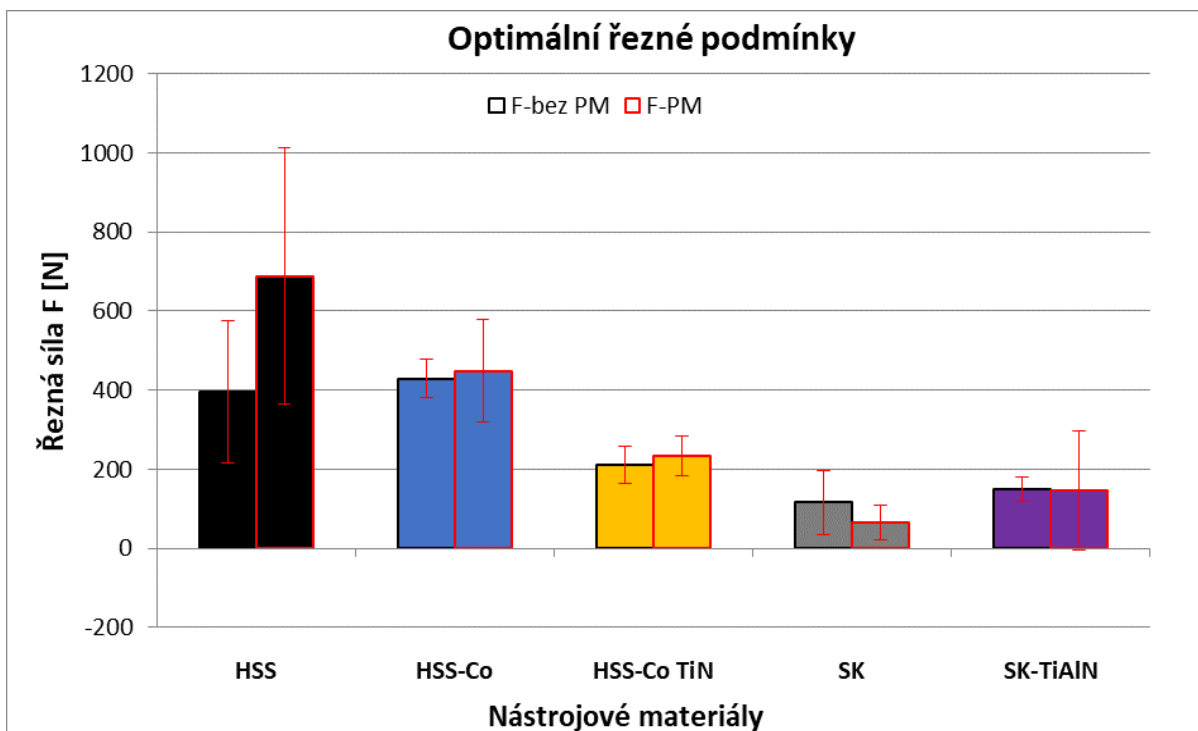
Graf 13 – Působící kroucí momenty při vrtání za konstantních řezných podmínek do kompozitního materiálu ČVUT.



Graf 14 – Působící řezné síly při vrtání za konstantních řezných podmínek do kompozitního materiálu ČVUT.



Graf 15 – Působící kroucí momenty při vrtání za optimálních řezných podmínek do kompozitního materiálu ČVUT.



Graf 16 – Působící řezné síly při vrtání za optimálních řezných podmínek do kompozitního materiálu ČVUT.

Konstantní řezné podmínky vykazují nejnižší hodnoty kroucíh momentů při vrtání bez použití procesního média. Naopak je tomu při obrábění za ideálních řezných podmínek a využití procesního média, viz tab. 12 a graf 15.

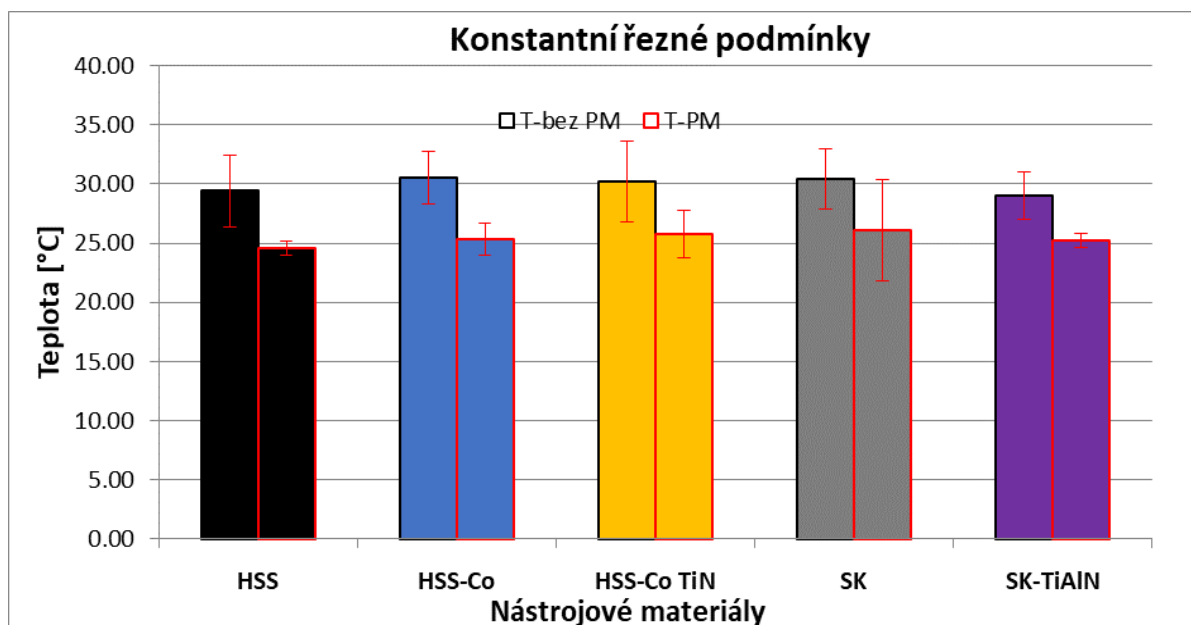
3.6. Vyhodnocení teplot

Tato kapitola obsahuje výsledky z měření teploty při stanovených řezných podmínkách, viz tab. 4 kap. 3.3

3.6.1. Čistá epoxidová pryskyřice

Teplota						
Nástroj	Čistá epoxidová pryskyřice					
	Řezné podmínky					
	Konstantní					
	Bez procesního média			Procesní médium		
	T [°C]	Konfideční interval T [°C]		T [°C]	Konfideční interval T [°C]	
HSS	29.40	±	3.00	24.60	±	0.58
HSS-Co	30.50	±	2.25	25.30	±	1.35
HSS-Co TiN	30.20	±	3.46	25.80	±	2.00
SK	30.40	±	2.52	26.10	±	4.26
SK-TiAlN	29.00	±	1.96	25.20	±	0.62

Tab. 13 – Naměřené teploty při vrtání za konstantních řezných podmínek do čisté epoxidové pryskyřice.



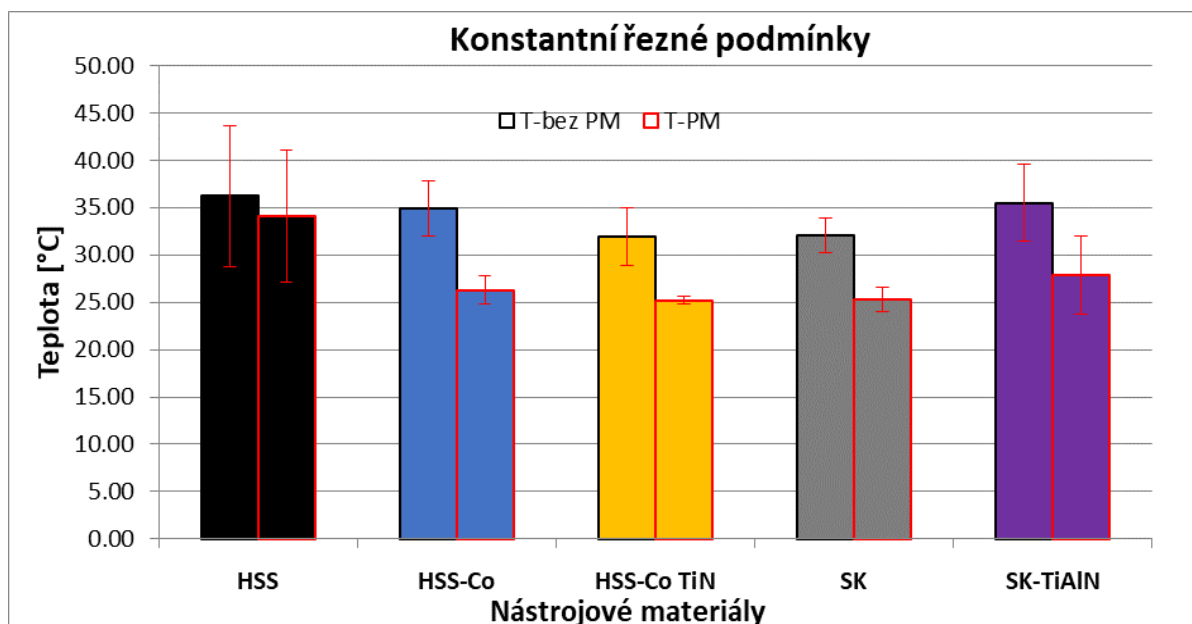
Graf 17 – Naměřené teploty při vrtání za konstantních řezných podmínek do čisté epoxidové pryskyřice.

Aplikací procesní kapaliny při procesu vrtání do čisté epoxidové pryskyřice bylo dosaženo nejnižší teploty $24,60 \pm 0,58$ °C za použití nástroje z HSS. Vrtáním pomocí nástroje z nástrojového materiálu SK-TiAlN bylo dosaženo nejnižší teploty $29,00 \pm 1,96$ °C při vrtání za konstantních řezných podmínek a bez použití procesní kapaliny.

3.6.2. Epoxidová pryskyřice + roving 3700 TEX 50K

Teplota				
Nástroj	Epoxidová pryskyřice + roving 3700 TEX 50K			
	Řezné podmínky			
	Konstantní			
	Bez procesního média		Procesní médium	
	T [°C]	Konfideční interval T [°C]	T [°C]	Konfideční interval T [°C]
HSS	36.20 ± 7.49	34.10 ± 7.02		
HSS-Co	34.90 ± 2.88	26.30 ± 1.44		
HSS-Co TiN	31.90 ± 3.08	25.20 ± 0.38		
SK	32.10 ± 1.80	25.30 ± 1.26		
SK-TiAlN	35.50 ± 4.08	27.90 ± 4.15		

Tab. 14 – Naměřené teploty při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené vlákny.



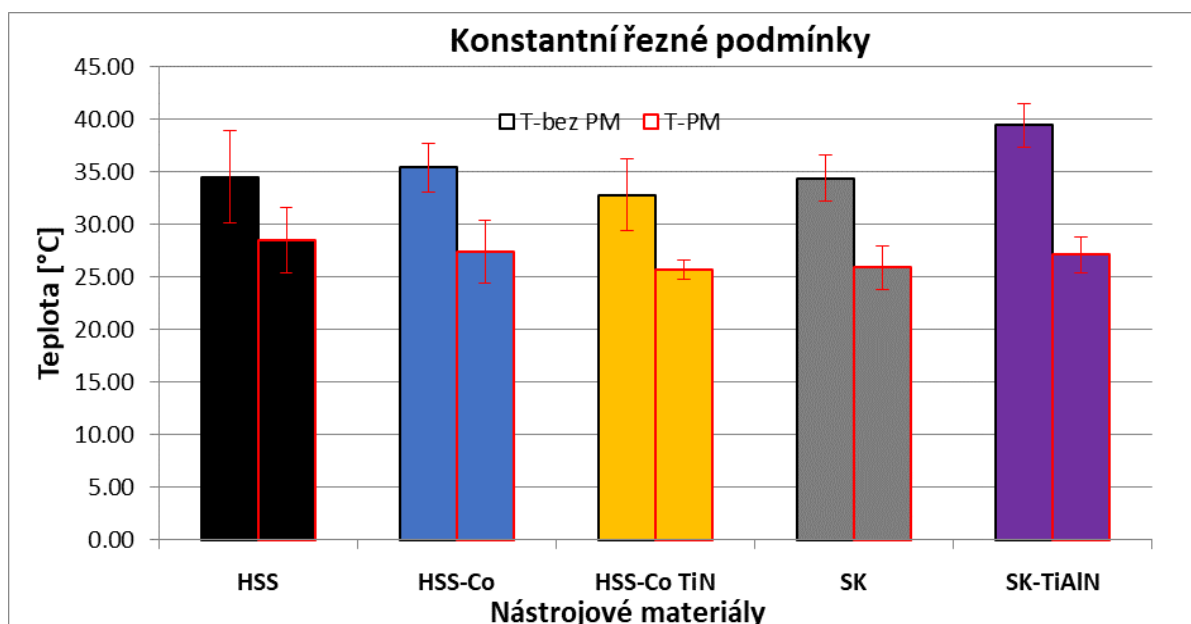
Graf 18 – Naměřené teploty při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené vlákny.

Při vrtání do materiálu vyztuženého uhlíkovým rovingem 3700 TEX 50K je patrný nárůst hodnot teplot, vůči kap. 3.6.1., u většiny položek. Největší nárůst hodnot je u nástroje z HSS, viz tab. 14.

3.6.3. Epoxidová pryskyřice + tkanina 800 TEX 12K

Teplota					
Nástroj	Epoxidová pryskyřice + tkanina 800 TEX 12K				
	Řezné podmínky				
	Konstantní				
	Bez procesního média			Procesní médium	
	T [°C]	Konfideční interval T [°C]		T [°C]	Konfideční interval T [°C]
HSS	34.50	± 4.39	28.50	± 3.10	
HSS-Co	35.40	± 2.32	27.40	± 2.96	
HSS-Co TiN	32.80	± 3.39	25.70	± 0.93	
SK	34.40	± 2.22	25.90	± 2.05	
SK-TiAlN	39.40	± 2.05	27.10	± 1.66	

Tab. 15 – Naměřené teploty při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené tkaninou.



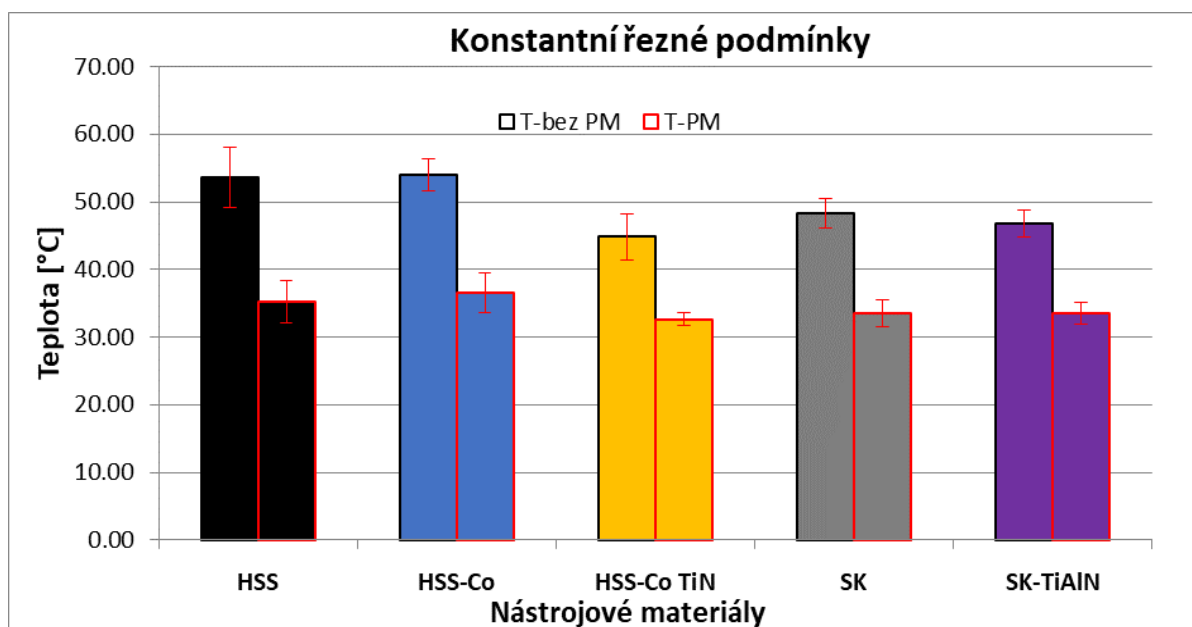
Graf 19 – Naměřené teploty při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené tkaninou.

Porovnáním naměřených hodnot z tab. 14 a 15 je patrné, že naměřené hodnoty teplot, při obrábění epoxidové pryskyřice vyztužené uhlíkovými vlákny a tkaninou, dosahují velmi podobných hodnot.

3.6.4. Kompozitní materiál ČVUT

Teplota				
Nástroj	Kompozitní materiál ČVUT			
	Řezné podmínky			
	Konstantní			
	Bez procesního média		Procesní médium	
	T [°C]	Konfideční interval T [°C]	T [°C]	Konfideční interval T [°C]
HSS	53.60 ± 7.53	35.20 ± 7.19		
HSS-Co	54.00 ± 6.19	36.60 ± 4.46		
HSS-Co TiN	44.80 ± 3.56	32.60 ± 3.31		
SK	48.30 ± 5.16	33.50 ± 9.14		
SK-TiAlN	46.80 ± 5.59	33.50 ± 5.75		

Tab. 16 – Naměřené teploty při vrtání za konstantních řezných podmínek do kompozitního materiálu ČVUT.



Graf 20 – Naměřené teploty při vrtání za konstantních řezných podmínek do kompozitního materiálu ČVUT.

Z tabulky 16 a grafu 20 lze vyčíst výrazný nárůst teplot vznikajících při obrábění, oproti všem předchozím experimentům. Obráběním pomocí nástroje z materiálu HSS-Co bylo dosaženo nejvyšších teplot $54,00 \pm 6,19$ °C, při obrábění bez použití procesní kapaliny a teploty $36,60 \pm 4,46$ °C při použití procesní kapaliny.

3.7. Vyhodnocení opotřebení

Tato kapitola obsahuje výsledky z měření opotřebení nástroje při stanovených řezných podmínkách, viz tab. 4 kap. 3.3

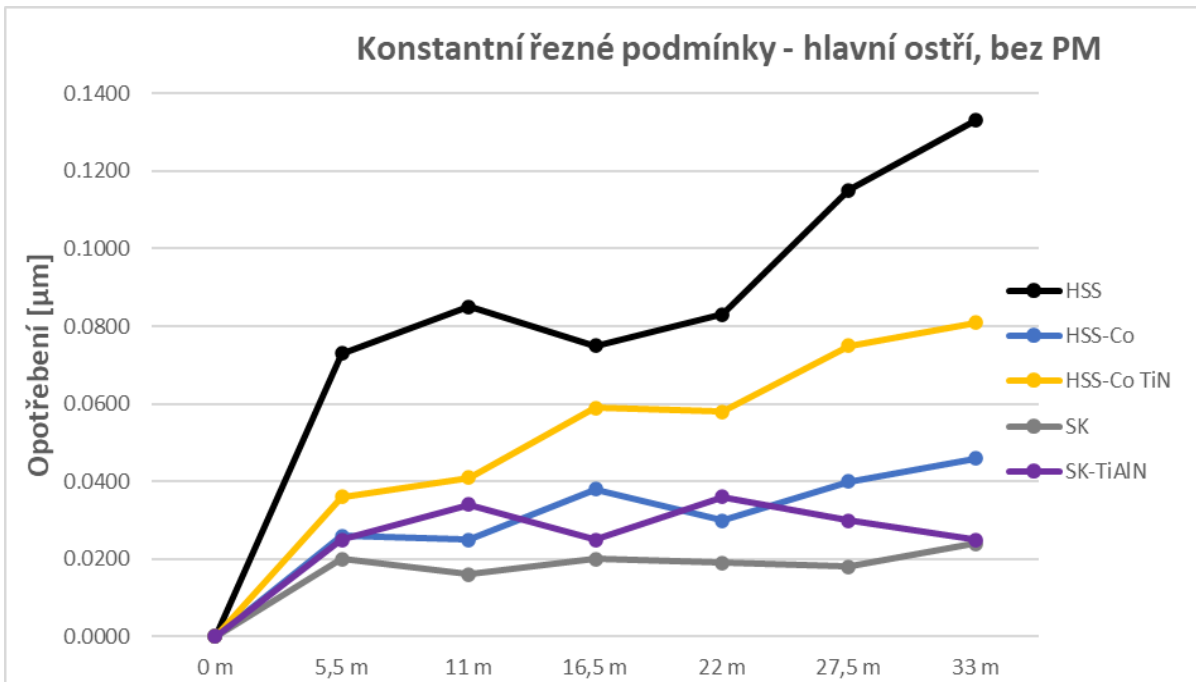
3.7.1. Čistá epoxidová pryskyřice

Opotřebení							
Nástroj	Čistá epoxidová pryskyřice						
	Řezné podmínky						
	Konstantní						
	Bez procesního média						
	Hlavní ostří						
	0 m	5,5 m	11 m	16,5 m	22 m	27,5 m	33 m
HSS	0.0000	0.0730	0.0850	0.0750	0.0830	0.1150	0.1330
HSS-Co	0.0000	0.0260	0.0250	0.0380	0.0300	0.0400	0.0460
HSS-Co TiN	0.0000	0.0360	0.0410	0.0590	0.0580	0.0750	0.0810
SK	0.0000	0.0200	0.0160	0.0200	0.0190	0.0180	0.0240
SK-TiAlN	0.0000	0.0250	0.0340	0.0250	0.0360	0.0300	0.0250

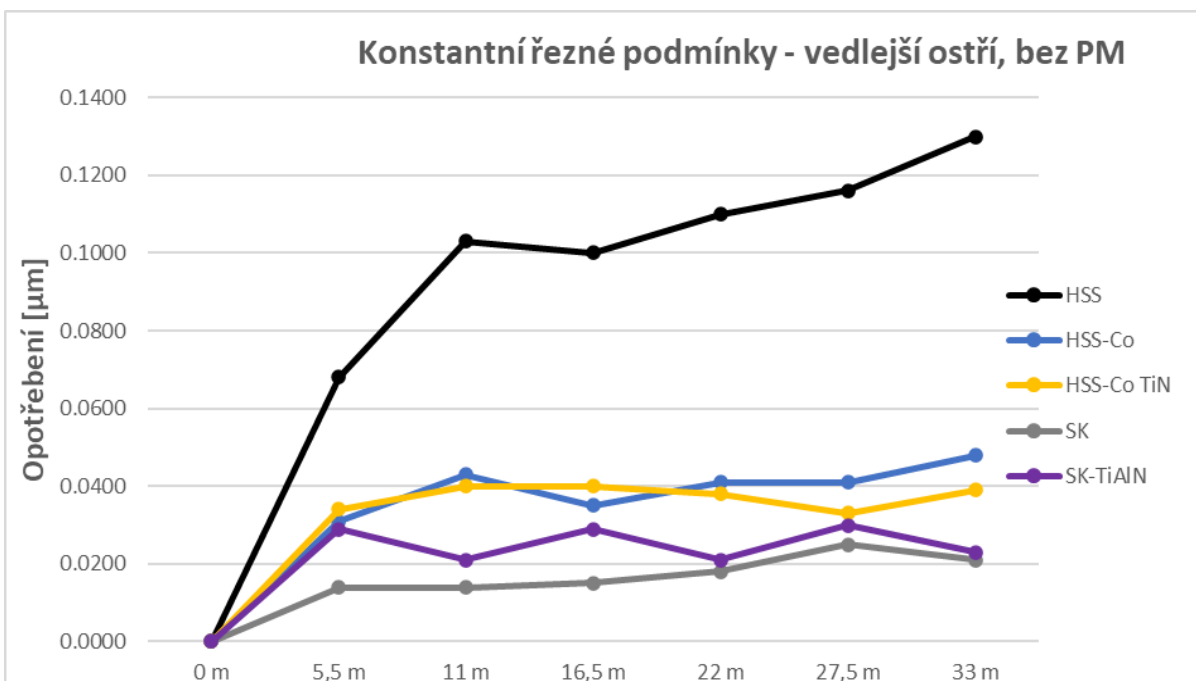
Tab. 17 – Naměřené opotřebení hlavních ostří nástrojů při vrtání za konstantních řezných podmínek do čisté epoxidové pryskyřice bez použití procesního média.

Opotřebení							
Nástroj	Čistá epoxidová pryskyřice						
	Řezné podmínky						
	Konstantní						
	Bez procesního média						
	Vedlejší ostří						
	0 m [μm]	5,5 m [μm]	11 m [μm]	16,5 m [μm]	22 m [μm]	27,5 m [μm]	33 m [μm]
HSS	0.0000	0.0680	0.1030	0.1000	0.1100	0.1160	0.1300
HSS-Co	0.0000	0.0310	0.0430	0.0350	0.0410	0.0410	0.0480
HSS-Co TiN	0.0000	0.0340	0.0400	0.0400	0.0380	0.0330	0.0390
SK	0.0000	0.0140	0.0140	0.0150	0.0180	0.0250	0.0210
SK-TiAlN	0.0000	0.0290	0.0210	0.0290	0.0210	0.0300	0.0230

Tab. 18 – Naměřené opotřebení vedlejších ostří nástrojů při vrtání za konstantních řezných podmínek do čisté epoxidové pryskyřice bez použití procesního média.



Graf 21 – Naměřené opotřebení hlavních ostří nástrojů při vrtání za konstantních řezných podmínek do čisté epoxidové pryskyřice bez použití procesního média.



Graf 22 – Naměřené opotřebení vedlejších ostří nástrojů při vrtání za konstantních řezných podmínek do čisté epoxidové pryskyřice bez použití procesního média.

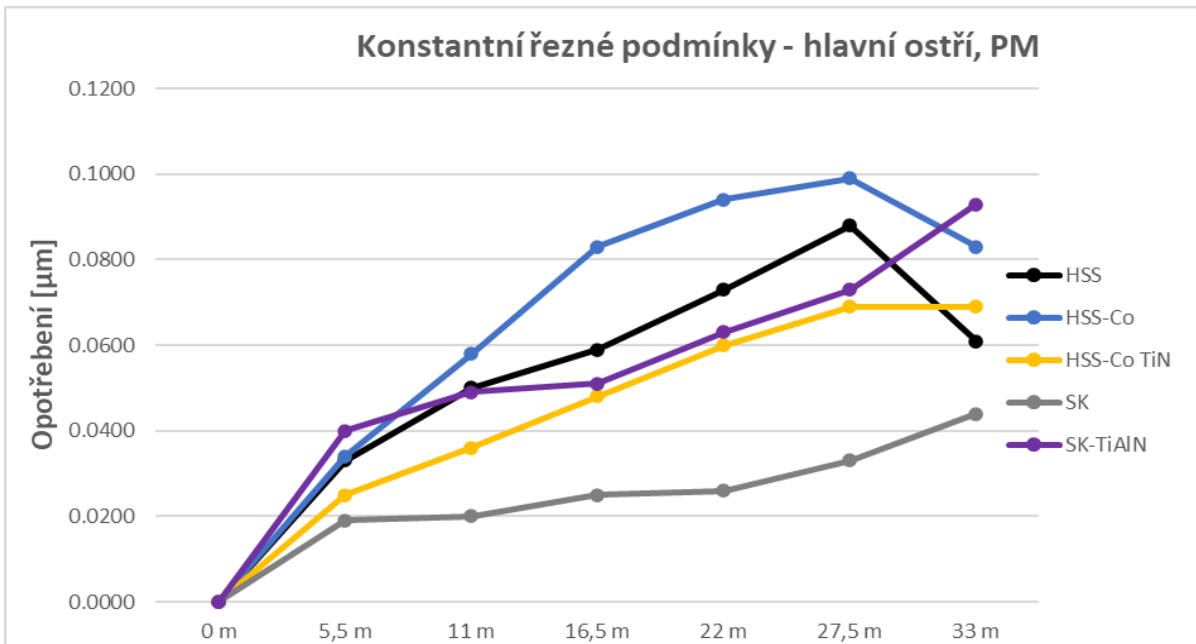
Z tabulek 17 a 18 a grafických zobrazení je patrné, že největšího opotřebení hlavního i vedlejšího ostří při vrtání čisté epoxidové pryskyřice bylo dosaženo u řezného nástroje z HSS. Naopak nejnižší opotřebení bylo naměřeno u nástroje z SK, jak na hlavním, tak i na vedleším ostří.

Opotřebení							
Nástroj	Čistá epoxidová pryskyřice						
	Řezné podmínky						
	Konstantní						
	Procesní médium						
	Hlavní ostří						
	0 m [μm]	5,5 m [μm]	11 m [μm]	16,5 m [μm]	22 m [μm]	27,5 m [μm]	33 m [μm]
HSS	0.0000	0.0330	0.0500	0.0590	0.0730	0.0880	0.0610
HSS-Co	0.0000	0.0340	0.0580	0.0830	0.0940	0.0990	0.0830
HSS-Co TiN	0.0000	0.0250	0.0360	0.0480	0.0600	0.0690	0.0690
SK	0.0000	0.0190	0.0200	0.0250	0.0260	0.0330	0.0440
SK-TiAlN	0.0000	0.0400	0.0490	0.0510	0.0630	0.0730	0.0930

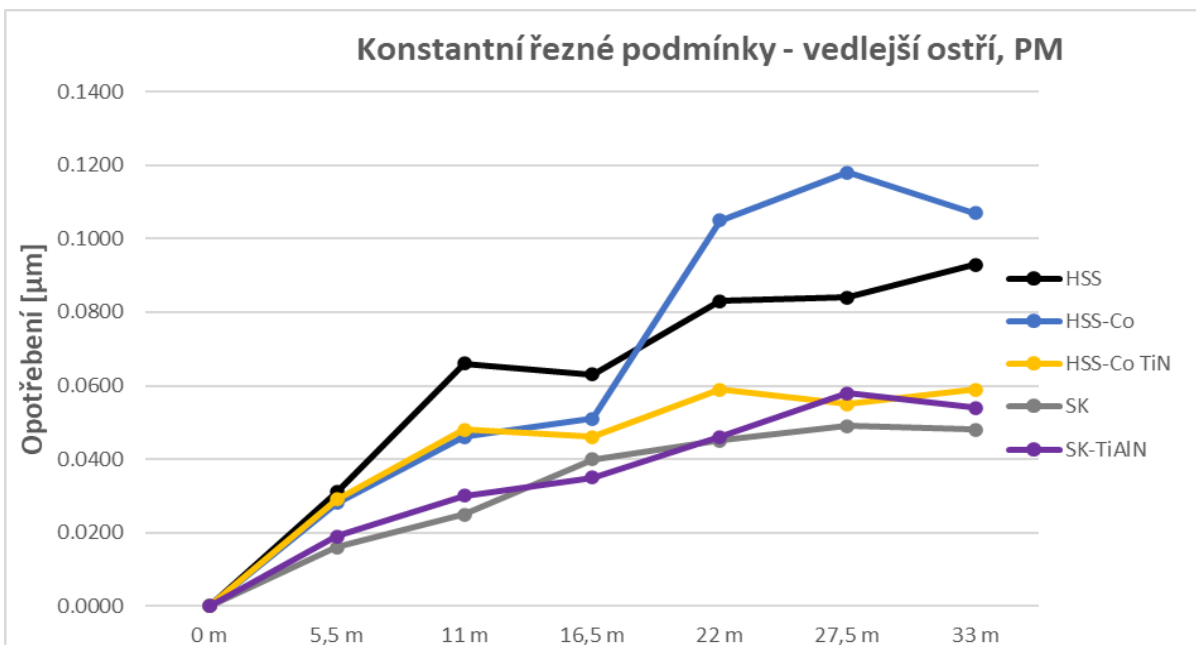
Tab. 19 – Naměřené opotřebení hlavních ostří nástrojů při vrtání za konstantních řezných podmínek do čisté epoxidové pryskyřice za použití procesního média.

Opotřebení							
Nástroj	Čistá epoxidová pryskyřice						
	Řezné podmínky						
	Konstantní						
	Procesní médium						
	Vedlejší ostří						
	0 m [μm]	5,5 m [μm]	11 m [μm]	16,5 m [μm]	22 m [μm]	27,5 m [μm]	33 m [μm]
HSS	0.0000	0.0310	0.0660	0.0630	0.0830	0.0840	0.0930
HSS-Co	0.0000	0.0280	0.0460	0.0510	0.1050	0.1180	0.1070
HSS-Co TiN	0.0000	0.0290	0.0480	0.0460	0.0590	0.0550	0.0590
SK	0.0000	0.0160	0.0250	0.0400	0.0450	0.0490	0.0480
SK-TiAlN	0.0000	0.0190	0.0300	0.0350	0.0460	0.0580	0.0540

Tab. 20 – Naměřené opotřebení vedlejších ostří nástrojů při vrtání za konstantních řezných podmínek do čisté epoxidové pryskyřice za použití procesního média.



Graf 23 – Naměřené opotřebení hlavních ostří nástrojů při vrtání za konstantních řezných podmínek do čisté epoxidové pryskyřice za použití procesního média.



Graf 24 – Naměřené opotřebení vedlejších ostří nástrojů při vrtání za konstantních řezných podmínek do čisté epoxidové pryskyřice za použití procesního média.

Při obrábění optimálními podmínkami s využitím procesní kapaliny bylo největší opotřebení hlavního ostří změřeno na nástroji z materiálu SK-TiAlN. Největší opotřebení vedlejšího ostří bylo změřeno na nástroji z HSS-Co.

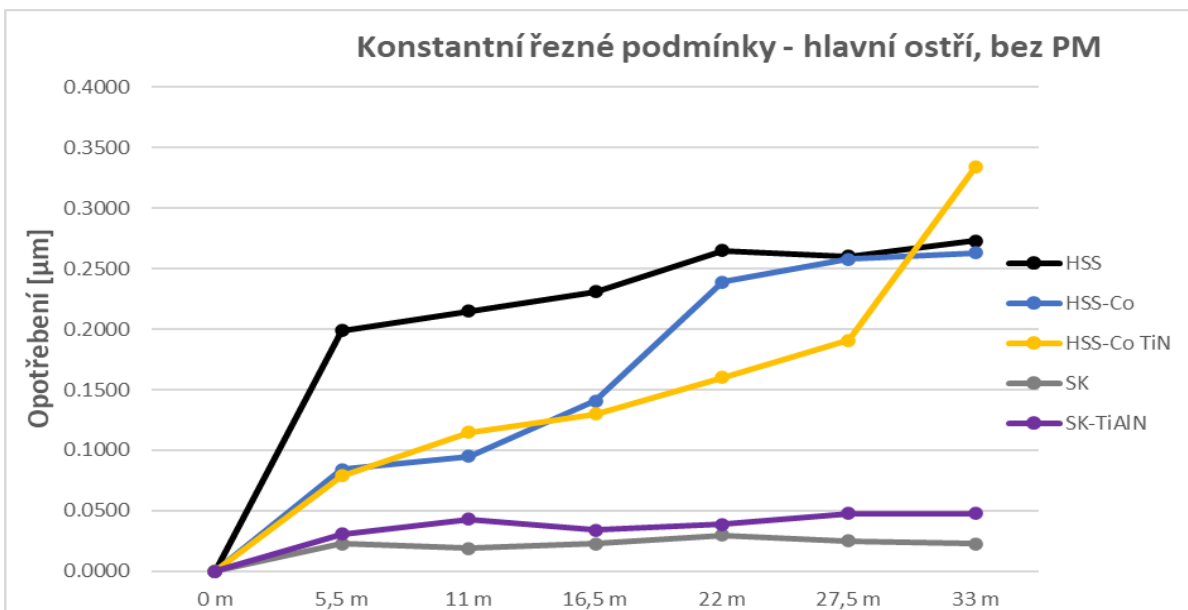
3.7.2. Epoxidová pryskyřice + roving 3700 TEX 50K

Opotřebení							
Nástroj	Epoxidová pryskyřice + roving 3700 TEX 50K						
	Řezné podmínky						
	Konstantní						
	Bez procesního média						
	Hlavní ostří						
	0 m [μm]	5,5 m [μm]	11 m [μm]	16,5 m [μm]	22 m [μm]	27,5 m [μm]	33 m [μm]
HSS	0.0000	0.1990	0.2150	0.2310	0.2650	0.2600	0.2730
HSS-Co	0.0000	0.0840	0.0950	0.1410	0.2390	0.2580	0.2630
HSS-Co TiN	0.0000	0.0790	0.1150	0.1300	0.1600	0.1910	0.3340
SK	0.0000	0.0230	0.0190	0.0230	0.0300	0.0250	0.0230
SK-TiAlN	0.0000	0.0310	0.0430	0.0340	0.0390	0.0480	0.0480

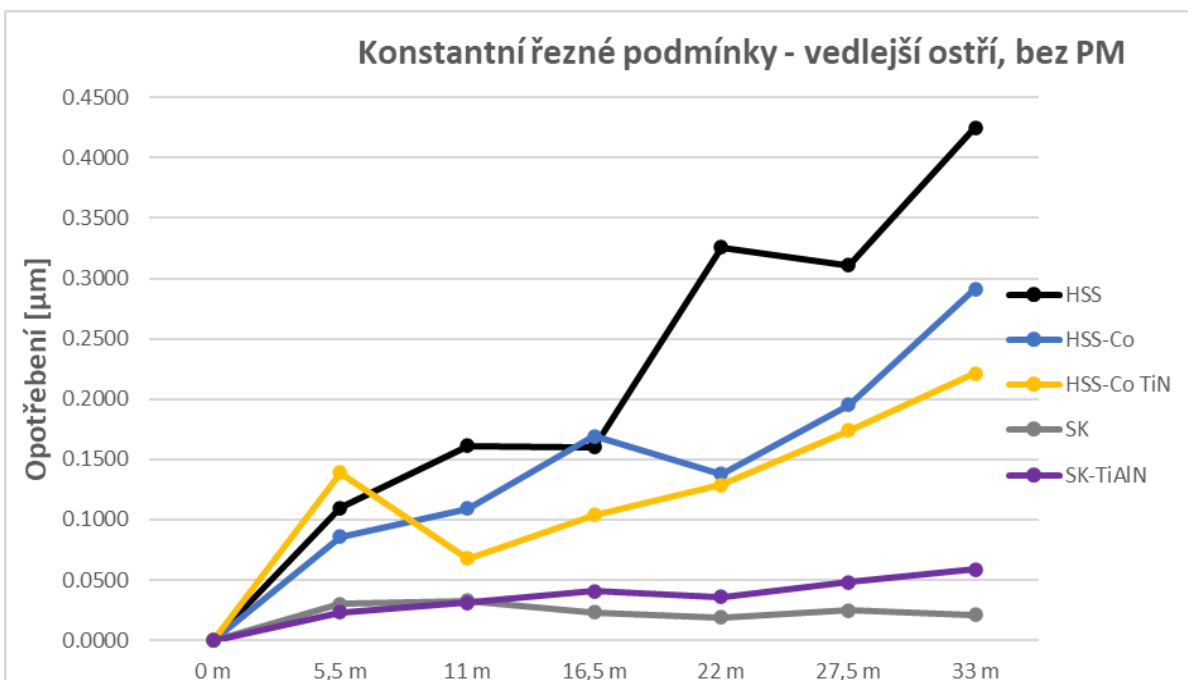
Tab. 21 Naměřené opotřebení hlavních ostří nástrojů při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené vlákny bez použití procesního média.

Opotřebení							
Nástroj	Epoxidová pryskyřice + roving 3700 TEX 50K						
	Řezné podmínky						
	Konstantní						
	Bez procesního média						
	Vedlejší ostří						
	0 m [μm]	5,5 m [μm]	11 m [μm]	16,5 m [μm]	22 m [μm]	27,5 m [μm]	33 m [μm]
HSS	0.0000	0.1100	0.1610	0.1600	0.3260	0.3110	0.4250
HSS-Co	0.0000	0.0860	0.1090	0.1690	0.1380	0.1950	0.2910
HSS-Co TiN	0.0000	0.1390	0.0680	0.1040	0.1290	0.1740	0.2210
SK	0.0000	0.0300	0.0330	0.0230	0.0190	0.0250	0.0210
SK-TiAlN	0.0000	0.0230	0.0310	0.0410	0.0360	0.0480	0.0590

Tab. 22 – Naměřené opotřebení vedlejších ostří nástrojů při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené vlákny bez použití procesního média.



Graf 25 – Naměřené opotřebení hlavních ostří nástrojů při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené vlákny bez použití procesního média.



Graf 26 – Naměřené opotřebení vedlejších ostří nástrojů při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené vlákny bez použití procesního média.

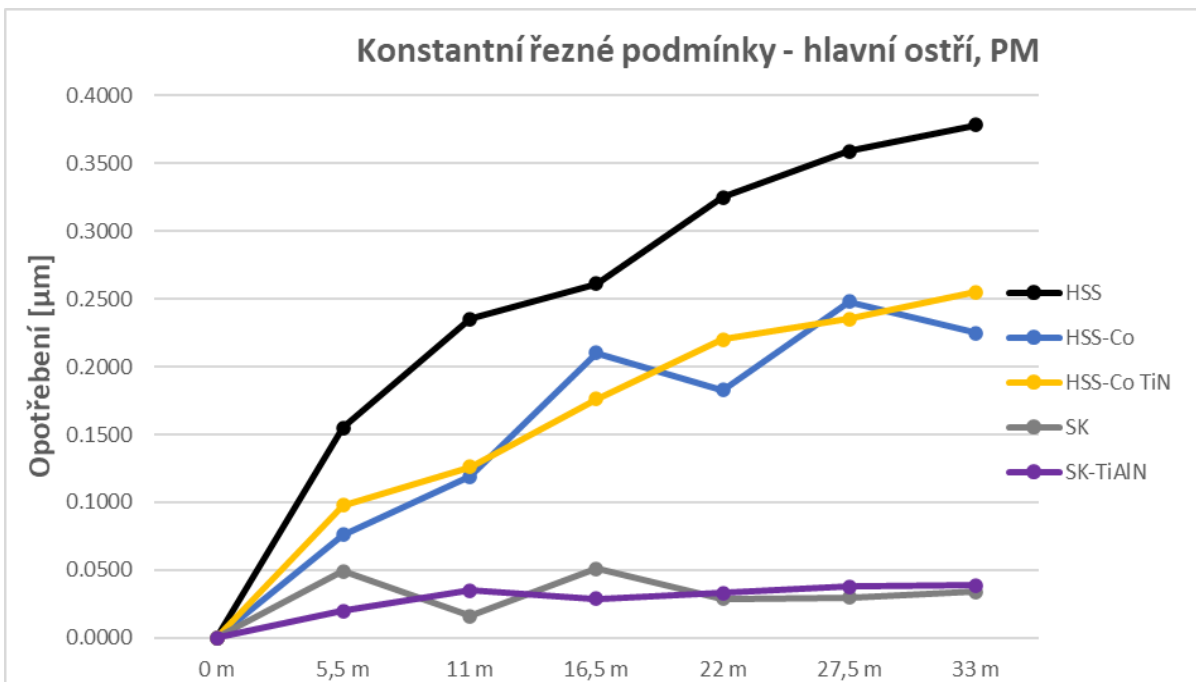
Oproti kap. 3.7.1. je patrný velmi výrazný nárůst hodnot opotřebení u všech zkoumaných nástrojů, viz grafy 21, 22 a 25,26. Po obrábění epoxidové pryskyřice vyztužené uhlíkovými vlákny bylo dosaženo nejvyššího opotřebení hlavního ostří u nástroje z HSS-Co TiN a nejvyššího opotřebení vedlejšího ostří u nástroje z HSS.

Opotřebení							
Nástroj	Epoxidová pryskyřice + roving 3700 TEX 50K						
	Řezné podmínky						
	Konstantní						
	Procesní médium						
	Hlavní ostří						
	0 m [μm]	5,5 m [μm]	11 m [μm]	16,5 m [μm]	22 m [μm]	27,5 m [μm]	33 m [μm]
HSS	0.0000	0.1550	0.2350	0.2610	0.3250	0.3590	0.3780
HSS-Co	0.0000	0.0760	0.1190	0.2100	0.1830	0.2480	0.2250
HSS-Co TiN	0.0000	0.0980	0.1260	0.1760	0.2200	0.2350	0.2550
SK	0.0000	0.0490	0.0160	0.0510	0.0290	0.0300	0.0340
SK-TiAlN	0.0000	0.0200	0.0350	0.0290	0.0330	0.0380	0.0390

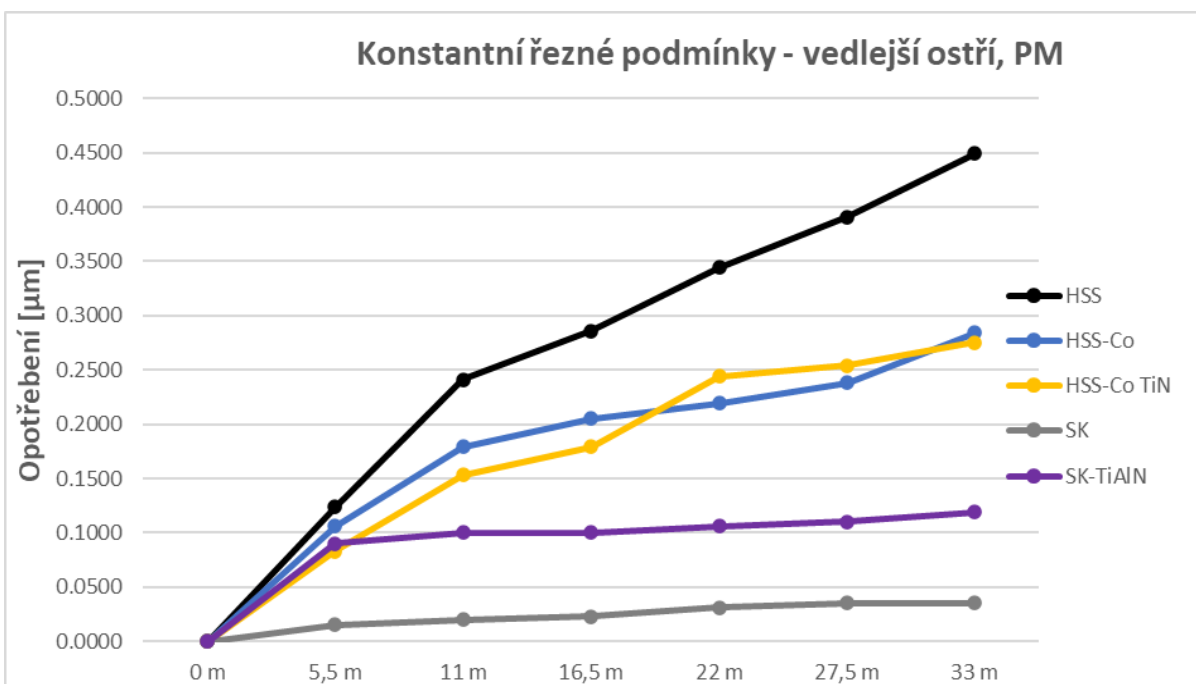
Tab. 23 – Naměřené opotřebení hlavních ostří nástrojů při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené vlákny za použití procesního média.

Opotřebení							
Nástroj	Epoxidová pryskyřice + roving 3700 TEX 50K						
	Řezné podmínky						
	Konstantní						
	Procesní médium						
	Vedlejší ostří						
	0 m [μm]	5,5 m [μm]	11 m [μm]	16,5 m [μm]	22 m [μm]	27,5 m [μm]	33 m [μm]
HSS	0.0000	0.1240	0.2410	0.2860	0.3440	0.3910	0.4490
HSS-Co	0.0000	0.1060	0.1790	0.2050	0.2190	0.2380	0.2840
HSS-Co TiN	0.0000	0.0830	0.1530	0.1790	0.2440	0.2540	0.2750
SK	0.0000	0.0150	0.0200	0.0230	0.0310	0.0350	0.0350
SK-TiAlN	0.0000	0.0900	0.1000	0.1000	0.1060	0.1100	0.1190

Tab. 24 – Naměřené opotřebení vedlejších ostří nástrojů při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené vlákny za použití procesního média.



Graf 27 – Naměřené opotřebení hlavních ostří nástrojů při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené vlákny za použití procesního média.



Graf 28 – Naměřené opotřebení vedlejších ostří nástrojů při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené vlákny za použití procesního média.

Z tab. 23, 24 a grafů 27 a 28 je zřejmé, že nejnižších hodnot opotřebení geometrie řezného nástroje bylo dosaženo u nástroje z SK.

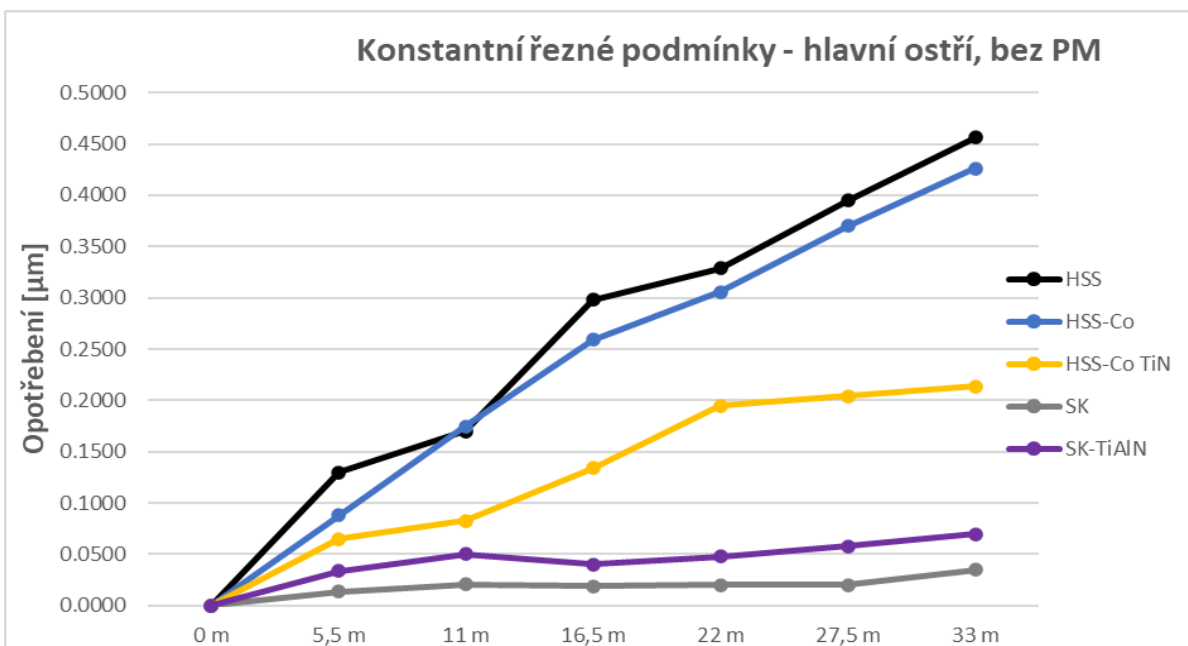
3.7.3. Epoxidová pryskyřice + tkanina 800 TEX 12K

Opotřebení							
Nástroj	Epoxidová pryskyřice + tkanina 800 TEX 12K						
	Řezné podmínky						
	Konstantní						
	Bez procesního média						
	Hlavní ostří						
	0 m [μm]	5,5 m [μm]	11 m [μm]	16,5 m [μm]	22 m [μm]	27,5 m [μm]	33 m [μm]
HSS	0.0000	0.1300	0.1700	0.2980	0.3290	0.3950	0.4560
HSS-Co	0.0000	0.0880	0.1750	0.2590	0.3060	0.3700	0.4260
HSS-Co TiN	0.0000	0.0650	0.0830	0.1340	0.1950	0.2040	0.2140
SK	0.0000	0.0140	0.0210	0.0190	0.0200	0.0200	0.0350
SK-TiAlN	0.0000	0.0340	0.0500	0.0400	0.0480	0.0580	0.0700

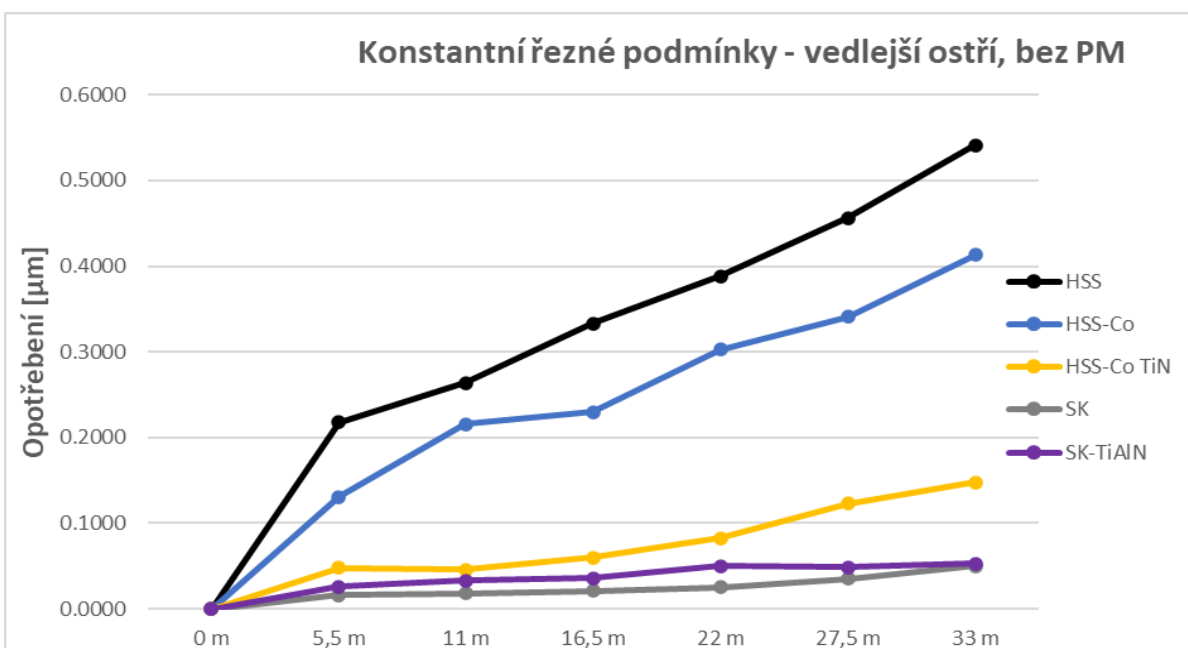
Tab. 25 – Naměřené opotřebení hlavních ostří nástrojů při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené tkaninou bez použití procesního média.

Opotřebení							
Nástroj	Epoxidová pryskyřice + tkanina 800 TEX 12K						
	Řezné podmínky						
	Konstantní						
	Bez procesního média						
	Vedlejší ostří						
	0 m [μm]	5,5 m [μm]	11 m [μm]	16,5 m [μm]	22 m [μm]	27,5 m [μm]	33 m [μm]
HSS	0.0000	0.2180	0.2640	0.3330	0.3880	0.4560	0.5410
HSS-Co	0.0000	0.1310	0.2160	0.2300	0.3030	0.3410	0.4130
HSS-Co TiN	0.0000	0.0480	0.0460	0.0600	0.0830	0.1230	0.1480
SK	0.0000	0.0160	0.0180	0.0210	0.0250	0.0350	0.0500
SK-TiAlN	0.0000	0.0260	0.0330	0.0360	0.0500	0.0490	0.0530

Tab. 26 – Naměřené opotřebení vedlejších ostří nástrojů při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené tkaninou bez použití procesního média.



Graf 29 – Naměřené opotřebení hlavních ostří nástrojů při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené tkaninou bez použití procesního média.



Graf 30 – Naměřené opotřebení vedlejších ostří nástrojů při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené tkaninou bez použití procesního média.

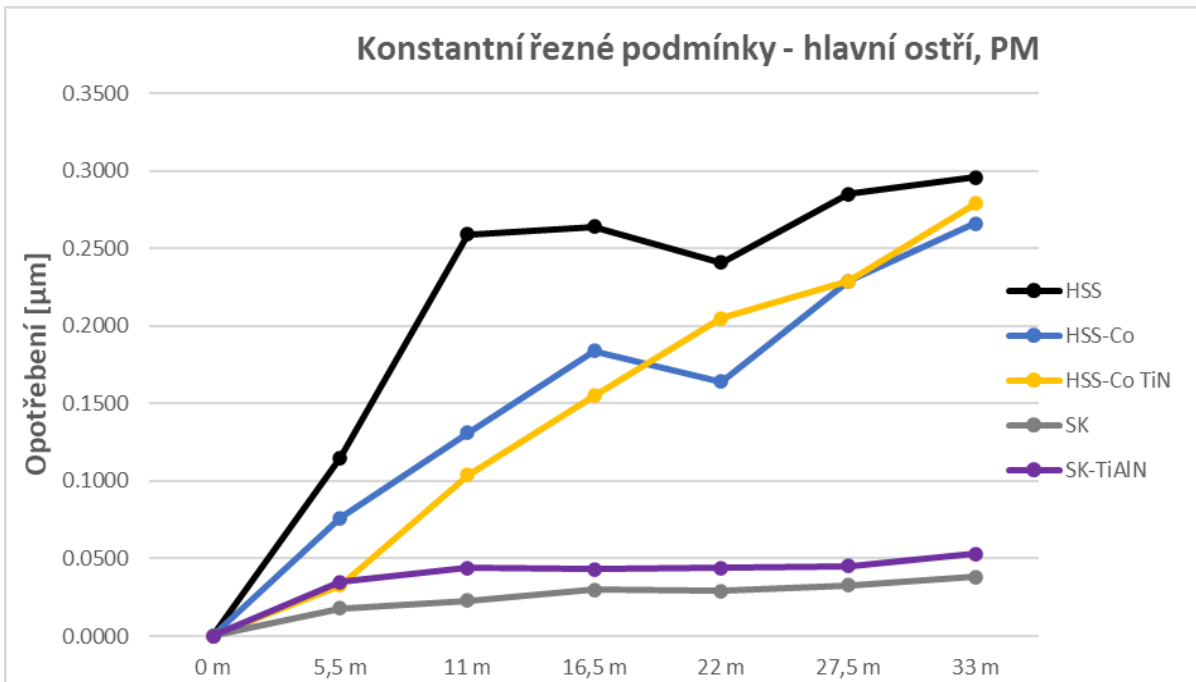
Po porovnání dosažených výsledků z kap. 3.7.1, 3.7.2 a z tab. 25 a 26 je zřejmý vliv obráběného materiálu a použití procesních médií na geometrii řezného nástroje. Oproti výsledkům dosažených při obrábění čisté epoxidové pryskyřice, vykazují hodnoty opotřebení po obrábění kompozitního materiálu s uhlíkovou tkaninou nárůst hodnot opotřebení v řádech desetin mm.

Opotřebení							
Nástroj	Epoxidová pryskyřice + tkanina 800 TEX 12K						
	Řezné podmínky						
	Konstantní						
	Procesní médium						
	Hlavní ostří						
	0 m [μm]	5,5 m [μm]	11 m [μm]	16,5 m [μm]	22 m [μm]	27,5 m [μm]	33 m [μm]
HSS	0.0000	0.1150	0.2590	0.2640	0.2410	0.2850	0.2960
HSS-Co	0.0000	0.0760	0.1310	0.1840	0.1640	0.2290	0.2660
HSS-Co TiN	0.0000	0.0330	0.1040	0.1550	0.2050	0.2290	0.2790
SK	0.0000	0.0180	0.0230	0.0300	0.0290	0.0330	0.0380
SK-TiAlN	0.0000	0.0350	0.0440	0.0430	0.0440	0.0450	0.0530

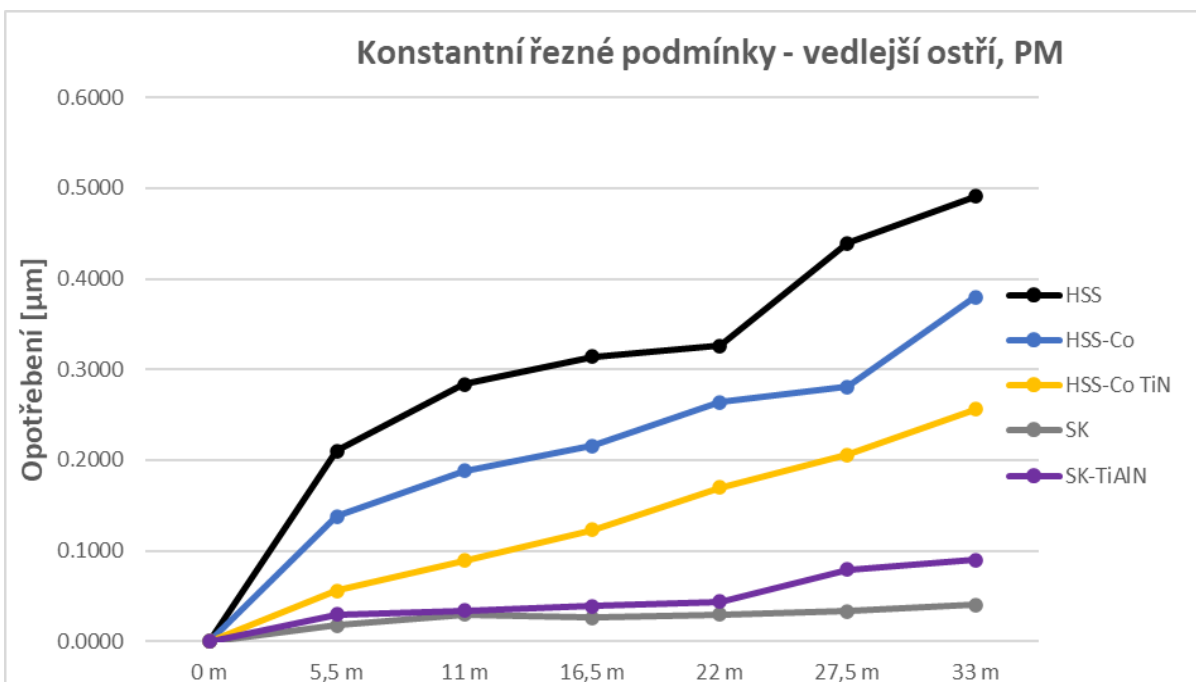
Tab. 27 – Naměřené opotřebení hlavních ostří nástrojů při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené tkaninou za použití procesního média.

Opotřebení							
Nástroj	Epoxidová pryskyřice + tkanina 800 TEX 12K						
	Řezné podmínky						
	Konstantní						
	Procesní médium						
	Vedlejší ostří						
	0 m [μm]	5,5 m [μm]	11 m [μm]	16,5 m [μm]	22 m [μm]	27,5 m [μm]	33 m [μm]
HSS	0.0000	0.2100	0.2840	0.3140	0.3260	0.4390	0.4910
HSS-Co	0.0000	0.1380	0.1880	0.2160	0.2640	0.2810	0.3800
HSS-Co TiN	0.0000	0.0560	0.0890	0.1230	0.1700	0.2060	0.2560
SK	0.0000	0.0180	0.0300	0.0260	0.0300	0.0330	0.0400
SK-TiAlN	0.0000	0.0300	0.0340	0.0390	0.0440	0.0790	0.0900

Tab. 28 – Naměřené opotřebení vedlejších ostří nástrojů při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené tkaninou za použití procesního média.



Graf 31 – Naměřené opotřebení hlavních ostří nástrojů při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené tkaninou za použití procesního média.



Graf 32 – Naměřené opotřebení vedlejších ostří nástrojů při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené tkaninou za použití procesního média.

Při obrábění konstantními podmínkami a za použití procesní kapaliny bylo dosaženo nejnižších hodnot opotřebení obou ostří u nástroje z SK.

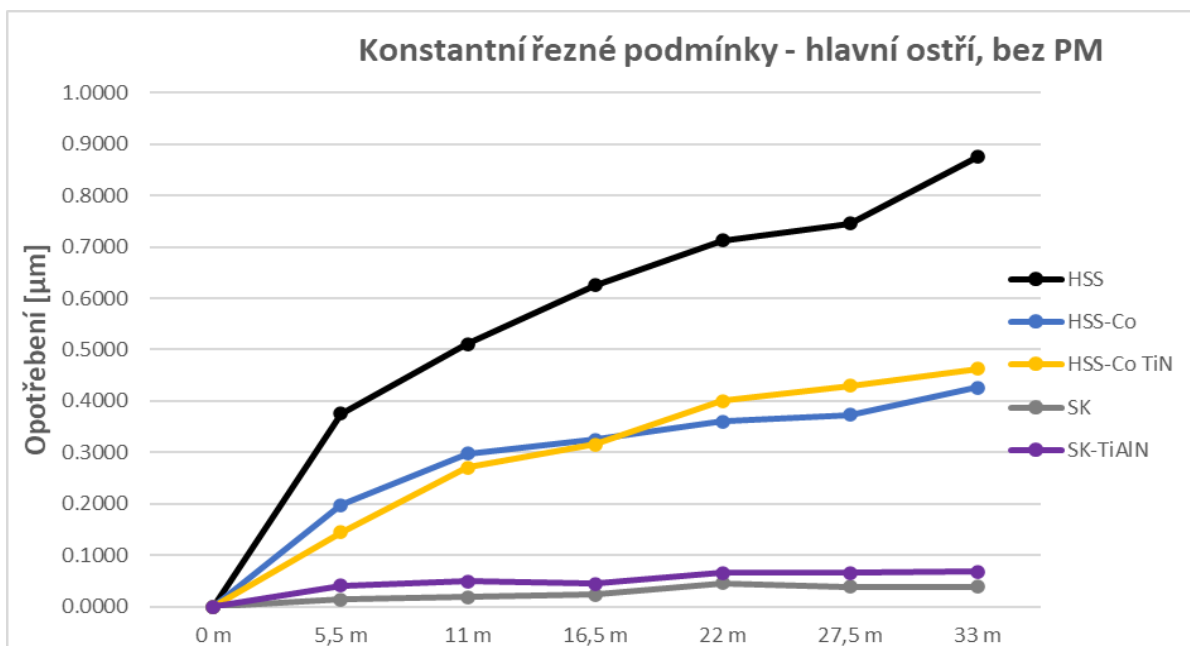
3.7.4. Kompozitní materiál ČVUT

Opotřebení							
Nástroj	Kompozitní materiál ČVUT						
	Řezné podmínky						
	Konstantní						
	Bez procesního média						
	Hlavní ostří						
	0 m [μm]	5,5 m [μm]	11 m [μm]	16,5 m [μm]	22 m [μm]	27,5 m [μm]	33 m [μm]
HSS	0.0000	0.3750	0.5110	0.6250	0.7130	0.7450	0.8750
HSS-Co	0.0000	0.1980	0.2980	0.3250	0.3600	0.3730	0.4260
HSS-Co TiN	0.0000	0.1440	0.2700	0.3150	0.4000	0.4300	0.4630
SK	0.0000	0.0140	0.0180	0.0230	0.0450	0.0390	0.0380
SK-TiAlN	0.0000	0.0410	0.0490	0.0440	0.0660	0.0650	0.0680

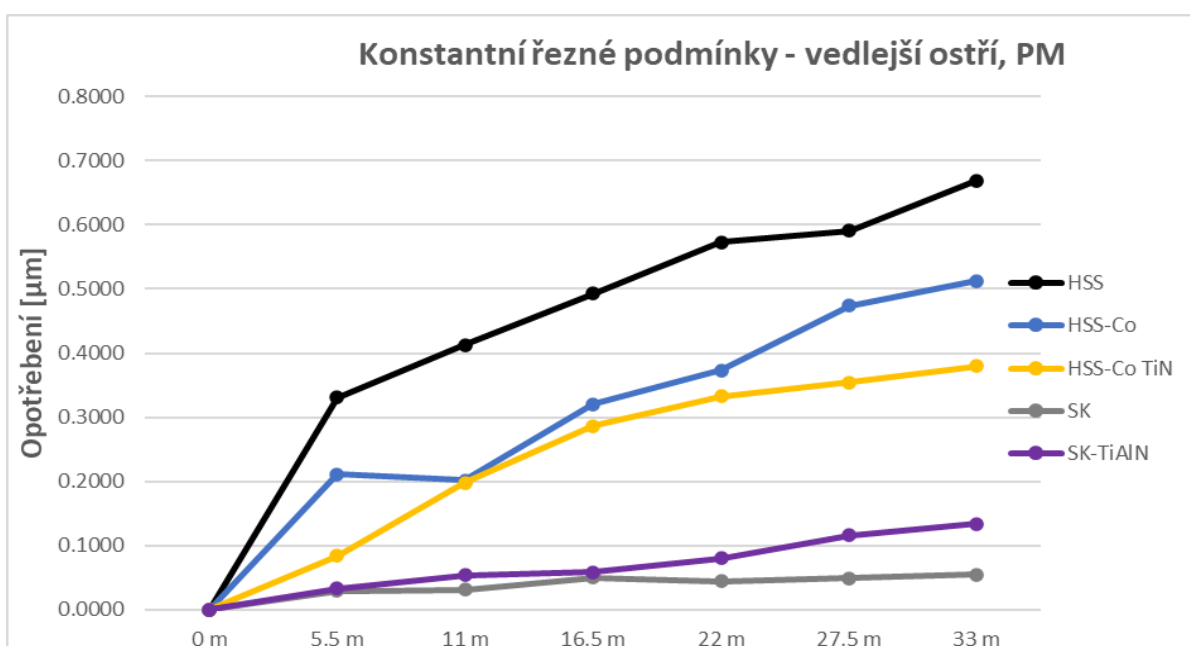
Tab. 29 – Naměřené opotřebení hlavních ostří nástrojů při vrtání za konstantních řezných podmínek do kompozitního materiálu ČVUT bez použití procesního média.

Opotřebení							
Nástroj	Kompozitní materiál ČVUT						
	Řezné podmínky						
	Konstantní						
	Bez procesního média						
	Vedlejší ostří						
	0 m [μm]	5,5 m [μm]	11 m [μm]	16,5 m [μm]	22 m [μm]	27,5 m [μm]	33 m [μm]
HSS	0.0000	0.1990	0.3500	0.5960	0.6680	0.6380	0.6630
HSS-Co	0.0000	0.1900	0.2210	0.3130	0.3850	0.3790	0.4010
HSS-Co TiN	0.0000	0.1480	0.2150	0.2240	0.2960	0.3740	0.4130
SK	0.0000	0.0260	0.0240	0.0280	0.0380	0.0410	0.0360
SK-TiAlN	0.0000	0.0380	0.0610	0.0650	0.0910	0.0740	0.1200

Tab. 30 – Naměřené opotřebení vedlejších ostří nástrojů při vrtání za konstantních řezných podmínek do kompozitního materiálu ČVUT bez použití procesního média.



Graf 33 – Naměřené opotřebení hlavních ostří nástrojů při vrtání za konstantních řezných podmínek do kompozitního materiálu ČVUT bez použití procesního média.



Graf 34 – Naměřené opotřebení vedlejších ostří nástrojů při vrtání za konstantních řezných podmínek do kompozitního materiálu ČVUT bez použití procesního média.

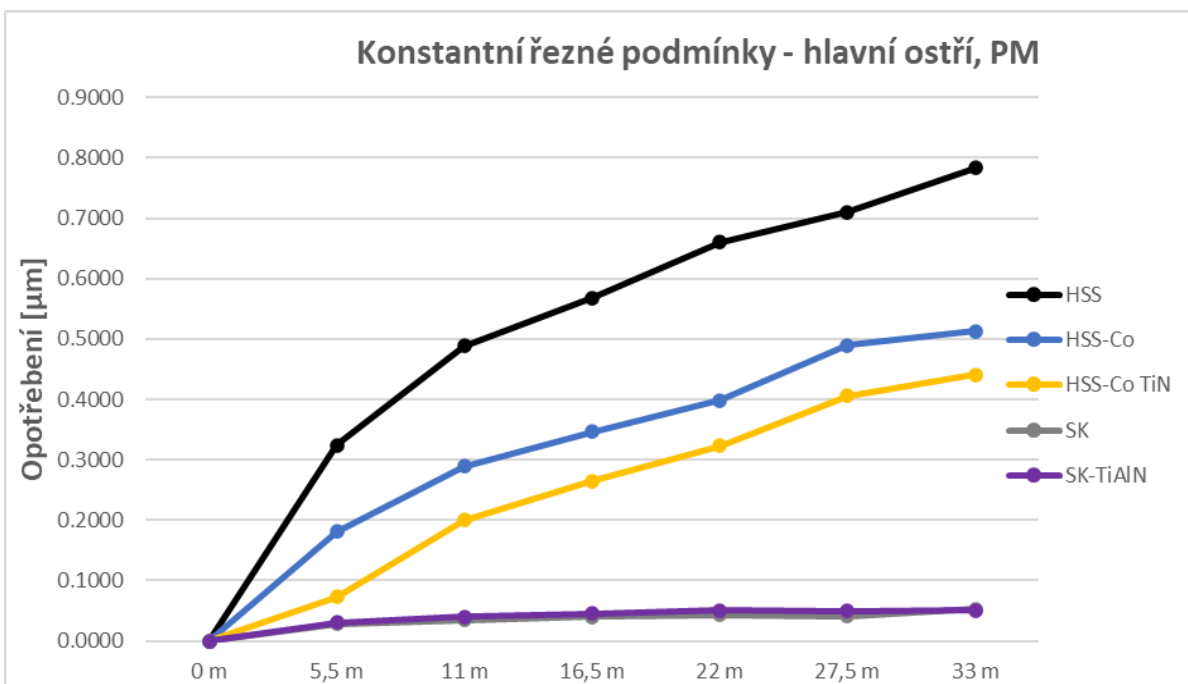
Největšího opotřebení nástroje, ze všech uskutečněných experimentů, bylo dosaženo při vrtání kompozitního materiálu ČVUT, za konstantních podmínek a bez využití procesní kapaliny, u nástroje z HSS. Byly naměřeny nejvyšší hodnoty opotřebení hlavního ostří 0,8750 μm a opotřebení vedlejšího ostří 0,6630 μm.

Opotřebení							
Nástroj	Kompozitní materiál ČVUT						
	Řezné podmínky						
	Konstantní						
	Procesní médium						
	Hlavní ostří						
	0 m	5,5 m	11 m	16,5 m	22 m	27,5 m	33 m
HSS	0.0000	0.3240	0.4880	0.5680	0.6600	0.7100	0.7830
HSS-Co	0.0000	0.1810	0.2890	0.3460	0.3980	0.4900	0.5130
HSS-Co TiN	0.0000	0.0730	0.2000	0.2650	0.3230	0.4060	0.4410
SK	0.0000	0.0280	0.0350	0.0400	0.0430	0.0410	0.0530
SK-TiAlN	0.0000	0.0300	0.0400	0.0450	0.0510	0.0490	0.0510

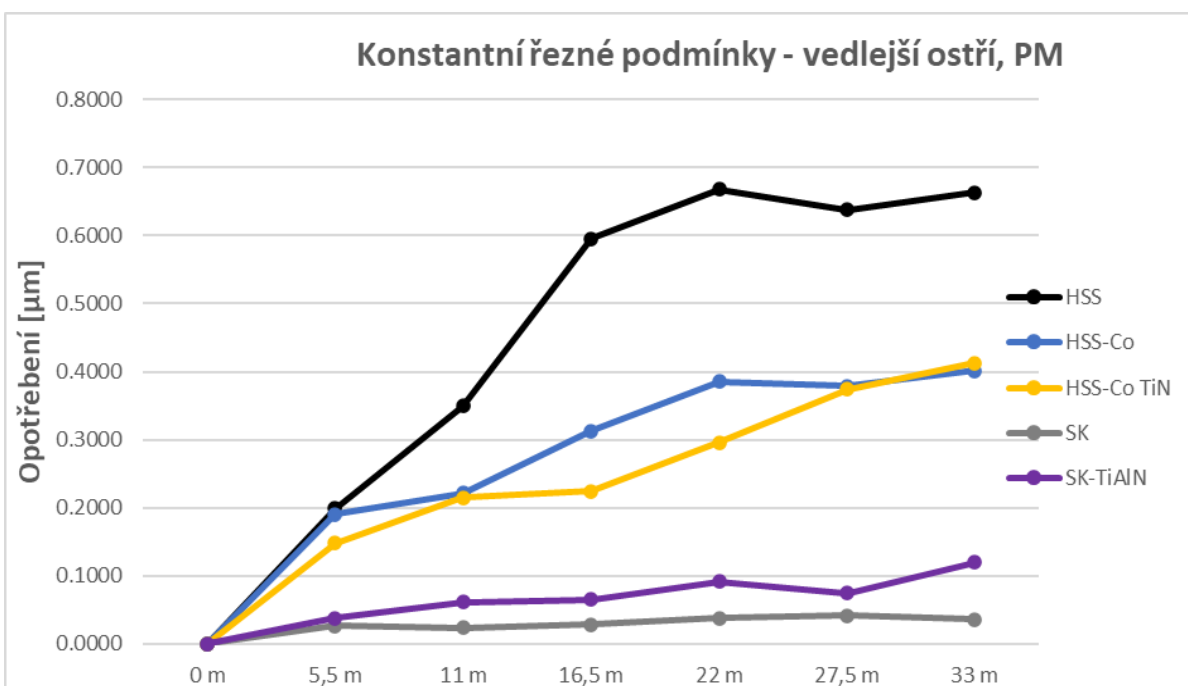
Tab. 31 – Naměřené opotřebení hlavních ostří nástrojů při vrtání za konstantních řezných podmínek do kompozitního materiálu ČVUT za použití procesního média.

Opotřebení							
Nástroj	Kompozitní materiál ČVUT						
	Řezné podmínky						
	Konstantní						
	Procesní médium						
	Vedlejší ostří						
	0 m [μm]	5,5 m [μm]	11 m [μm]	16,5 m [μm]	22 m [μm]	27,5 m [μm]	33 m [μm]
HSS	0.0000	0.3310	0.4130	0.4930	0.5730	0.5910	0.6690
HSS-Co	0.0000	0.2110	0.2020	0.3200	0.3730	0.4740	0.5130
HSS-Co TiN	0.0000	0.0840	0.1980	0.2860	0.3330	0.3540	0.3800
SK	0.0000	0.0290	0.0310	0.0500	0.0440	0.0490	0.0550
SK-TiAlN	0.0000	0.0330	0.0540	0.0580	0.0800	0.1160	0.1340

Tab. 32 – Naměřené opotřebení vedlejších ostří nástrojů při vrtání za konstantních řezných podmínek do kompozitního materiálu ČVUT za použití procesního média.



Graf 35 – Naměřené opotřebení hlavních ostří nástrojů při vrtání za konstantních řezných podmínek do kompozitního materiálu ČVUT za použití procesního média.



Graf 36 – Naměřené opotřebení vedlejších ostří nástrojů při vrtání za konstantních řezných podmínek do kompozitního materiálu ČVUT za použití procesního média.

Obdobně jako u experimentu při vrtání do kompozitního materiálu ČVUT bez použití procesní kapaliny, tak i při vrtání s využitím procesní kapaliny byly naměřeny nevyšší hodnoty opotřebení obou ostří u nástroje z HSS.

3.8. Vyhodnocení drsnosti

Tato kapitola obsahuje výsledky z měření drsnosti při stanovených řezných podmínkách, viz tab. 3 kap. 3.3

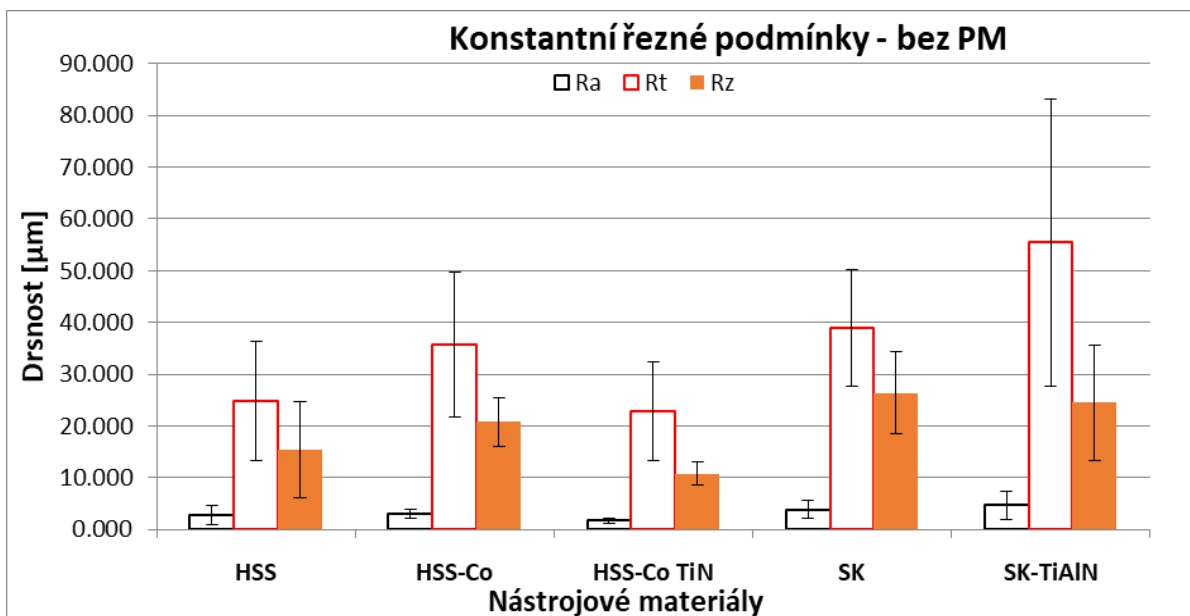
3.8.1. Čistá epoxidová pryskyřice

Drsnost							
Nástroj	Čistá epoxidová pryskyřice						
	Řezné podmínky						
	Konstantní						
	Bez procesního média						
	Ra [μm]	Konfideční interval Ra [μm]	Rt [μm]	Konfideční interval Rt [μm]	Rz [μm]	Konfideční interval Rz [μm]	
HSS	2.763	± 1.930	24.817	± 11.543	15.430	± 9.321	
HSS-Co	3.044	± 0.838	35.713	± 13.941	20.751	± 4.751	
HSS-Co TiN	1.729	± 0.466	22.786	± 9.477	10.774	± 2.273	
SK	3.847	± 1.700	38.889	± 11.266	26.414	± 7.909	
SK-TiAlN	4.685	± 2.724	55.489	± 27.751	24.449	± 11.114	

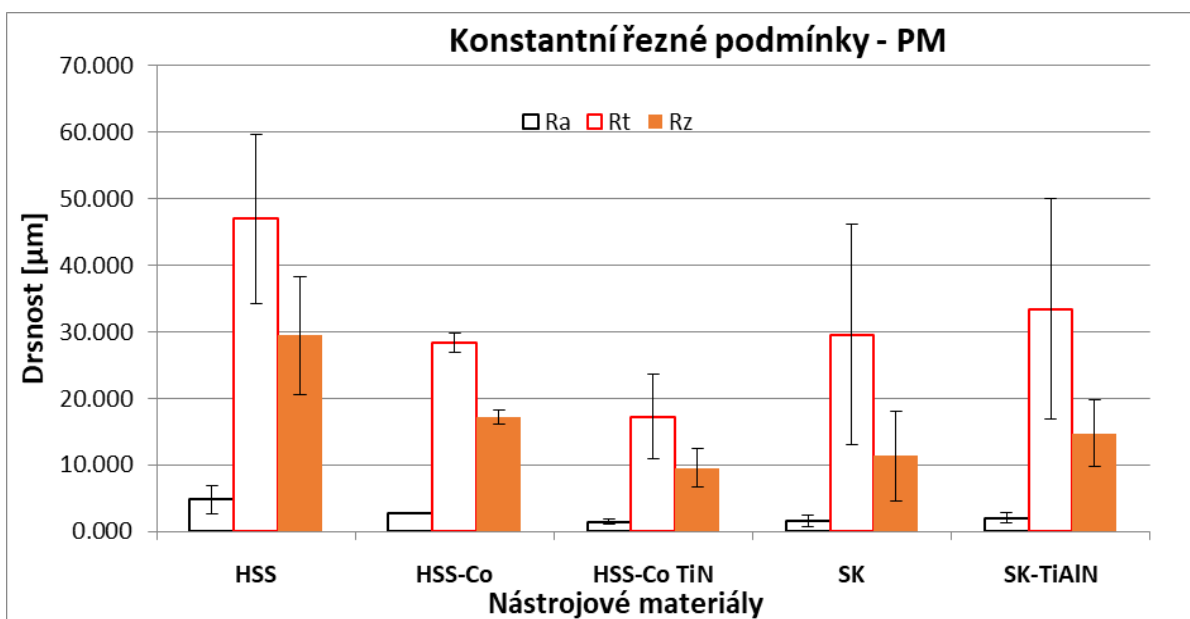
Tab. 33 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při vrtání za konstantních řezných podmínek do čisté epoxidové pryskyřice bez použití procesního média.

Drsnost							
Nástroj	Čistá epoxidová pryskyřice						
	Řezné podmínky						
	Konstantní						
	Procesní médium						
	Ra [μm]	Konfideční interval Ra [μm]	Rt [μm]	Konfideční interval Rt [μm]	Rz [μm]	Konfideční interval Rz [μm]	
HSS	4.785	± 2.111	47.014	± 12.717	29.425	± 8.934	
HSS-Co	2.759	± 0.138	28.330	± 1.448	17.151	± 1.028	
HSS-Co TiN	1.409	± 0.364	17.245	± 6.377	9.548	± 2.917	
SK	1.604	± 0.882	29.526	± 16.562	11.310	± 6.664	
SK-TiAlN	2.037	± 0.818	33.457	± 16.579	14.763	± 5.068	

Tab. 34 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při vrtání za konstantních řezných podmínek do čisté epoxidové pryskyřice za použití procesního média.



Graf 37 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při vrtání za konstantních řezných podmínek do čisté epoxidové pryskyřice bez použití procesního média.



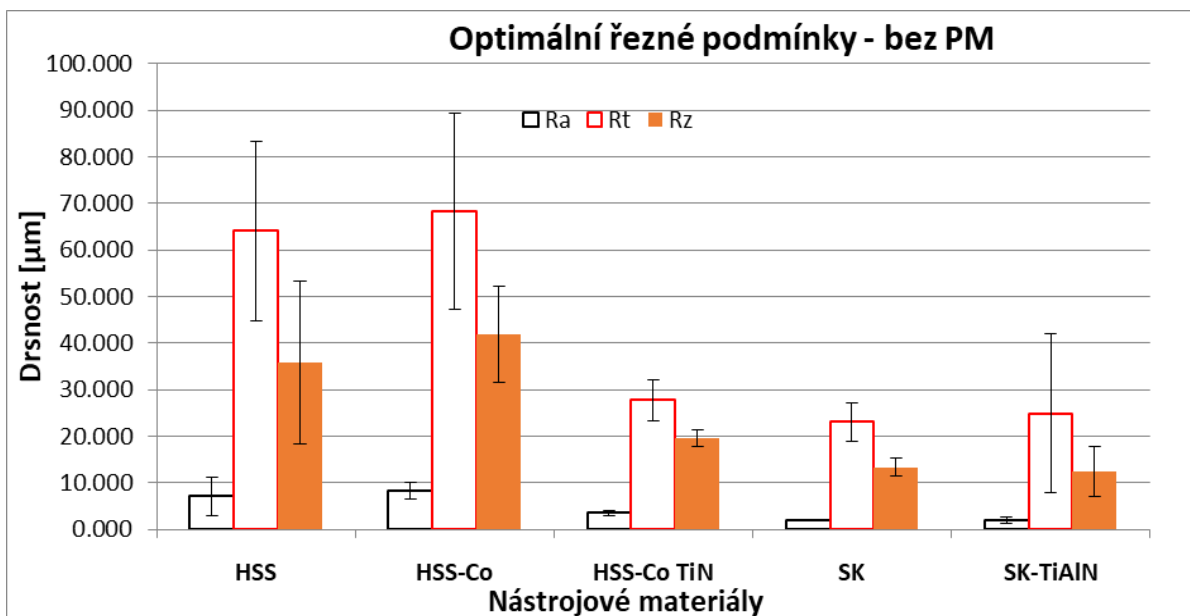
Graf 38 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při vrtání za konstantních řezných podmínek do čisté epoxidové pryskyřice za použití procesního média.

Drsnost						
Nástroj	Čistá epoxidová pryskyřice					
	Řezné podmínky					
	Optimální					
	Bez procesního média					
	Ra [μm]	Konfideční interval Ra [μm]	Rt [μm]	Konfideční interval Rt [μm]	Rz [μm]	Konfideční interval Rz [μm]
HSS	7.143	± 4.103	64.088	± 19.343	35.905	± 17.433
HSS-Co	8.221	± 1.831	68.317	± 21.157	41.936	± 10.280
HSS-Co TiN	3.522	± 0.442	27.778	± 4.361	19.690	± 1.769
SK	1.978	± 0.258	23.078	± 4.056	13.341	± 1.983
SK-TiAlN	1.987	± 0.791	24.871	± 17.096	12.441	± 5.261

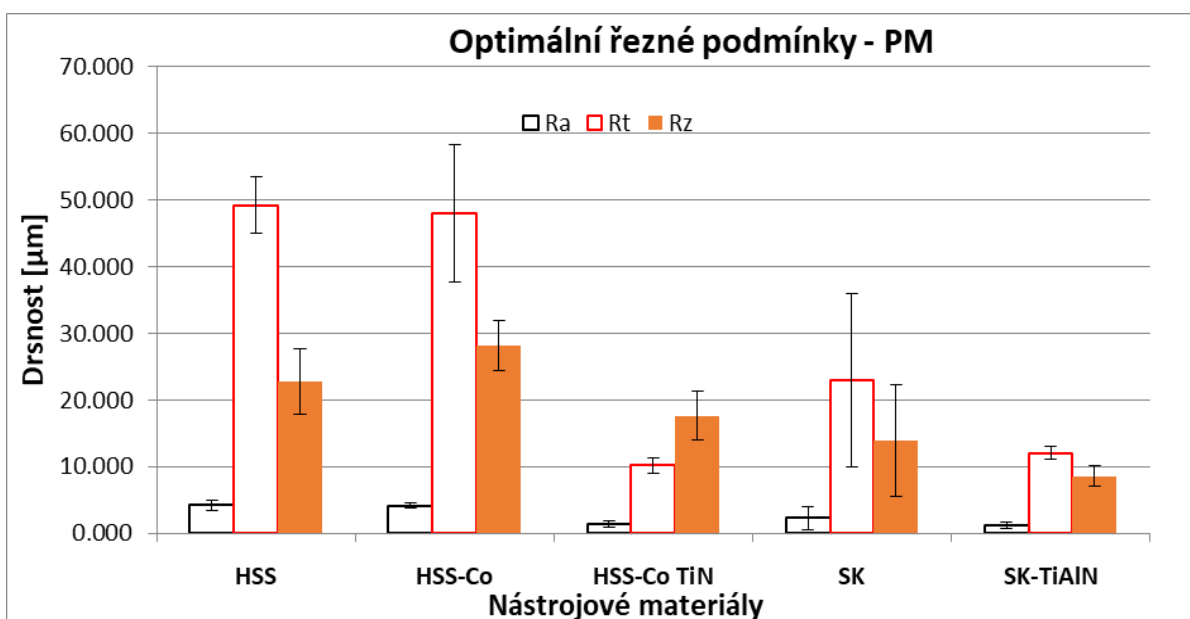
Tab. 35 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při vrtání za optimálních řezných podmínek do čisté epoxidové pryskyřice bez použití procesního média.

Drsnost						
Nástroj	Čistá epoxidová pryskyřice					
	Řezné podmínky					
	Optimální					
	Procesní médium					
	Ra [μm]	Konfideční interval Ra [μm]	Rt [μm]	Konfideční interval Rt [μm]	Rz [μm]	Konfideční interval Rz [μm]
HSS	4.231	± 0.796	49.225	± 4.254	22.759	± 4.901
HSS-Co	4.168	± 0.419	47.991	± 10.340	28.225	± 3.760
HSS-Co TiN	1.363	± 0.472	10.197	± 1.165	17.649	± 3.687
SK	2.272	± 1.717	22.922	± 13.007	13.932	± 8.355
SK-TiAlN	1.162	± 0.483	12.038	± 0.911	8.526	± 1.537

Tab. 36 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při vrtání za optimálních řezných podmínek do čisté epoxidové pryskyřice za použití procesního média.



Graf 39 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při vrtání za optimálních řezných podmínek do čisté epoxidové pryskyřice bez použití procesního média.



Graf 40 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při vrtání za optimálních řezných podmínek do čisté epoxidové pryskyřice za použití procesního média.

Z výše uvedených tabulek 33 až 36 a patřičných grafů, jsou patrné velikosti naměřených parametrů drsnosti při konstantních a optimálních. Nejmenší hodnoty naměřených parametrů drsnosti jsou $R_a = 1,162 \pm 0,483 \mu\text{m}$, $R_t = 10,197 \pm 1,165 \mu\text{m}$ a konečně $R_z = 8,526 \pm 1,537 \mu\text{m}$.

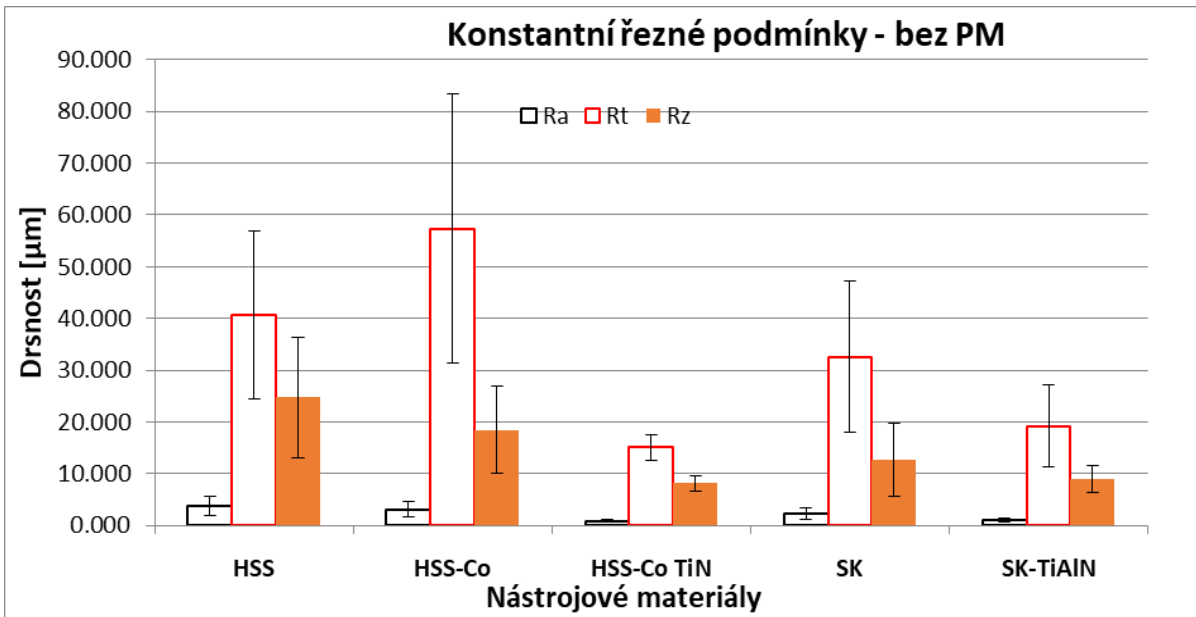
3.8.2. Epoxidová pryskyřice + roving 3700 TEX 50K

Drsnost						
Nástroj	Epoxidová pryskyřice + roving 3700 TEX 50K					
	Řezné podmínky					
	Konstantní					
	Bez procesního média					
	Ra [μm]	Konfideční interval Ra [μm]	Rt [μm]	Konfideční interval Rt [μm]	Rz [μm]	Konfideční interval Rz [μm]
HSS	3.801	± 1.912	40.648	± 16.286	24.724	± 11.668
HSS-Co	3.136	± 1.556	57.378	± 26.029	18.491	± 8.516
HSS-Co TiN	0.909	± 0.165	15.082	± 2.433	8.143	± 1.464
SK	2.259	± 1.010	32.560	± 14.612	12.757	± 7.014
SK-TiAlN	0.978	± 0.379	19.194	± 7.982	8.877	± 2.620

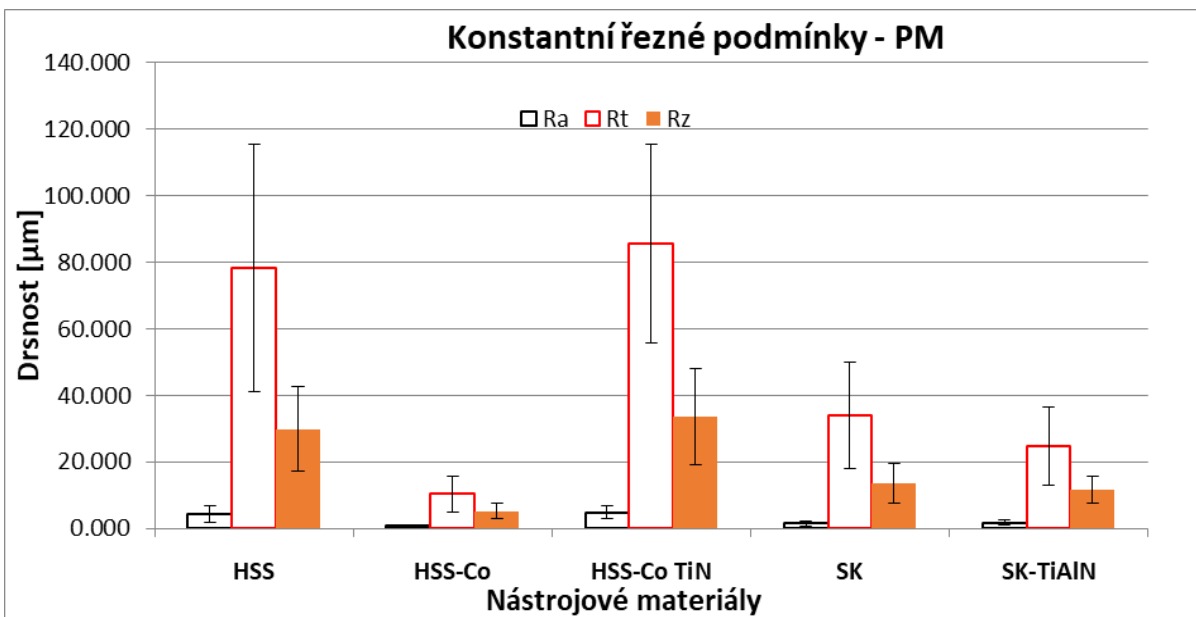
Tab. 37 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené vlákny bez použití procesního média.

Drsnost						
Nástroj	Epoxidová pryskyřice + roving 3700 TEX 50K					
	Řezné podmínky					
	Konstantní					
	Procesní médium					
	Ra [μm]	Konfideční interval Ra [μm]	Rt [μm]	Konfideční interval Rt [μm]	Rz [μm]	Konfideční interval Rz [μm]
HSS	4.261	± 2.374	78.375	± 37.122	29.884	± 12.733
HSS-Co	0.720	± 0.296	10.309	± 5.264	5.176	± 2.228
HSS-Co TiN	4.779	± 1.862	85.732	± 29.896	33.616	± 14.554
SK	1.567	± 0.762	33.897	± 15.994	13.547	± 5.859
SK-TiAlN	1.788	± 0.705	24.635	± 11.821	11.687	± 4.122

Tab. 38 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené vlákny za použití procesního média.



Graf 41 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené vlákny bez použití procesního média.



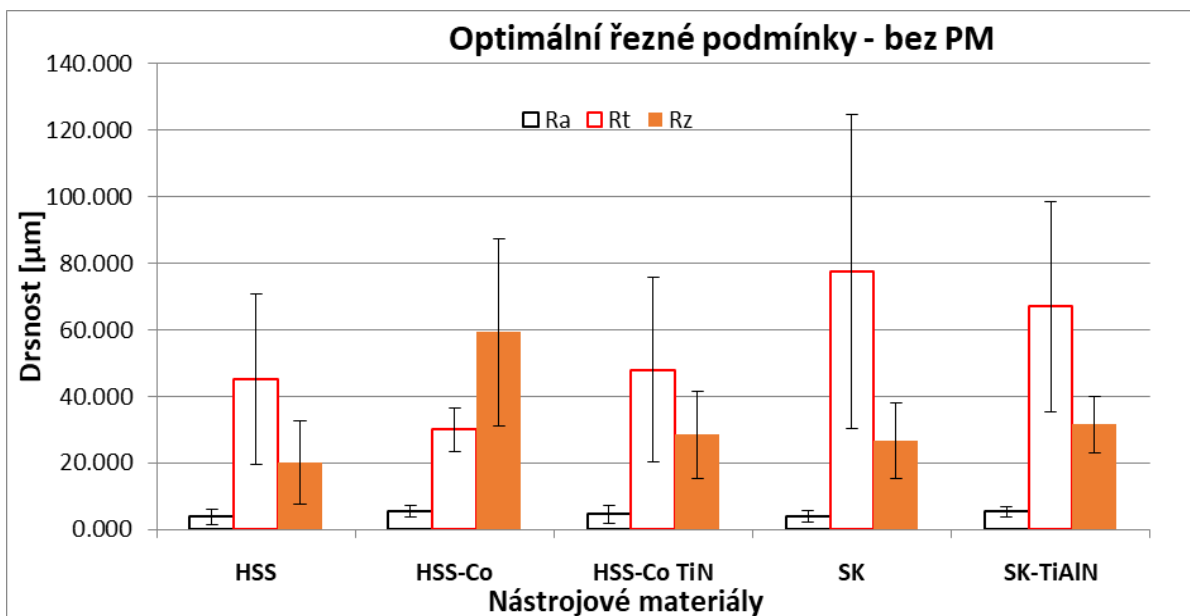
Graf 42 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené vlákny za použití procesního média.

Drsnost						
Nástroj	Epoxidová pryskyřice + roving 3700 TEX 50K					
	Řezné podmínky					
	Optimální					
	Bez procesního média					
	Ra [μm]	Konfideční interval Ra [μm]	Rt [μm]	Konfideční interval Rt [μm]	Rz [μm]	Konfideční interval Rz [μm]
HSS	3.807	± 2.387	45.172	± 25.470	20.065	± 12.467
HSS-Co	5.398	± 1.627	30.079	± 6.542	59.285	± 28.137
HSS-Co TiN	4.563	± 2.705	47.872	± 27.744	28.503	± 13.163
SK	3.986	± 1.766	77.541	± 47.131	26.628	± 11.234
SK-TiAlN	5.447	± 1.530	66.962	± 31.563	31.477	± 8.505

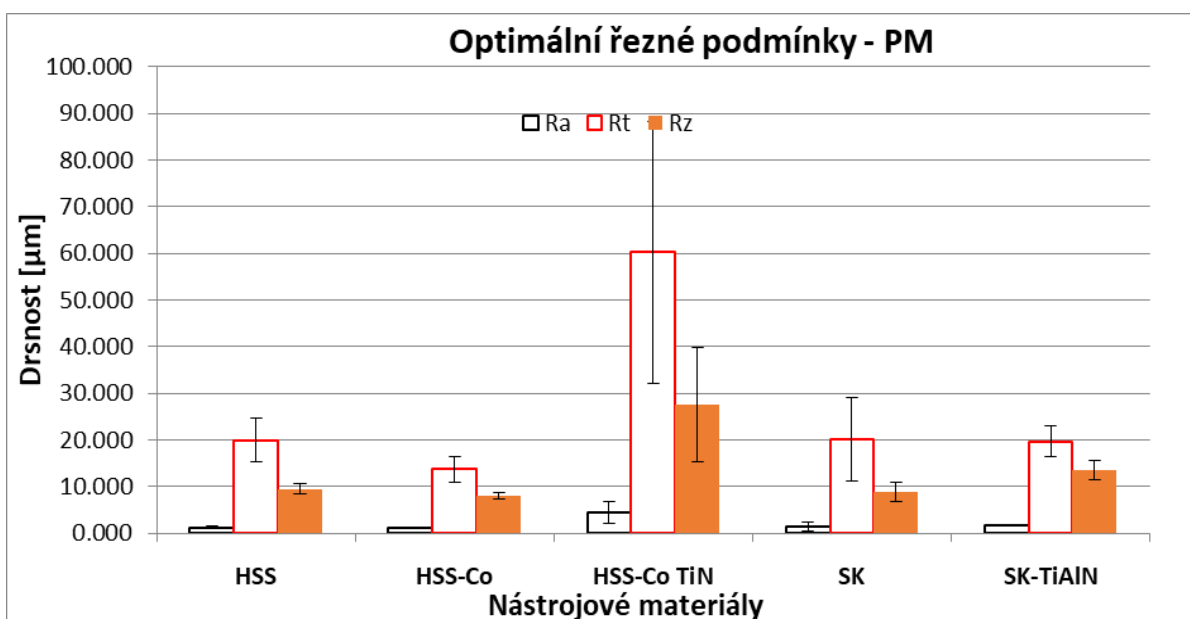
Tab. 39 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při vrtání za optimálních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené vlákny bez použití procesního média.

Drsnost						
Nástroj	Epoxidová pryskyřice + roving 3700 TEX 50K					
	Řezné podmínky					
	Optimální					
	Procesní médium					
	Ra [μm]	Konfideční interval Ra [μm]	Rt [μm]	Konfideční interval Rt [μm]	Rz [μm]	Konfideční interval Rz [μm]
HSS	1.270	± 0.334	19.901	± 4.702	9.506	± 1.060
HSS-Co	1.076	± 0.116	13.750	± 2.743	8.093	± 0.667
HSS-Co TiN	4.458	± 2.312	60.225	± 28.135	27.632	± 12.208
SK	1.522	± 0.977	20.179	± 9.044	8.949	± 2.045
SK-TiAlN	1.779	± 0.102	19.721	± 3.273	13.489	± 2.107

Tab. 40 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při vrtání za optimálních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené vlákny za použití procesního média.



Graf 43 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při vrtání za optimálních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené vlákny bez použití procesního média.



Graf 44 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při vrtání za optimálních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené vlákny za použití procesního média.

Po vrtání do kompozitního materiálu s uhlíkovými vlákny byla naměřena minima parametrů drsnosti $R_a = 0,720 \pm 0,296 \mu\text{m}$, $R_t = 10,309 \pm 5,264 \mu\text{m}$ a $R_z = 5,176 \pm 2,228 \mu\text{m}$.

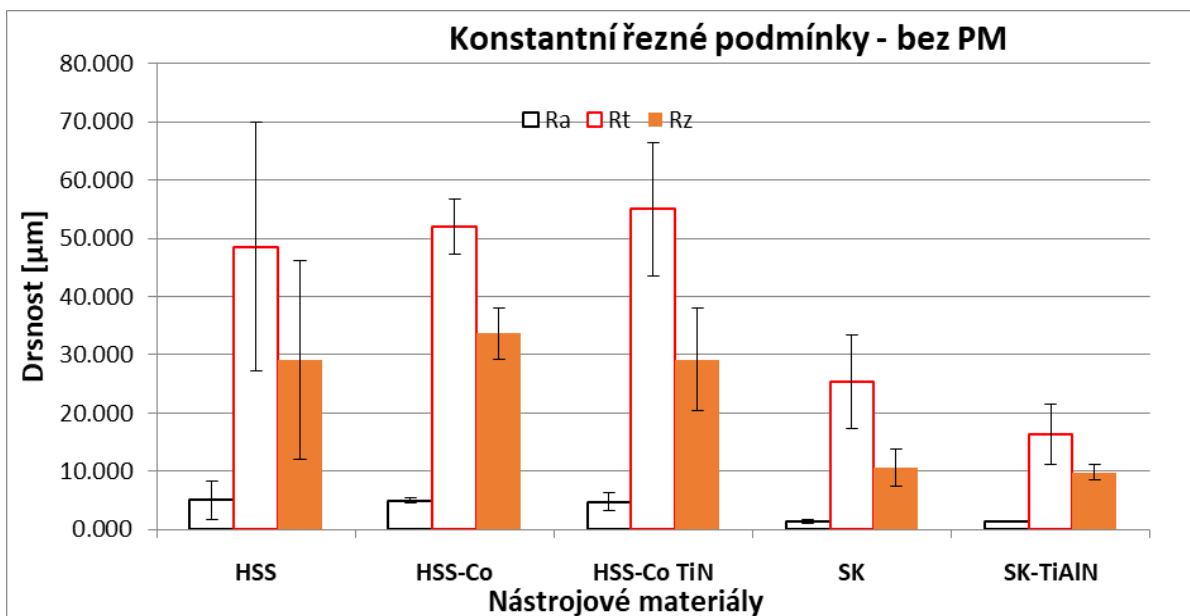
3.8.3. Epoxidová pryskyřice + tkanina 800 TEX 12K

Drsnost						
Nástroj	Epoxidová pryskyřice + tkanina 800 TEX 12K					
	Řezné podmínky					
	Konstantní					
	Bez procesního média					
	Ra [μm]	Konfideční interval Ra [μm]	Rt [μm]	Konfideční interval Rt [μm]	Rz [μm]	Konfideční interval Rz [μm]
HSS	5.027	± 3.278	48.583	± 21.427	29.073	± 17.101
HSS-Co	4.965	± 0.513	51.999	± 4.752	33.645	± 4.433
HSS-Co TiN	4.768	± 1.616	54.989	± 11.524	29.172	± 8.803
SK	1.295	± 0.369	25.299	± 8.018	10.537	± 3.194
SK-TiAlN	1.321	± 0.152	16.392	± 5.193	9.809	± 1.393

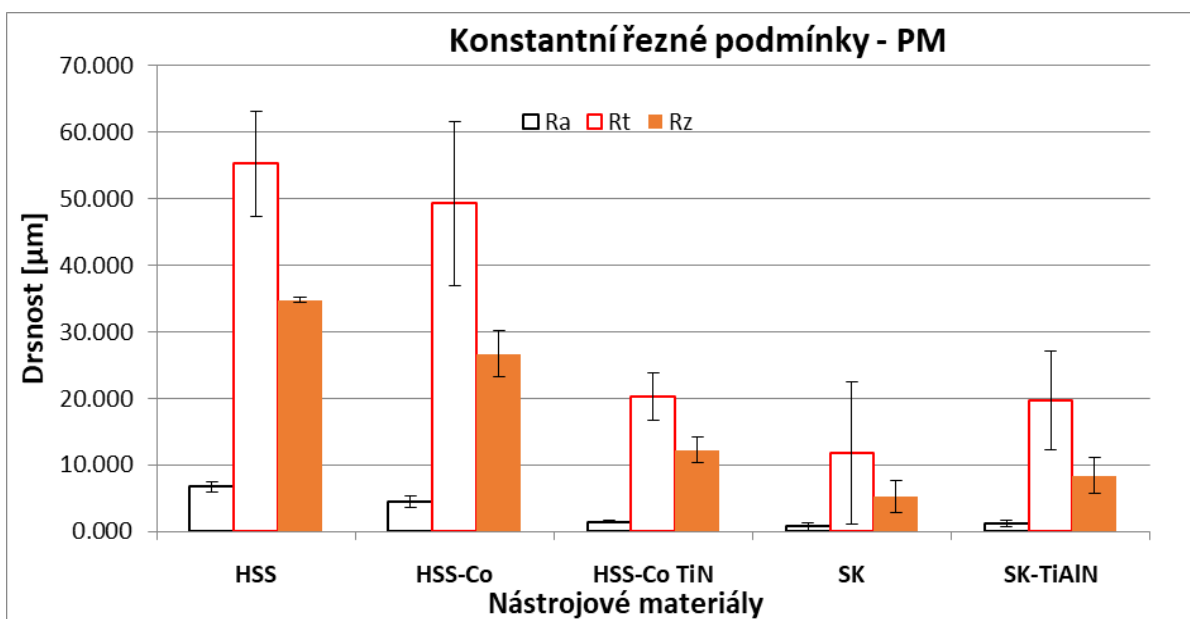
Tab. 41 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené tkaninou bez použití procesního média.

Drsnost						
Nástroj	Epoxidová pryskyřice + tkanina 800 TEX 12K					
	Řezné podmínky					
	Konstantní					
	Procesní médium					
	Ra [μm]	Konfideční interval Ra [μm]	Rt [μm]	Konfideční interval Rt [μm]	Rz [μm]	Konfideční interval Rz [μm]
HSS	6.697	± 0.844	55.259	± 7.961	34.795	± 0.388
HSS-Co	4.435	± 0.854	49.269	± 12.280	26.697	± 3.465
HSS-Co TiN	1.438	± 0.210	20.287	± 3.557	12.182	± 1.929
SK	0.727	± 0.555	11.772	± 10.759	5.254	± 2.461
SK-TiAlN	1.275	± 0.487	19.661	± 7.432	8.410	± 2.691

Tab. 42 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené tkaninou za použití procesního média.



Graf 45 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené tkaninou bez použití procesního média.



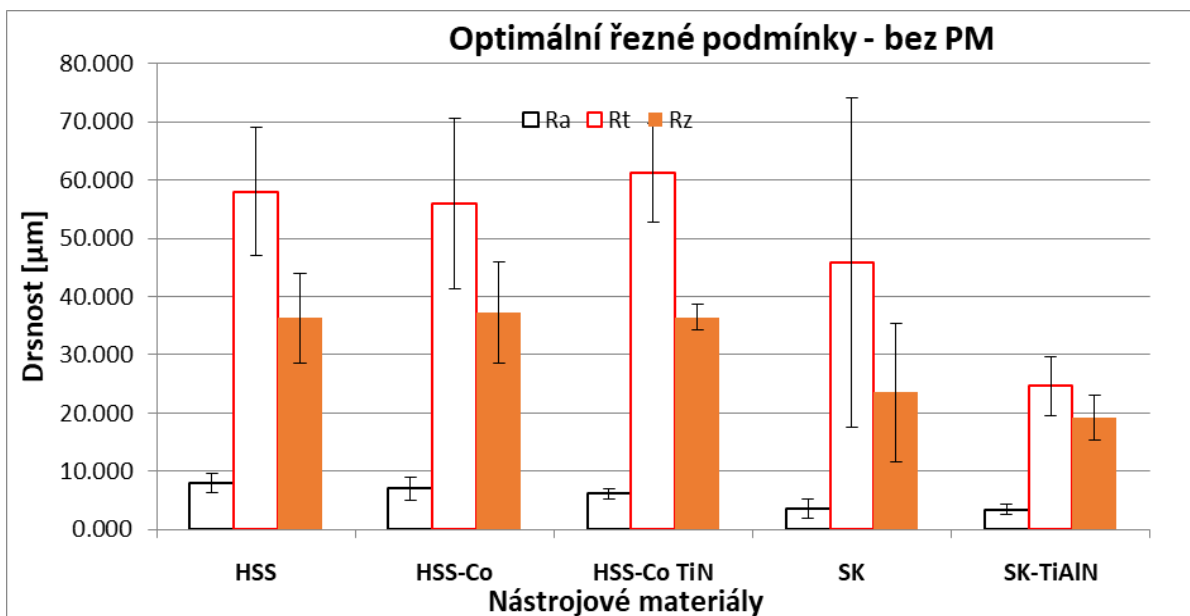
Graf 46 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při vrtání za konstantních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené tkaninou za použití procesního média.

Drsnost						
Nástroj	Epoxidová pryskyřice + tkanina 800 TEX 12K					
	Řezné podmínky					
	Optimální					
	Bez procesního média					
	Ra [μm]	Konfideční interval Ra [μm]	Rt [μm]	Konfideční interval Rt [μm]	Rz [μm]	Konfideční interval Rz [μm]
HSS	7.951	± 1.615	58.053	± 10.992	36.351	± 7.698
HSS-Co	6.995	± 1.990	56.018	± 14.606	37.267	± 8.748
HSS-Co TIN	6.136	± 0.821	61.331	± 8.495	36.463	± 2.131
SK	3.511	± 1.638	45.813	± 28.305	23.516	± 11.845
SK-TiAlN	3.449	± 0.807	24.612	± 5.052	19.134	± 3.867

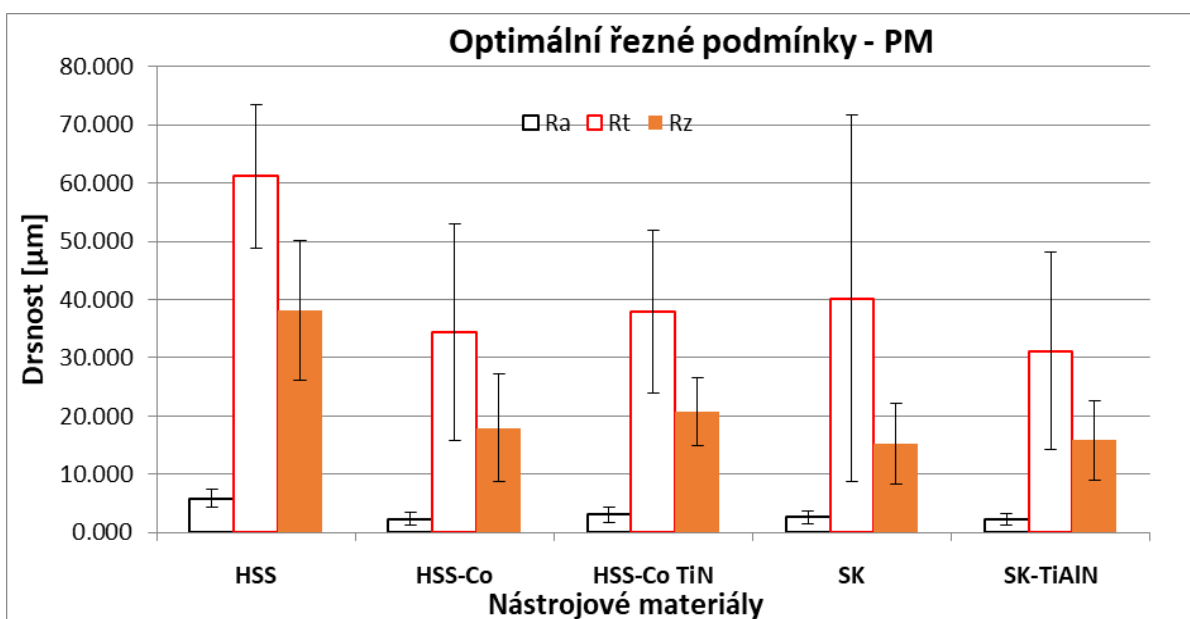
Tab. 43 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při vrtání za optimálních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené tkaninou bez použití procesního média.

Drsnost						
Nástroj	Epoxidová pryskyřice + tkanina 800 TEX 12K					
	Řezné podmínky					
	Optimální					
	Procesní médium					
	Ra [μm]	Konfideční interval Ra [μm]	Rt [μm]	Konfideční interval Rt [μm]	Rz [μm]	Konfideční interval Rz [μm]
HSS	5.834	± 1.512	61.187	± 12.362	38.070	± 12.006
HSS-Co	2.308	± 1.131	34.382	± 18.535	17.930	± 9.247
HSS-Co TIN	3.038	± 1.309	37.837	± 13.961	20.793	± 5.829
SK	2.604	± 1.088	40.185	± 31.520	15.290	± 6.959
SK-TiAlN	2.344	± 0.989	31.117	± 16.969	15.831	± 6.795

Tab. 44 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při vrtání za optimálních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené tkaninou za použití procesního média.



Graf 47 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při vrtání za optimálních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené tkaninou bez použití procesního média.



Graf 48 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při vrtání za optimálních řezných podmínek do epoxidové pryskyřice vyztužené tkaninou za použití procesního média.

Hodnoty $Ra = 0,727 \pm 0,555 \mu\text{m}$, $Rt = 11,772 \pm 10,759 \mu\text{m}$ a $Rz = 5,254 \pm 0,483 \mu\text{m}$, uvedené v tab. a grafu výše, vykazují pokles velikosti měřených hodnot parametrů vzhledem ke kapitole 3.8.1.

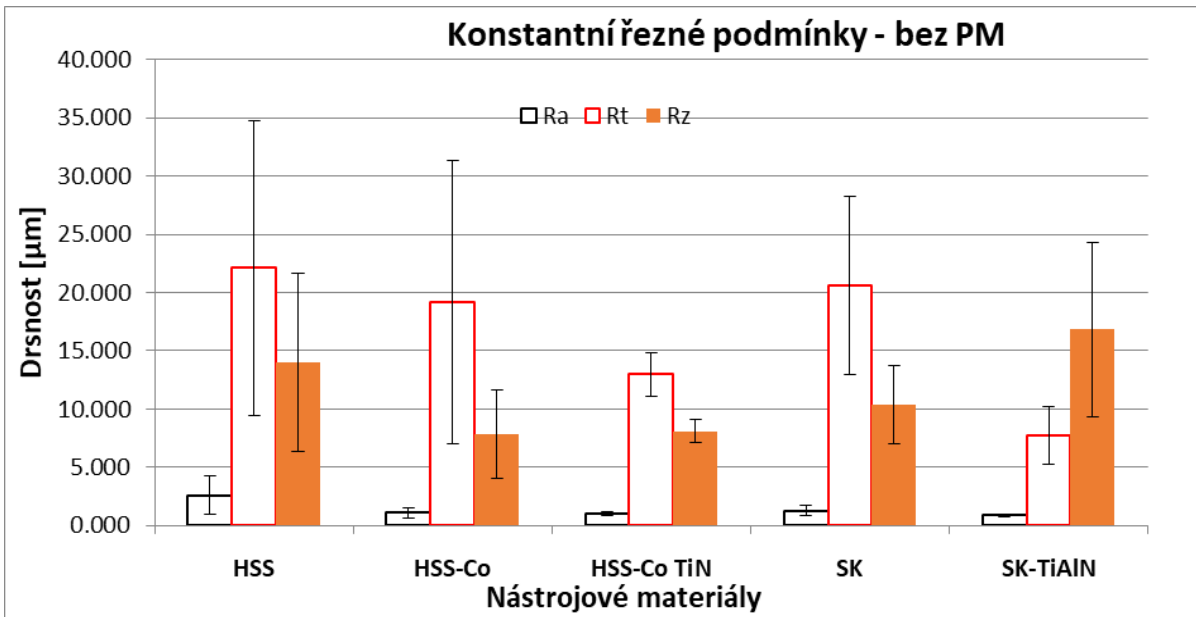
3.8.4. Kompozitní materiál ČVUT

Drsnost						
Nástroj	Kompozitní materiál ČVUT					
	Řezné podmínky					
	Konstantní					
	Bez procesního média					
	Ra [μm]	Konfideční interval Ra [μm]	Rt [μm]	Konfideční interval Rt [μm]	Rz [μm]	Konfideční interval Rz [μm]
HSS	2.588	± 1.649	22.104	± 12.632	14.051	± 7.654
HSS-Co	1.068	± 0.471	19.148	± 12.174	7.804	± 3.818
HSS-Co TiN	1.022	± 0.184	13.007	± 1.867	8.096	± 1.026
SK	1.245	± 0.442	20.588	± 7.685	10.354	± 3.367
SK-TiAlN	0.888	± 0.114	7.735	± 2.492	16.821	± 7.481

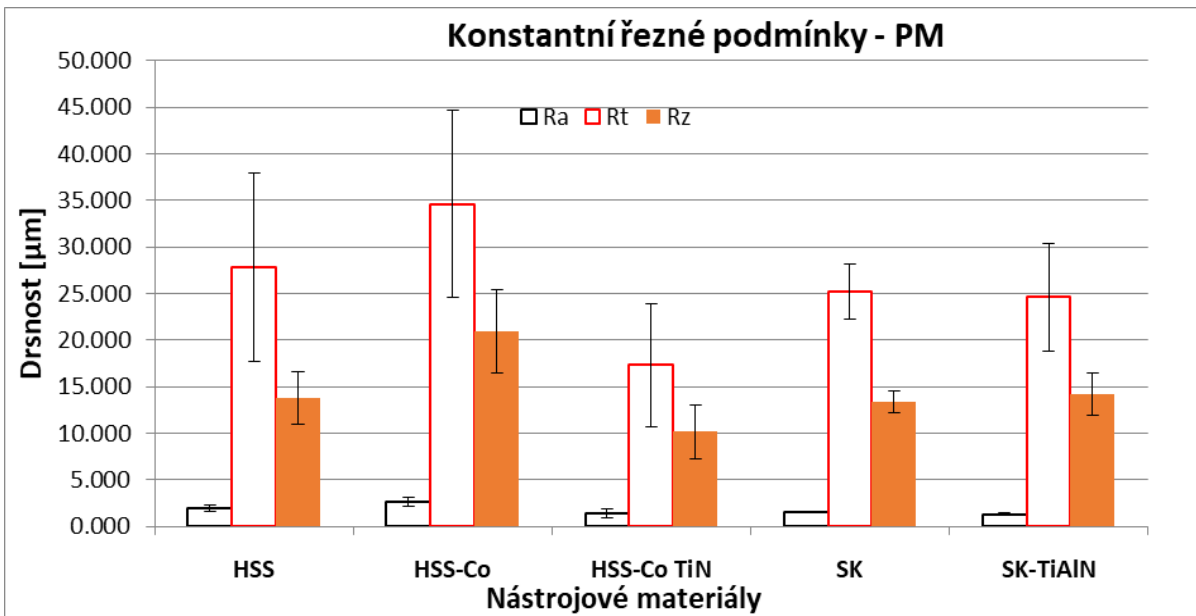
Tab. 45 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při vrtání za konstantních řezných podmínek do kompozitního materiálu ČVUT bez použití procesního média.

Drsnost						
Nástroj	Kompozitní materiál ČVUT					
	Řezné podmínky					
	Konstantní					
	Procesní médium					
	Ra [μm]	Konfideční interval Ra [μm]	Rt [μm]	Konfideční interval Rt [μm]	Rz [μm]	Konfideční interval Rz [μm]
HSS	1.946	± 0.328	27.859	± 10.090	13.749	± 2.804
HSS-Co	2.646	± 0.538	34.624	± 10.014	20.945	± 4.497
HSS-Co TiN	1.402	± 0.435	17.321	± 6.586	10.167	± 2.927
SK	1.540	± 0.067	25.258	± 2.975	13.402	± 1.160
SK-TiAlN	1.321	± 0.188	24.609	± 5.803	14.241	± 2.252

Tab. 46 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při vrtání za konstantních řezných podmínek do kompozitního materiálu ČVUT za použití procesního média.



Graf 49 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při vrtání za konstantních řezných podmínek do kompozitního materiálu ČVUT bez použití procesního média.



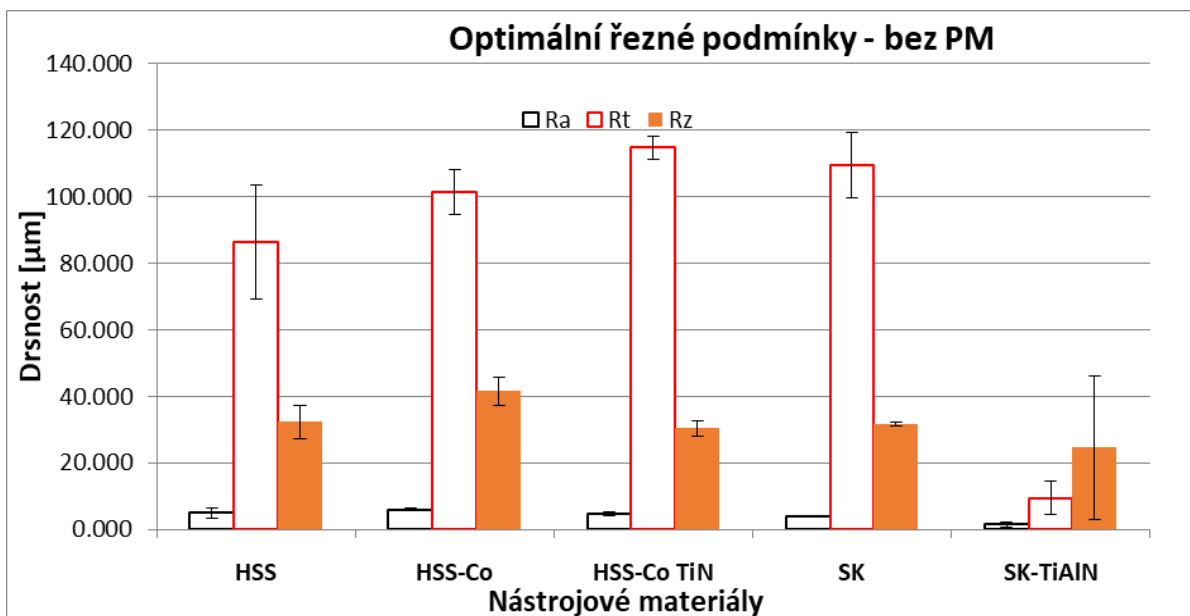
Graf 50 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při vrtání za konstantních řezných podmínek do kompozitního materiálu ČVUT za použití procesního média.

Drsnost						
Nástroj	Kompozitní materiál ČVUT					
	Řezné podmínky					
	Optimální					
	Bez procesního média					
	Ra [μm]	Konfideční interval Ra [μm]	Rt [μm]	Konfideční interval Rt [μm]	Rz [μm]	Konfideční interval Rz [μm]
HSS	4.907	± 1.454	86.499	± 17.216	32.283	± 4.924
HSS-Co	6.022	± 0.449	101.412	± 6.763	41.641	± 4.211
HSS-Co TiN	4.583	± 0.547	114.785	± 3.415	30.451	± 2.269
SK	3.806	± 0.179	109.519	± 9.667	31.623	± 0.522
SK-TiAlN	1.578	± 0.794	9.410	± 5.020	24.632	± 21.477

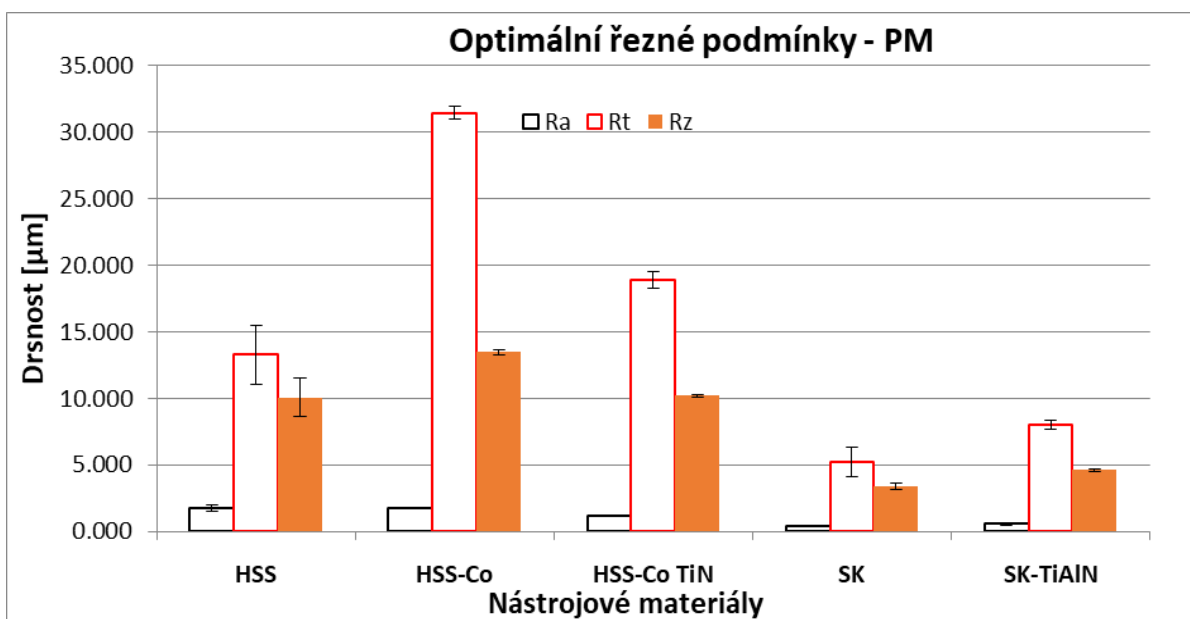
Tab. 47 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při vrtání za optimálních řezných podmínek do kompozitního materiálu ČVUT bez použití procesního média.

Drsnost						
Nástroj	Kompozitní materiál ČVUT					
	Řezné podmínky					
	Optimální					
	Procesní médium					
	Ra [μm]	Konfideční interval Ra [μm]	Rt [μm]	Konfideční interval Rt [μm]	Rz [μm]	Konfideční interval Rz [μm]
HSS	1.742	± 0.255	13.288	± 2.219	10.066	± 1.458
HSS-Co	1.713	± 0.054	31.453	± 0.492	13.477	± 0.171
HSS-Co TiN	1.158	± 0.037	18.908	± 0.647	10.186	± 0.077
SK	0.427	± 0.040	5.221	± 1.065	3.356	± 0.239
SK-TiAlN	0.562	± 0.006	7.983	± 0.352	4.614	± 0.070

Tab. 48 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při vrtání za optimálních řezných podmínek do kompozitního materiálu ČVUT za použití procesního média.



Graf 51 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při vrtání za optimálních řezných podmínek do kompozitního materiálu ČVUT bez použití procesního média.



Graf 52 – Naměřené hodnoty parametrů drsnosti při vrtání za optimálních řezných podmínek do kompozitního materiálu ČVUT za použití procesního média.

Velmi výrazný pokles měřených hodnot jako v kapitole 3.8.3 vykazují optimální řezné podmínky s využitím procesní kapaliny a při obrábění nástrojem z SK. Při těchto podmínkách a nástrojovém materiálu bylo dosaženo minimálních hodnot drsností $Ra = 0,427 \pm 0,040 \mu\text{m}$, $Rt = 5,221 \pm 1,065 \mu\text{m}$ $Rz = 3,356 \pm 0,239 \mu\text{m}$.

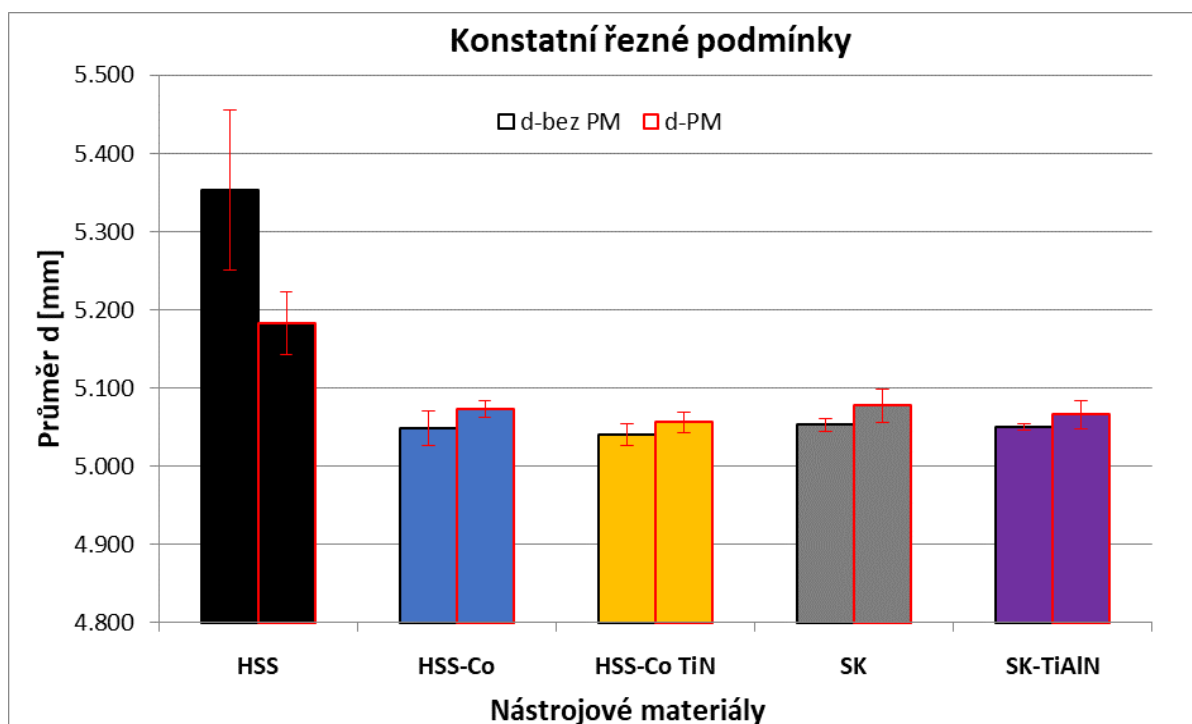
3.9. Vyhodnocení rozměrové stability

Tato kapitola obsahuje výsledky z měření rozměrové stability při stanovených řezných podmínkách, viz tab. 3 kap. 3.3

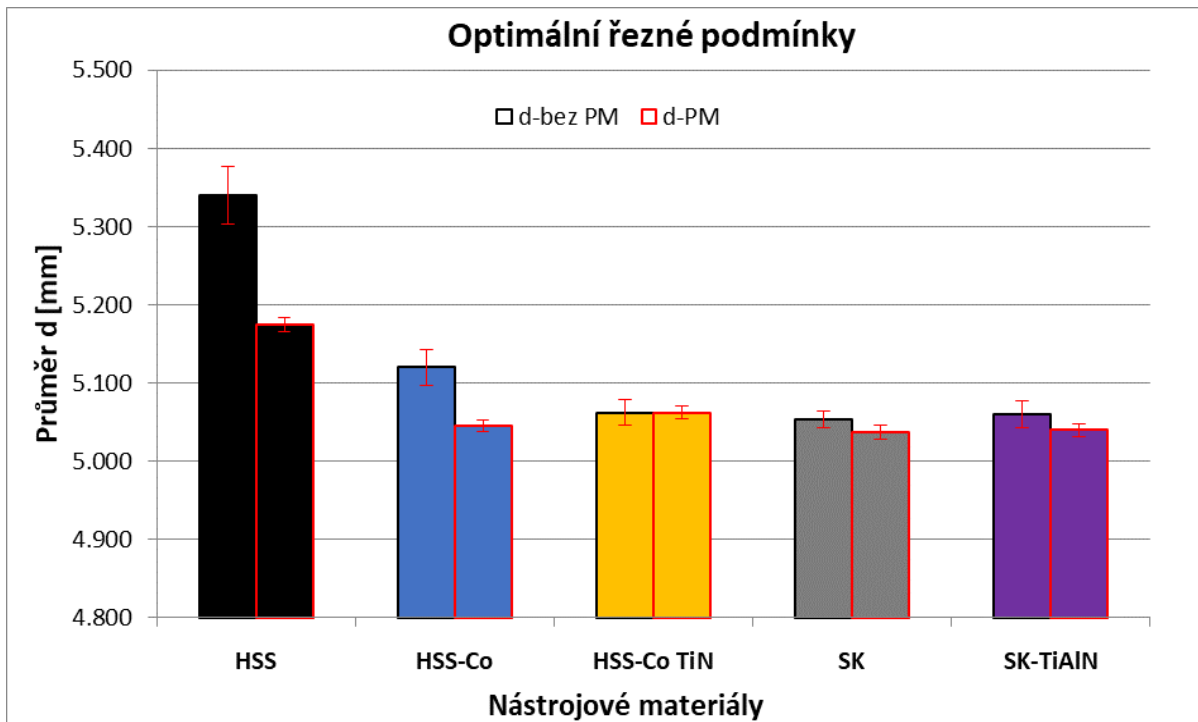
3.9.1. Čistá epoxidová pryskyřice

Rozměrová stabilita								
Nástroj	Čistá epoxidová pryskyřice							
	Řezné podmínky							
	Konstantní				Optimální			
	Bez procesního média		Procesní médium		Bez procesního média		Procesní médium	
	d [mm]	Konfideční interval d [mm]	d [mm]	Konfideční interval d [mm]	d [mm]	Konfideční interval d [mm]	d [mm]	Konfideční interval d [mm]
HSS	5.354	± 0.102	5.183	± 0.040	5.340	± 0.037	5.174	± 0.009
HSS-Co	5.049	± 0.022	5.073	± 0.010	5.120	± 0.023	5.046	± 0.007
HSS-Co TiN	5.041	± 0.014	5.057	± 0.013	5.062	± 0.016	5.062	± 0.008
SK	5.053	± 0.008	5.078	± 0.021	5.053	± 0.011	5.037	± 0.009
SK-TiAlN	5.050	± 0.004	5.067	± 0.018	5.060	± 0.017	5.040	± 0.008

Tab. 49 – Naměřené hodnoty průměrů při vrtání do čisté epoxidové pryskyřice.



Graf 53 – Naměřené hodnoty průměrů při vrtání do čisté epoxidové pryskyřice - konstantní řezné podmínky.



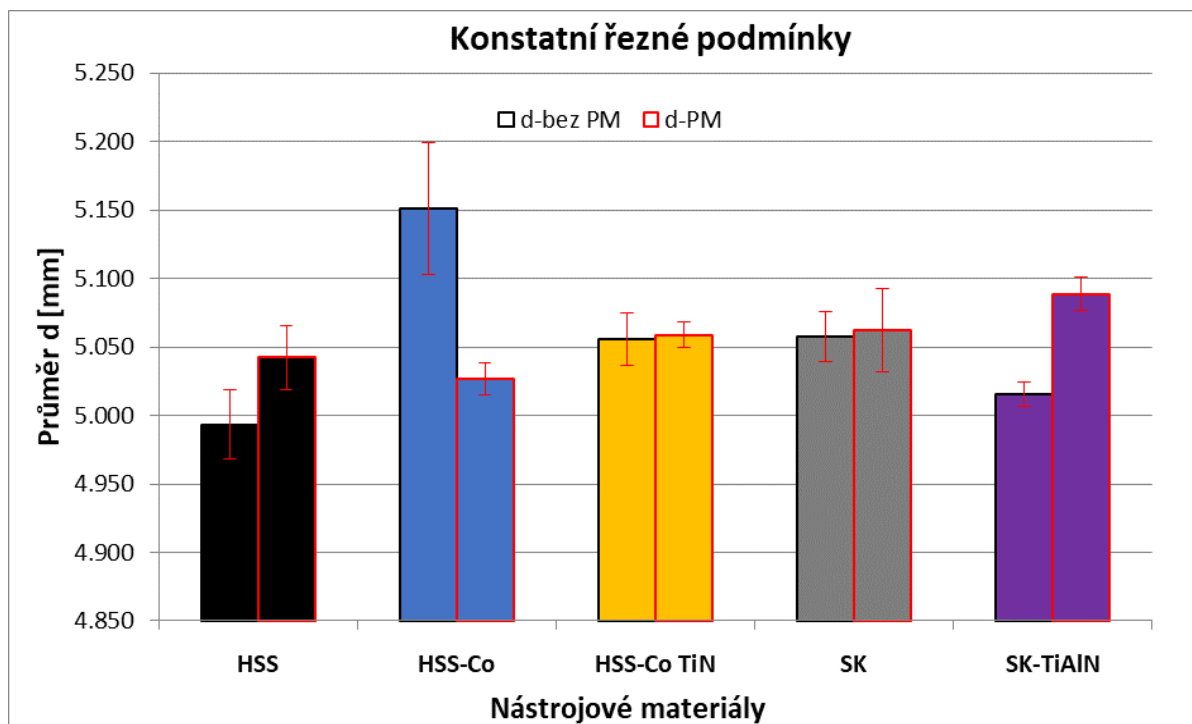
Graf 54 – Naměřené hodnoty průměrů při vrtání do čisté epoxidové pryskyřice- optimální řezné podmínky.

Z grafů 53, 54 a tab. 49 vyplývá, že nejlepší rozměrové stability bylo dosaženo nástroji z HSS-Co a HSS-Co TiN a SK-TiAlN. Nejlepší velikosti průměrů jsou $5,041 \pm 0,014$ mm a $5,049 \pm 0,022$ mm. Obdobných výsledků bylo dosaženo i po obrobení vzorku nástroji z SK a SK-TiAlN.

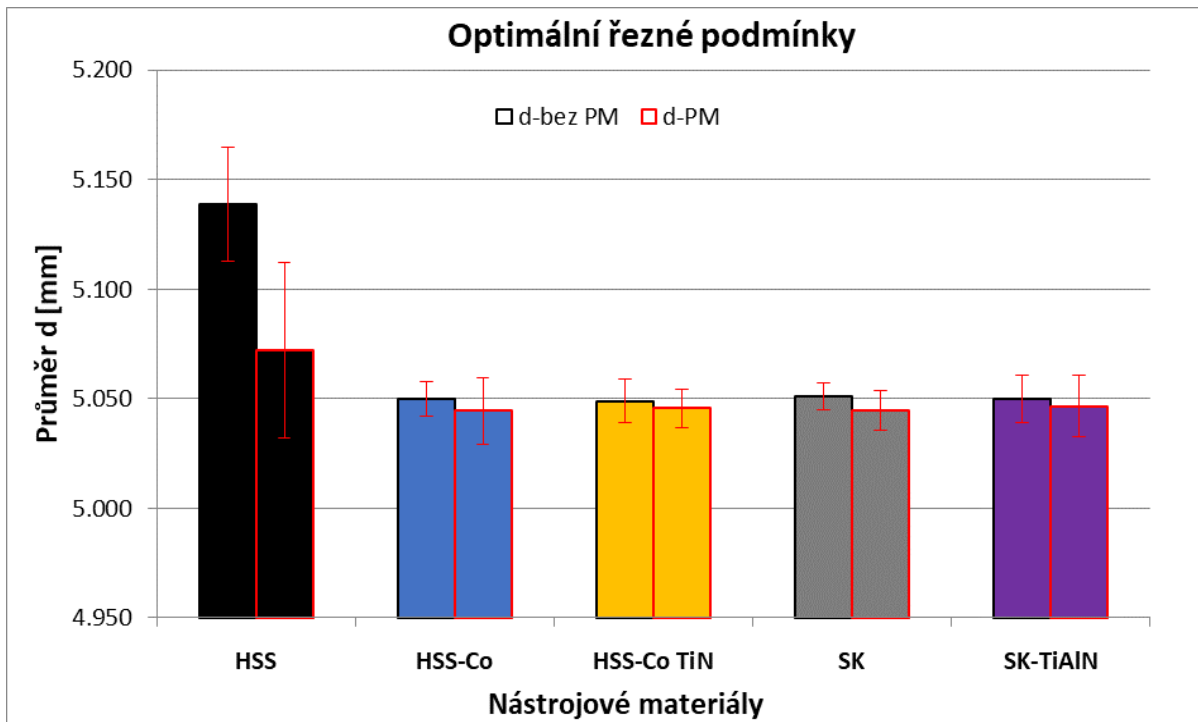
3.9.2. Epoxidová pryskyřice + roving 3700 TEX 50K

Rozměrová stabilita								
Nástroj	Epoxidová pryskyřice + roving 3700 TEX 50K							
	Řezné podmínky							
	Konstantní				Optimální			
	Bez procesního média		Procesní médium		Bez procesního média		Procesní médium	
	d [mm]	Konfideční interval d [mm]	d [mm]	Konfideční interval d [mm]	d [mm]	Konfideční interval d [mm]	d [mm]	Konfideční interval d [mm]
HSS	4.993	± 0.025	5.042	± 0.023	5.139	± 0.026	5.072	± 0.040
HSS-Co	5.151	± 0.048	5.027	± 0.012	5.050	± 0.008	5.044	± 0.015
HSS-Co TiN	5.056	± 0.019	5.059	± 0.009	5.049	± 0.010	5.046	± 0.009
SK	5.058	± 0.018	5.062	± 0.030	5.051	± 0.006	5.044	± 0.009
SK-TiAlN	5.016	± 0.009	5.089	± 0.012	5.050	± 0.011	5.047	± 0.014

Tab. 50 – Naměřené hodnoty průměrů při vrtání do epoxidové pryskyřice vyztužené vlákny.



Graf 55 – Naměřené hodnoty průměrů při vrtání do epoxidové pryskyřice vyztužené vlákny-konstantní řezné podmínky.



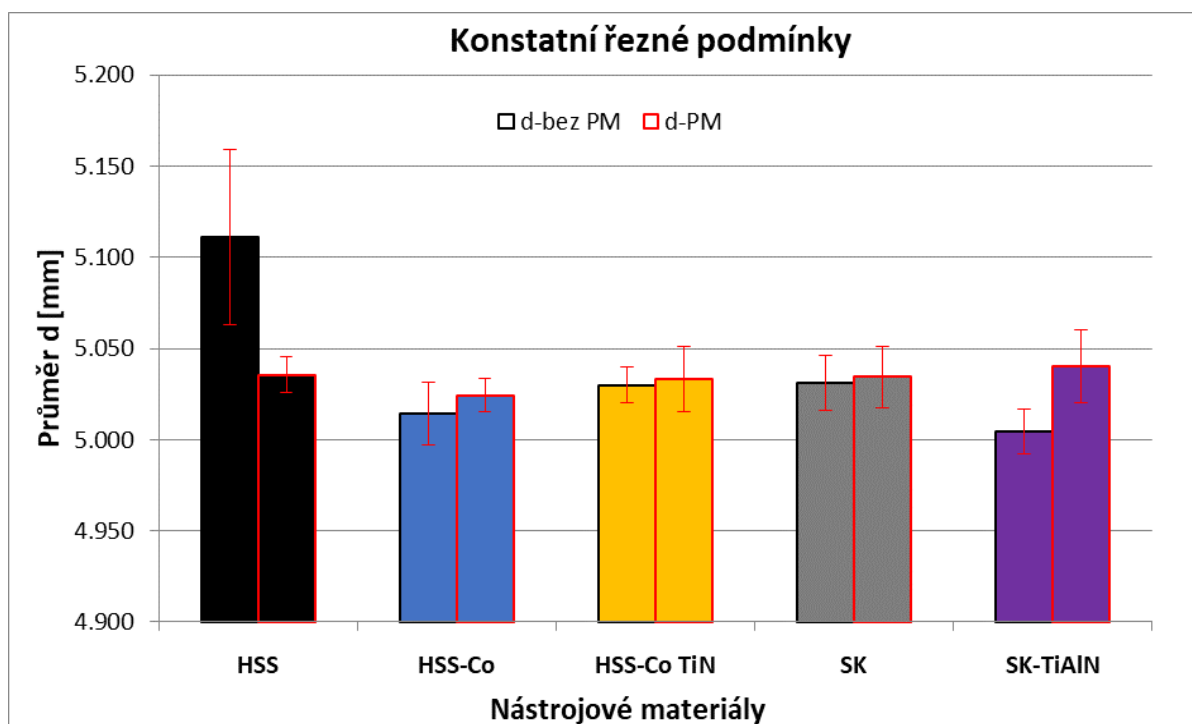
Graf 56 – Naměřené hodnoty průměrů při vrtání do epoxidové pryskyřice vyztužené vlákny-optimální řezné podmínky.

Z tab. 50 a následujícího grafu 55 rozměrové stability, při obrábění za konstantních řezných podmínek a bez procesní kapaliny, je zřejmé, že nejhorší přesnosti bylo dosaženo při použití nástroje z HSS-Co. Nejvyšší hodnota změřeného průměru činila $5,151 \pm 0,048$ mm. Podobné hodnoty bylo dosaženo při vrtání pomocí nástroje z HSS za optimálních řezných podmínek bez využití procesní kapaliny.

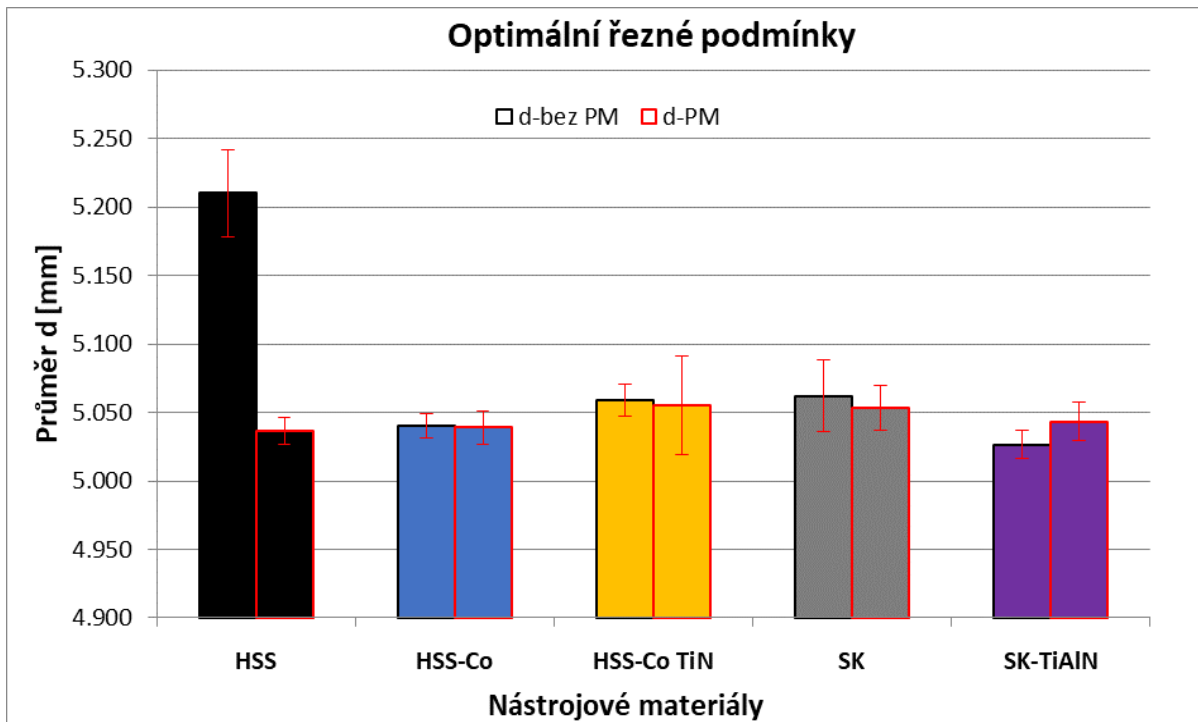
3.9.3. Epoxidová pryskyřice + tkanina 800 TEX 12K

Rozměrová stabilita								
Nástroj	Epoxidová pryskyřice + tkanina 800 TEX 12K							
	Řezné podmínky							
	Konstantní				Optimální			
	Bez procesního média		Procesní médium		Bez procesního média		Procesní médium	
	d [mm]	Konfideční interval d [mm]	d [mm]	Konfideční interval d [mm]	d [mm]	Konfideční interval d [mm]	d [mm]	Konfideční interval d [mm]
HSS	5.111	± 0.048	5.036	± 0.010	5.210	± 0.032	5.037	± 0.010
HSS-Co	5.014	± 0.017	5.024	± 0.009	5.040	± 0.009	5.039	± 0.012
HSS-Co TiN	5.030	± 0.010	5.033	± 0.018	5.059	± 0.012	5.056	± 4.361
SK	5.031	± 0.015	5.034	± 0.017	5.062	± 0.258	5.053	± 0.016
SK-TiAlN	5.004	± 0.012	5.040	± 0.020	5.027	± 0.010	5.043	± 0.014

Tab. 51 – Naměřené hodnoty průměrů při vrtání do epoxidové pryskyřice vyztužené tkaninou.



Graf 57 – Naměřené hodnoty průměrů při vrtání do epoxidové pryskyřice vyztužené tkaninou-konstantní řezné podmínky.



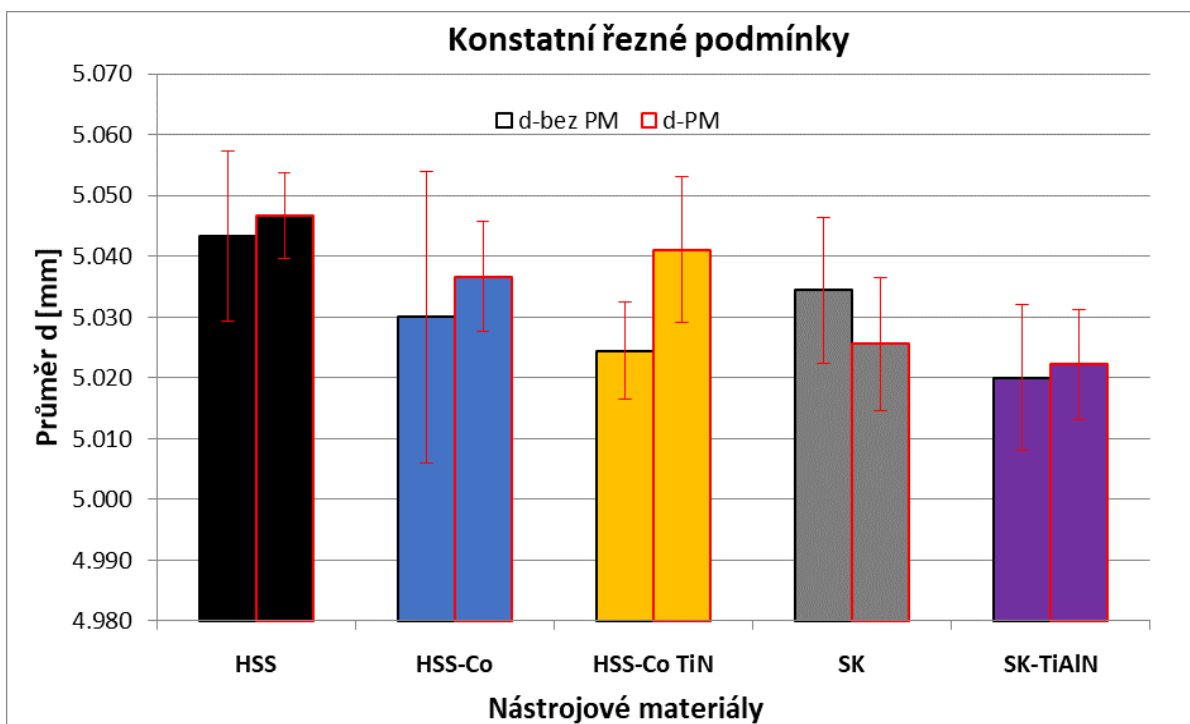
Graf 58 – Naměřené hodnoty průměrů při vrtání do epoxidové pryskyřice vyztužené tkaninou-optimální řezné podmínky.

Nejnižší hodnoty změřeného průměru, $5,004 \pm 0,012$ mm, viz tab. 51, bylo dosaženo při vrtání nástrojem z materiálu SK-TiAlN za konstantních řezných podmínek bez použití procesní kapaliny. Naopak nejhorších výsledků bylo dosaženo při vrtání nástrojem z HSS, viz tab. 51 a graf 58. Nejhorší naměřenou hodnotou je $5,210 \pm 0,032$ mm.

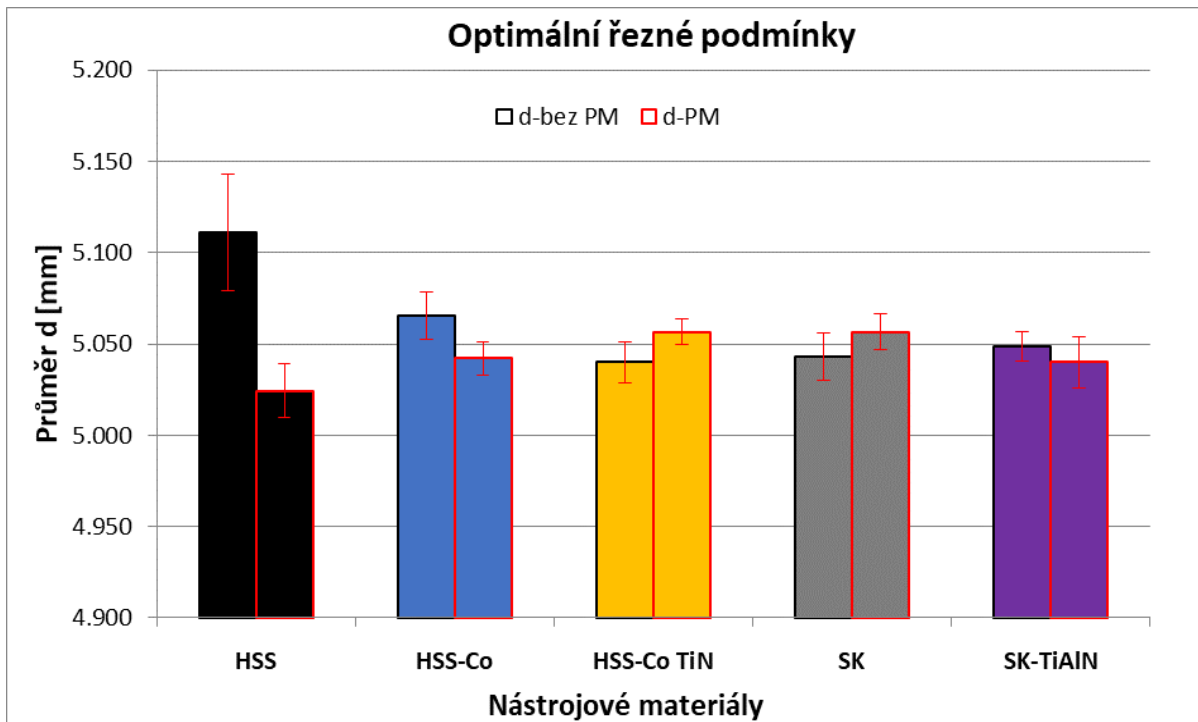
3.9.4. Kompozitní materiál ČVUT

Rozměrová stabilita								
Nástroj	Kompozitní materiál ČVUT							
	Řezné podmínky							
	Konstantní				Optimální			
	Bez procesního média		Procesní médium		Bez procesního média		Procesní médium	
	d [mm]	Konfideční interval d [mm]	d [mm]	Konfideční interval d [mm]	d [mm]	Konfideční interval d [mm]	d [mm]	Konfideční interval d [mm]
HSS	5.043	± 0.014	5.047	± 0.007	5.111	± 0.032	5.024	± 0.015
HSS-Co	5.030	± 0.024	5.037	± 0.009	5.066	± 0.013	5.042	± 0.009
HSS-Co TiN	5.024	± 0.008	5.041	± 0.012	5.040	± 0.011	5.057	± 0.007
SK	5.034	± 0.012	5.026	± 0.011	5.043	± 0.013	5.057	± 0.010
SK-TiAlN	5.020	± 0.012	5.022	± 0.009	5.049	± 0.008	5.040	± 0.014

Tab. 52 – Naměřené hodnoty průměrů při vrtání do kompozitního materiálu ČVUT.



Graf 59 – Naměřené hodnoty průměrů při vrtání do kompozitního materiálu ČVUT- konstantní řezné podmínky.



Graf 60 – Naměřené hodnoty průměrů při vrtání do kompozitního materiálu ČVUT- optimální řezné podmínky.

Při vrtání do kompozitního materiálu ČVUT bylo dosaženo nejhorších hodnot měřeného průměru po obrábění nástrojem z HSS. Nejhorší hodnotou je $5,111 \pm 0,032$ mm. Obráběním za konstantních řezných podmínek, bez procesní kapaliny a pomocí nástroje z SK-TiAlN bylo docíleno nejlepší hodnoty měřeného průměru, $5,020 \pm 0,012$ mm.

3.10. Tvorba třísky

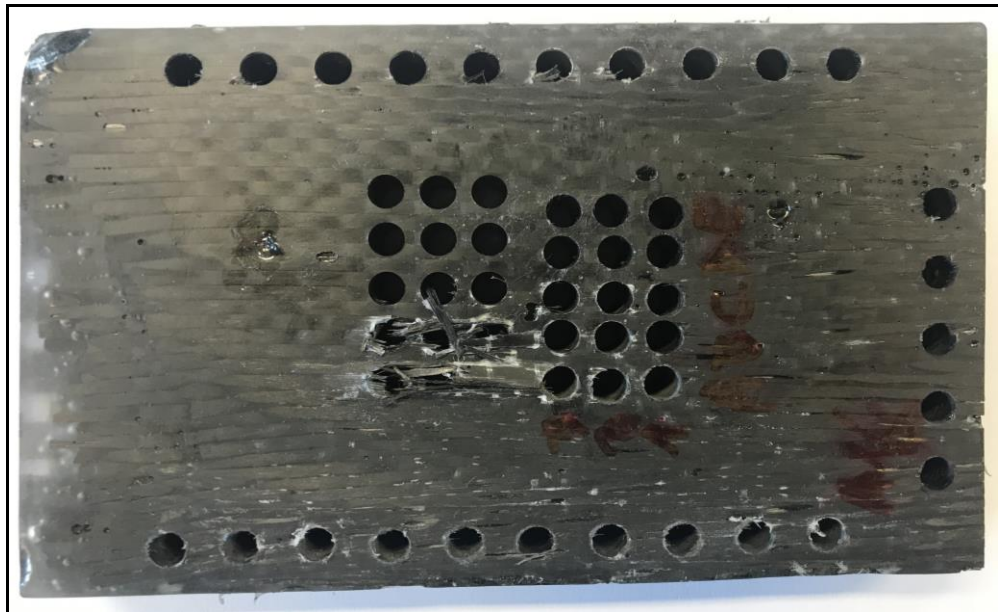
Pro experiment byly použity konstantní a optimální řezné podmínky, dle tab. 3, kap. 3.3, bez využití procesní kapaliny. Byl sledován proces tvorby třísky při procesu všech vzorků – čistá epoxidová pryskyřice, epoxidová pryskyřice + roving 3700 TEX 50K, epoxidová pryskyřice + tkanina 800 TEX 12K a kompozitní materiál ČVUT s použitím všech řezných nástrojů – HSS, HSS-Co, HSS-Co TiN, SK a SK-TiAlN. Jednotlivé fotografie vzniklých druhů třísek jsou uvedeny v příloze č.1.



Obr. 22 – Pracoviště při procesu obrábění a vzniklé třísky.

3.11. Integrita povrchu

Na celkovou integritu povrchu (vznik delaminace) měl zásadní vliv parametr opotřebení nástroje a samotný použitý řezný materiál charakteristický svými mechanickými vlastnostmi. Největší míra delaminovaných vrstev je patrná u vzorků, které byly obráběny pomocí nástrojů z HSS a HSS-Co. U těchto nástrojů docházelo u materiálu s vyztužujícími prvky k výrazné delaminaci jak u místa výstupu nástroje, tak i u místa jeho vstupu.



Obr. 23 – Vzorek kompozitního materiálu ČVUT s patrnou delaminací na vstupu i výstupu nástroje ze vzorku.

4. Diskuze

Hlavním cílem předkládané práce bylo zjištění sil při obrábění, teplot, opotřebení řezného nástroje, drsnosti povrchu, rozměrové stability obráběného materiálu tvorby třísky a celkové integrity obrobeného povrchu při vrtání do kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými vlákny.

Pro dosažení cíle diplomové práce bylo nutné stanovit vhodné řezné podmínky a následně metodiku pro měření výstupních hodnot na daných použitých přístrojích.

Základní informace týkající se dané problematiky vrtání do kompozitních materiálů jsou uvedeny v kapitole 2. Kapitola obsahuje informace o dosavadních poznatcích týkající se kompozitních materiálů, viz kap. 2.5. Dále udává informace o problematice obrábění kompozitních materiálů, kap. 2.1. Nedílnou součástí předkládané práce jsou také informace o řezných nástrojích, viz kap. 2.2, a technologii vrtání, viz kap. 2.4.

Dosažení požadovaného cíle práce je věnována celá kapitola 3. Kapitola obsahuje veškeré informace o jednotlivých etapách přípravy, popisu podmínek a použitých zařízení pro měření.

Z rozsáhlého souboru měření a získaných výsledků lze poukázat na následující:

- **Krouticí momenty a řezné síly při vrtání**

Krouticí momenty a řezné síly byly měřeny elektrickým odporovým dynamometrem, viz. kap. 3.2.5. Základní princip měření a zpracování je uveden v kap. 3.4.5. Naměřené hodnoty zpracované softwarem Kromos byly následně vyhodnoceny v prostředí softwaru Excel.

Nejmenší krouticí moment při vrtání za konstantních řezných podmínek byl naměřen u vzorku z čisté epoxidové pryskyřice při obrábění nástrojem z SK-TiAlN, hodnota krouticího momentu je $0,014 \pm 0,032$ N.m.

Nejmenší řezná síla při vrtání za konstantních řezných podmínek byla naměřena u kompozitního materiálu ČVUT při obrábění nástrojem z SK. Nejmenší hodnotou je 46 ± 42 N.

Největší krouticí moment při vrtání za konstantních řezných podmínek byl naměřen u vzorku s vláknovou výztuží při obrábění nástrojem z HSS, hodnota činí $2,305 \pm 0,108$ N.m.

Nejhorší řezné síly $F = 946 \pm 361$ N bylo dosaženo při konstantních řezných podmínkách a použití procesního média. Nejhorší hodnota řezné síly byla naměřena při vrtání do kompozitního materiálu ČVUT pomocí nástroje z HSS.

Nejmenší krouticí moment při vrtání za optimálních řezných podmínek byl naměřen u vzorku vyztuženého uhlíkovými vlákny při obrábění nástrojem z SK, nejnižší naměřená hodnota činí $0,220 \pm 1,146$ N.m.

Nejmenší řezné síly $F = 24 \pm 17$ N bylo dosaženo při nastavených optimálních řezných podmínkách se současným využitím řezné kapaliny a obrábění čisté epoxidové pryskyřice pomocí nástroje z HSS-Co TiN.

Největší krouticí moment při vrtání za optimálních řezných podmínek byl naměřen u vzorku z čisté epoxidové pryskyřice při obrábění nástrojem z HSS, hodnota krouticího momentu činí $1,781 \pm 0,262$ N.m.

Největší řezná síla při vrtání za optimálních řezných podmínek byla naměřena u vzorku z kompozitního materiálu ČVUT při obrábění nástrojem z HSS. Naměřená hodnota činí 689 ± 324 N.m.

- **Teplota při obrábění**

Pro měření teplot při procesu vrtání bylo využito umělých termočlánků typu K. Tyto termočlánky snímají teploty v rozsahu od -270 °C do 1372 °C (materiály vodičů Ni-Cr (+) a Ni-Al (-)). Měření probíhalo za řezných podmínek viz tab. 4. Experiment byl proveden za použití všech nástrojových materiálů, viz kap. 3.2.4.

Teplota $24,60 \pm 0,58$ je nejnižší naměřenou hodnotou zkoumaného parametru teploty. Této nejnižší hodnoty bylo dosaženo při vrtání do čisté epoxidové pryskyřice nástrojem z HSS za použití řezné kapaliny.

Nejvyšší teplota při procesu vrtání byla zaznamenána u vzorku z kompozitního materiálu ČVUT. Tento vzorek byl obráběn za konstantních řezných podmínek bez řezné kapaliny nástrojem z materiálu HSS-Co. Nejvyšší naměřenou hodnotou je $54,00 \pm 6,19$ °C.

- **Opotřebení nástrojů**

Měření velikosti opotřebení bylo provedeno pomocí dílenského mikroskopu ZEISS, viz kap. 3.2.7. Měření bylo prováděno dle metodiky uvedené v kap. 3.4.7. Opotřebení bylo měření pro každý nástrojový materiál a výsledky zpracovány do přehledných tabulek a grafů, viz kap. 3.7.

Nejnižší hodnoty opotřebení na konci experimentu byly dosaženy při obrábění čisté epoxidové pryskyřice a kompozitu s vláknovou výztuží nástrojem zhotoveného z SK. Konečná hodnota opotřebení vedlejších ostří nástrojů činila $0,0210$ μm . Obdobných hodnot bylo dosaženo i při vrtání pomocí nástroje z SK-TiAlN do čisté epoxidové pryskyřice.

Na hlavním ostří nástroje z HSS po vrtání do kompozitního materiálu ČVUT bez využití řezné kapaliny bylo naměřeno největší opotřebení nástroje ze všech provedených experimentů. Výsledná hodnota opotřebení činila $0,8750$ μm .

- **Drsnost obrobených otvorů**

Drsnost obrobených polotovaru byla v rámci experimentu měřena profilometrem Mitutoyo SurfTest SV-2000N2, viz kapitola 3.2.6., který využívá dotykovou metodu pro měření drsnosti. Naměřená data byla vyhodnocena v prostředí Excel a zanesena do přehledných grafů.

Měřenými parametry byly drsnosti R_a , R_t a R_z . Z měřených parametrů drsnosti byl vybrán k bližšímu vyhodnocení parametr R_a , jelikož se jedná o nejčastěji užívaný parametr drsnosti v České republice.

Při vrtání za konstantních podmínek s využitím řezné kapaliny byla naměřena nejmenší hodnota drsnosti $R_a = 0,720 \pm 0,296$ μm . Hodnoty bylo dosaženo u vzorku s vláknovou výztuží při použití nástroje z HSS-Co.

Při vrtání za konstantních podmínek s procesním médiem byla naměřena největší hodnota drsnosti $R_a = 6,697 \pm 0,844 \mu\text{m}$ u vzorku epoxidová pryskyřice + tkanina 800 TEX 12K. Vzorek byl za těchto podmínek obráběn nástrojem z HSS.

Nejmenší drsnost $R_a = 0,427 \pm 0,040 \mu\text{m}$ byla naměřena při optimálních řezných podmínkách s aplikací procesního média. Za těchto podmínek byl aplikován nástroj z SK na vzorek z kompozitního materiálu ČVUT.

Největší drsnost $R_a = 8,221 \pm 1,831 \mu\text{m}$ byla naměřena po obrábění nástrojem z HSS-Co vzorku z čisté epoxidové pryskyřice. Proces vrtání probíhal za optimálních řezných podmínek bez aplikace řezné kapaliny.

- **Rozměrová stabilita**

Dle řezných podmínek viz. tab. 3 byly zhotoveny pro každý řezný nástroj 3 otvory a každý z nich byl proměřen. Z naměřených hodnot průměru děr byla vypočtena průměrná hodnota se statistickým intervalem spolehlivosti měření.

Nejnižší naměřenou hodnotou otvoru obrobeného za konstantních řezných podmínek je $4,993 \pm 0,025 \text{ mm}$. Hodnoty bylo dosaženo u vzorku s vláknovou výztuží při použití nástroje z HSS a bez využití řezné kapaliny.

Nejvyšší naměřenou hodnotou otvoru obrobeného za konstantních podmínek je $5,354 \pm 0,102 \text{ mm}$. Hodnoty bylo dosaženo u čisté epoxidové pryskyřice při použití nástroje z HSS a bez využití řezné kapaliny.

Nejnižší naměřenou hodnotou otvoru obrobeného za optimálních řezných podmínek je $5,024 \pm 0,015 \text{ mm}$. Hodnoty bylo dosaženo u kompozitního materiálu ČVUT při použití nástroje z HSS a řezné kapaliny.

Nejvyšší naměřenou hodnotou otvoru obrobeného za optimálních podmínek je $5,340 \pm 0,037 \text{ mm}$. Hodnoty bylo dosaženo u čisté epoxidové pryskyřice při použití nástroje z HSS a bez využití řezné kapaliny.

5. Závěr

Předložená diplomová práce na téma Problematika vrtání do kompozitních materiálů přispívá k rozšíření poznatků o obrábění těchto materiálů se specifickými vlastnostmi. Práce byla členěna do dvou hlavních částí.

V teoretické části byla věnována pozornost technologii vrtání, řezným materiálům a nástrojům, kompozitním materiálům a v neposlední řadě problematice jejich obrábění.

Experimentální část se zabývá metodikou experimentu a jeho provedení. V metodice byly popsány stroje, nástroje, měřicí přístroje a měřené parametry. Následně je věnována pozornost samotnému experimentu, vyhodnocení naměřených hodnot a zpracování výstupů do přehledných tabulek a grafů.

Nedílnou součástí předkládané diplomové práce je diskuze a závěr.

Z rozsáhlého souboru měření a získaných výsledků uvedených v podkapitolách 3.5 až 3.9 je možno poukázat na následující:

1. Nejmenšího krouticího momentu bylo dosaženo při obrábění vzorku z čisté epoxidové pryskyřice pomocí nástroje z materiálu SK-TiAlN za konstantních podmínek bez použití procesního média. Hodnota nejmenšího krouticího momentu činí $0,014 \pm 0,032$ N.m.
2. Naopak největší krouticí moment byl naměřen při vrtání nástrojem z HSS do vzorku vyztuženého uhlíkovými vlákny. Maximální hodnota naměřeného krouticího momentu při obrábění dosahuje hodnoty $2,305 \pm 0,108$ N.m.
3. Nejlepší řezné síly $F = 24 \pm 17$ N bylo dosaženo při nastavených optimálních řezných podmínkách se současným využitím řezné kapaliny a obrábění čisté epoxidové pryskyřice pomocí nástroje z HSS-Co TiN.

4. Nejhorší řezné síly $F = 946 \pm 361$ N bylo dosaženo při konstantních řezných podmínkách a použití procesního média. Nejhorší hodnota řezné síly byla naměřena při vrtání do kompozitního materiálu ČVUT pomocí nástroje z HSS.
5. Nejvyšší teplota při procesu vrtání byla zaznamenána u vzorku z kompozitního materiálu ČVUT. Tento vzorek byl obráběn za konstantních řezných podmínek bez řezné kapaliny nástrojem z materiálu HSS-Co. Nejvyšší naměřenou hodnotou je $54,00 \pm 6,19$ °C.
6. Teplota $24,60 \pm 0,58$ je nejnižší naměřenou hodnotou zkoumaného parametru teploty. Této nejnižší hodnoty bylo dosaženo při vrtání do čisté epoxidové pryskyřice nástrojem z HSS za použití řezné kapaliny.
7. Nejnižších hodnot opotřebení bylo dosaženo při obrábění čisté epoxidové pryskyřice a kompozitu s vláknovou výztuží nástrojem zhotoveného z SK. Hodnota opotřebení činí $0,0210$ μm a byla naměřena na vedlejším ostří nástroje z SK po obrábění za konstantních řezných podmínek a bez použití řezné kapaliny.
8. Hodnota opotřebení $0,8750$ μm je tou nejvyšší naměřenou hodnotou opotřebení ze všech experimentů. Tato hodnota byla naměřena u nástroje z HSS na hlavním ostří po obrábění kompozitního materiálu ČVUT bez použití řezné kapaliny a za konstantních řezných podmínek.
9. Nejmenší drsnost $R_a = 0,427 \pm 0,040$ μm byla naměřena při optimálních řezných podmínkách s aplikací procesního média. Za těchto podmínek byl aplikován nástroj z SK na vzorek z kompozitního materiálu ČVUT.
10. Největší drsnost $R_a = 8,221 \pm 1,831$ μm byla naměřena po obrábění nástrojem z HSS-Co vzorku z čisté epoxidové pryskyřice. Proces vrtání probíhal za optimálních řezných podmínek bez aplikace řezné kapaliny.
11. Nejmenší naměřenou hodnotou obrobeného průměru otvoru je $4,993 \pm 0,025$ mm. Tato hodnota byla změřena na vzorku z epoxidové pryskyřice + rovingu 3700 TEX 50K po vrtání nástrojem z HSS za konstantních řezných podmínek bez využití řezné kapaliny.

12. Naměřená hodnota $5,354 \pm 0,102$ je nejvyšší naměřenou hodnotou průměru obrobeného otvoru ze všech zkoumaných vzorků. Tato hodnota byla změřena na vzorku z čisté epoxidové pryskyřice po obrábění nástrojem z HSS za konstantních podmínek bez aplikace procesního média.
13. Při procesu vrtání docházelo k tvorbě různých druhů třísek v závislosti na použitých řezných podmínkách, řezných materiálech a na materiálech obráběných vzorků. Vzorek zhotovený z epoxidové pryskyřice bez výztuhy se vyznačoval dlouhou vinutou třískou. S narůstajícím podílem výztužných prvků, vláken či tkaniny, docházelo k transformaci dlouhé vinuté třísky na elementární až na jemný prach (vzorek kompozitní materiál ČVUT).
14. Na celkovou integritu povrchu (vznik delaminace) měl zásadní vliv parametr opotřebení nástroje a samotný použitý řezný materiál charakteristický svými mechanickými vlastnostmi. Největší míra delaminovaných vrstev je patrná u vzorků, které byly obráběny pomocí nástrojů z HSS a HSS-Co. U těchto nástrojů docházelo u materiálu s vyztužujícími prvky k výrazné delaminaci jak u místa výstupu nástroje, tak i u místa jeho vstupu. Nástrojové materiály z SK a SK-TiAlN se vyznačovaly obrobenými otvory bez otřepů a minimem delaminace vrstev vzorku.

6. Seznam použité literatury

- [1] BRYCHTA, J., R. ČEP, M. SADÍLEK, L. PETŘKOVSKÁ a J. NOVÁKOVÁ: Nové směry v progresivním obrábění. Ostrava: Ediční středisko VŠB-TU Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1505-3
- [2] HUMÁR, Anton. Technologie obrábění – 2. část. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT-FSI v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie obrábění. 2004 [online]. [cit. 2021-06-01]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-2cast.pdf
- [3] KNAP, Artur. Vliv geometrie řezného nástroje ze slinutého karbidu na čelní soustružení hliníkových slitin. Liberec, 2019. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní
- [4] NEJMAN, Dominik. Studie vhodných řezných nástrojů pro vrtání do kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými vlákny. Liberec, 2018. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní
- [5] Norbert Geier, J. Paulo Davim, Tibor Szalay. Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: A review, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing [online]. 2019. ISSN 1359-835X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X1930301X>
- [6] PLÁNIČKA, František. PKD nástroje pro efektivní obrábění kompozitů [online]. 2018 [cit. 2021-06-01]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/pkd-nastroje-pro-efektivni-obrabeni-kompozitu>
- [7] SEDLÁČEK, J. Efektivní obrábění vláknově vyztužených kompozitních materiálů: Disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2010
- [8] SEDLÁČEK, Jan. Nástroje pro obrábění kompozitních materiálů [online]. 2006, [cit. 2018-02-14]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-obrabeni-kompozitnich-materialu.html>
- [9] SEDLÁČEK, Jan. Problémy při obrábění kompozitních materiálů [online]. 2007, 4 s [cit. 2018-02-11]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/problemy-pri-obrabeni-kompozitnich-materialu.html>
- [10] ZEMAN, Pavel. Produktivní a hospodárné obrábění vláknových kompozitů [online]. 2014, [cit. 2021-06-01]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/produktivni-a-hospodarne-obrabeni-vlaknovych-kompozitu>

- [11] AUTOR NEUVEDEN. Präzisionswerkzeuge [online]. [cit. 2021-06-01]. Dostupné z: <https://www.kw-webshop.de/de/Product/Sortiment/100010-PRETEC-HSS-Typ-N-rollgewalzt/100010-5-00/nDUxB01XtLGpj>
- [12] AUTOR NEUVEDEN. Präzisionswerkzeuge [online]. [cit. 2021-06-01]. Dostupné z: <https://www.kw-webshop.de/de/Product/Sortiment/100350-PREMUS-HSS-Co-Typ-N/100350-1-00/rKU6IA8vcPgGB>
- [13] AUTOR NEUVEDEN. Präzisionswerkzeuge [online]. [cit. 2021-06-01]. Dostupné z: <https://shop.hengst-kessler.de/gb/Product/Details/Precitool/100100-PREMUS-HSS-Co-TiN-118/100100-5-00/wPUP3z6Vtkoxk>
- [14] AUTOR NEUVEDEN. Präzisionswerkzeuge [online]. [cit. 2021-06-01] Dostupné z: <https://www.kw-webshop.de/de/Product/Sortiment/102620-PREMUS-VHM-Typ-N-118-/102620-5-00/26U6zN5wcZ3Lp>
- [15] AUTOR NEUVEDEN. Präzisionswerkzeuge [online]. [cit. 2021-06-01]. Dostupné z: <https://www.kw-webshop.de/de/Product/Sortiment/102625-PREMUS-VHM-Typ-N-118-PT-FiRE/102625-5-00/rKU6IWrgFPgL6>
- [16] AUTOR NEUVEDEN. Seco tools [online]. [cit. 2021-06-01]. Dostupné z: https://www.secotools.com/article/p_02780524?language=en
- [17] AUTOR NEUVEDEN. Seco tools [online]. [cit. 2021-06-01]. Dostupné z: https://www.secotools.com/article/p_02827933?language=en

PŘÍLOHY

Příloha č. 1 - CD