

Optimální řezné podmínky při broušení kompozitů s polymerní matricí

Bc. Ľubomír Kormaňák

Diplomová práce
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lubomír Kormaňák**
Osobní číslo: **T15405**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Optimální řezné podmínky při broušení kompozitů s polymerní maticí**

Zásady pro vypracování:

1. Teoretická studie na dané téma
2. Příprava experimentu pro rovinné broušení kompozitních materiálů s polymerní maticí
3. Měření jakosti povrchu pro dané řezné podmínky a stanovení závislostí
4. Vyhodnocení a diskuze výsledků s doporučením optimálních řezných podmínek

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího diplomové práce.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

2. ledna 2017


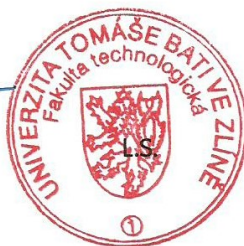
Termín odevzdání diplomové práce:

12. května 2017

Ve Zlíně dne 26. ledna 2017



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: Kormaňák Libomír

Obor: Kybernetika

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 20.4.2017

Kormaňák

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídí k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Kompozit je materiál pozostávajúci z polymérnej matrice kombinovaný s vláknitou výstužou. Kompozity sú veľmi obľúbené kvôli ich nízkym cenám a jednoduchým výrobným metódam. Na zabezpečenie vysokej kvality povrchu výrobku sa v súčasnosti vyžadujú moderné a presné výrobné stroje, overené technológie a kvalitné zariadenia na detekciu povrchových väd. Diplomová práca rieši vzájomné závislosti kvality povrchu od typu brúseného materiálu, typu brúsiaceho kotúča a zmenou technologických vlastností.

Kľúčové slova: Kompozit, materiál, brúsenie, nástroj, kvalita povrchu

ABSTRACT

Composite is the material consisting of a polymer (resin) matrix combined with a fibrous reinforcing dispersed phase. Composites are very popular due to their low cost and simple fabrication methods. To ensure the high quality of the surface there is currently required modern and accurate manufacturing machines, proven technologies and high quality equipment for the detection of surface defects. This thesis deals with surface quality as a function of the type of grinding wheel, type of used material or changing process parameters.

Key words: composite, material, grinding, tool, surface roughness

Touto cestou chcem vysloviť poďakovanie p. Ing. Ondrejovi Bílkovi, Ph.D. za odborné vedenie pri vypracovaní mojej diplomovej práce. Za pomoc, cenné rady a pripomienky, ktoré dopomohli k naplneniu cieľa. Prehlasujem že som prácu vypracoval samostatne. Myšlienky a state z literatúry ktoré som v práci použil boli vyznačené len ako forma citácie.

Prehlasujem, že odovzdaná verzia diplomovej práce a verzia elektronická nahraná do IS / STAG sú totožné.

OBSAH

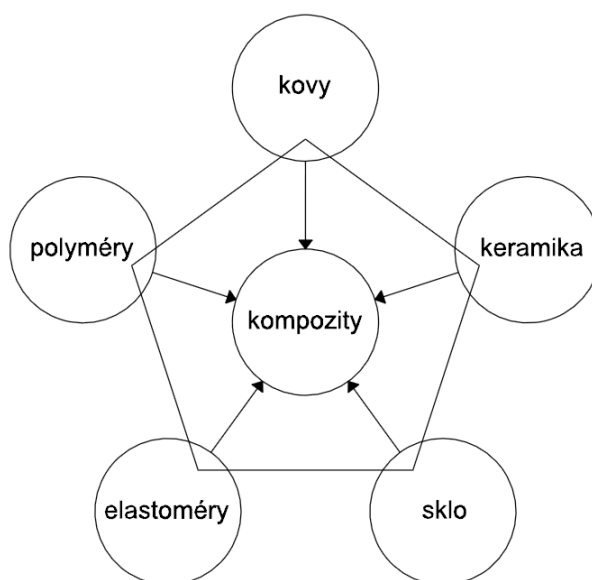
ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	13
1 TEÓRIA OBRÁBANIA	14
1.1 ABRAZÍVNE METÓDY OBRÁBANIA	15
1.2 TEÓRIA BRÚSENIA.....	15
1.2.1 Základné znaky procesu brúsenia.....	15
1.2.2 Základné pohyby pri brúsení	17
1.2.3 Kinematika brúsenia	17
1.2.4 Tvorba triesky pri brúsení.....	20
1.2.5 Termodynamické javy	22
1.2.6 Základné spôsoby brúsenia.....	23
1.2.7 Rovinné brúsenie	23
1.2.8 Význam reznej kvapaliny pri brúsení	25
1.3 BRÚSIACE NÁSTROJE	25
1.3.1 Označovanie brúsnych nástrojov	26
1.3.2 Upínanie brúsnych nástrojov	29
1.3.3 Vyváženie brúsneho kotúča.....	30
1.3.4 Orovnávanie brúsnych kotúčov	31
1.3.5 Samoostrenia brúsnych kotúčov	31
2 KOMPOZITNÉ MATERIÁLY.....	33
2.1 KOMPOZITY NA BÁZE POLYMÉROV	34
2.1.1 Rozdelenie podľa tvaru sekundárnej fázy	37
2.1.2 Rozdelenie podľa veľkosti vlákien.....	39
2.1.3 Rozdelenie podľa typu matrice.....	39
2.1.4 Lamináty	40
2.1.5 Sklolamináty	41
2.1.6 Plasty spevnené uhlíkovým vláknom	42
2.1.7 Aramidové vlákna	43
2.1.8 Matrica kompozitov.....	45
2.2 TECHNOLÓGIA VÝROBY KOMPOZITOV	46
2.2.1 Ručné kladenie za mokra (laminovanie)	47
2.2.2 Technológia VBM	48
2.2.3 Striekanie	49
2.2.4 Lisovanie z prepregu	50
2.2.5 Technológia výroby v autokláve	50
3 DRSNOSŤ POVRCHU	51
3.1 PARAMETRE POVRCHU PROFILU	51
3.2 METÓDY MERANIA DRSNOSTI POVRCHU	55
3.2.1 Metódy kvalitatívne	55
3.2.2 Metódy kvantitatívne	56
3.2.3 Dotyková meracia metóda	56
3.2.4 Bezdotyková meracia metóda - Metóda svetelného rezu	58
3.2.5 Interferenčná metóda merania drsnosti povrchu.....	58

3.3	KVALITA POVRCHU PRI BRÚSENÍ.....	59
4	REGRESNÁ ANALÝZA	60
4.1	JEDNODUCHÁ LINEÁRNA REGRESIA	60
4.2	NELINEÁRNA PÁROVÁ REGRESIA	60
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	61
5	CIELE DIPLOMOVEJ PRÁCE	62
6	TECHNOLOGICKÝ POSTUP EXPERIMENTU	63
6.1	KOMPOZIT S EPOXIDOVOU MATRICOU A UHLÍKOVÝMI VLÁKNAMI (CFRP).....	65
6.2	KOMPOZITY S EPOXIDOVOU MATRICOU A SKLENENÝMI VLÁKNAMI (GFRP)	66
6.3	STACIONÁRNA BRÚSKA.....	66
6.4	KERAMICKÝ BRÚSNY KOTÚČ AG 92/99 80I 8V 85	68
6.5	BRÚSNY KOTÚČ Z KNB - B126 K100 B-VII.....	69
6.5.1	Priemer brúsneho kotúča	70
6.5.2	Pojivo.....	71
6.5.3	Zrornosť	71
6.5.4	Koncentrácia brusiva	71
6.6	MERACIE ZARIADENIE SURFTEST SÉRIA SJ-410	71
6.7	CHLADIACA KVAPALINA	73
7	ŠTATISTICKÉ HODNOTENIE EXPERIMENTU.....	74
7.1	VPLYV RÝCHLOSTI POSUVU NÁSTROJA <i>vf</i> NA KVALITU POVRCHU.....	74
7.1.1	Vyhodnotenie drsnosti povrchu pri použití keramického kotúča	74
7.1.2	Vyhodnotenie drsnosti povrchu pri použití kotúča z KNB	78
7.2	VPLYV ÚBERU MATERIÁLU <i>ap</i> NA KVALITU POVRCHU	81
7.2.1	Technologické parametre pri použití keramického kotúča.....	81
7.2.2	Technologické parametre pri použití kotúča z KNB	85
7.3	VPLYV POUŽITIA CHLADIACEJ KVAPALINY NA DRSNOSŤ POVRCHU.....	88
7.3.1	Technologické parametre procesu brúsenia pri použití chladiacej kvapaliny	88
7.4	VPLYV ORIENTÁCIE VLÁKIEN NA VYHODNOCOVANÚ DRSNOSŤ POVRCHU.....	92
7.4.1	Technologické parametre pri procese brúsenia	92
7.5	VPLYV TYPU BRUSNÉHO KOTÚČA NA VYHODNOCOVANÚ DRSNOSŤ POVRCHU	95
7.5.1	Technologické parametre procesu brúsenia pri konštantnom úbere <i>ap</i> pre kompozit z GFRP	96
7.5.2	Technologické parametre procesu brúsenia pri konštantnom úbere <i>ap</i> pre kompozit z CFRP	97
7.5.3	Technologické parametre procesu brúsenia pri konštantnej <i>vf</i> pre kompozit z GFRP	99
7.5.4	Technologické parametre procesu brúsenia pri konštantnej <i>vf</i> pre kompozit z CFRP.....	100
7.6	ŠTRUKTÚRA POVRCHU VZORIEK	101
7.6.1	Technologické parametre procesu brúsenia s chladením pre vyhodnotenie profilu P vzorku z CFRP.....	102
7.6.2	Technologické parametre procesu brúsenia bez chladenia pre vyhodnotenie profilu P vzorku z CFRP	103

7.6.3	Technologické parametre procesu brúsenia s chladením pre vyhodnotenie profilu P vzorku z GFRP	104
7.6.4	Technologické parametre procesu brúsenia bez chladenia pre vyhodnotenie profilu P vzorku z GFRP	105
ZÁVER		107
ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY		109
ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK		112
ZOZNAM OBRÁZKOV		116
ZOZNAM TABULIEK		120
ZOZNAM PRÍLOH		121

ÚVOD

V súčasnosti vo svete vyniká trend rozvoja nových netradičných materiálov. V dnešnej dobe sa okrem klasických materiálov ku ktorým patria najmä ocele, využíva aj celý rad kompozitov v strojárstve, doprave, chemickom priemysle, energetike, ale aj v medicíne. Veľmi dôležitú úlohu majú pri nich kompozície, ale aj povrchové vrstvy, pretože väčšina poškodení materiálov začína na povrchu súčiastky. Na najnovšie členenie inžinierskych materiálov poukazuje Ashbyho diagram Obr. 1. kde sa všetky materiály spájajú s kompozitmi [1]



Obr. 1. Ashbyho diagram

Pri vhodnej voľbe materiálu pre výrobok ide často o požiadavky protichodné a nevyhovujúce vlastnosťami jedného homogénneho materiálu. Potom výsledný materiálu môže znamenať kompromis, ktorý vychádza z primárnych vlastností zložiek a nedostatky neprírodných vlastností sa riešia napr. pripustením kratšej životnosti súčiastky, zmenou technológie, zväčšením prierezu a iné. Niekedy je potrebné zmeniť konštrukciu, tvar dielca, ale mnoho krát aj celú koncepciu riešenia. Zmenu kvality možno významne ovplyvniť aj formou združenia materiálov, čiže zhotovením kompozitu. Tie boli vytvorené spojením dvoch jednoduchých materiálov (napr.: polymér - sklo, kov - keramika a pod.), ktoré plnia jednotlivé, v jednom materiáli nezlučiteľné požiadavky [2].

Kompozitné materiály sú vlastne modernými materiálmi, ktoré majú za sebou istý vývoj a ich stavba bola odpozorovaná z prírody [3]. Na ich zhotovenie sú veľmi často používané

moderné výrobné technológií, najmä vďaka možnosti navrhovať veľmi ľahké konštrukcie s vysokými hodnotami mechanických vlastností. Ide o parametre mernej pevnosti, modulu pružnosti, húževnatosti a odolnosti proti únave. Tieto charakteristiky sú na rovnakej úrovni ako u zliatin hliníka, titánu, alebo sa môže častokrát jednať aj o lepšie a vhodnejšie vlastnosti pre dané použitie.

Kompozitné konštrukcie sa väčšinou neporušia nedostatočnou ťahovou alebo tlakovou pevnosťou, ale porušenia prevažne nastáva vplyvom vysokej koncentrácie napätia, pôsobením okolitého prostredia, nedostatočnou lámavou energiou alebo únavou. Tieto faktory sú obyčajne viac závislé na štruktúrnom usporiadaní, na interakciách medzi jednotlivými zložkami ako na samotných špecifických vlastnostiach materiálu. Väčšinou je teda návrh konštrukcie dôležitejší ako samotná pevnosť materiálu.

V súčasnosti je niekoľko hlavných smerov činnosti z moderných kompozitov. Významným smerom je moderná koncepcia návrhu konštrukcie, založená na kompozitoch, dôležitá je aj orientácia na prvky s predĺženou životnosťou. Nemenej dôležitými sú vývoj nových matric, umožňujúcich zrýchlenie a zjednodušenie výrobného cyklu, opatrenie k zníženiu ceny, výrobné zavedenie mechanizácie a automatizácie výrobného procesu namiesto ručnej práce, ktorým dnešné zariadenia môžu priniesť až 80% úspory výrobného času.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TEÓRIA OBRÁBANIA

Pod procesom obrábaním rozumieme, že sa jedná o proces odoberania materiálu z povrchovej vrstvy tak, aby po dokončení polovýrobok dostal požadovaný tvar a rozmer danej strojovej súčiastky. Odoberanie sa uskutočňuje rôznymi spôsobmi, pričom medzi najviac rozšírené patrí rezanie, to znamená proces pri ktorom sa od základného materiálu oddeľujú triesky.

Zlepšovanie procesov obrábania si neustále vyžaduje získavať súbory poznatkov o správaní sa materiálu, o javoch vzájomnej interakcie medzi obrobkom a nástrojom a o zmenách vlastností materiálu.

Technológia sa realizuje v sústave SPNO stroj – prípravok – nástroj – obrobok. Stroj používaný v takejto sústave nazývame obrábací stroj. Zariadenie, ktoré používame na upevnenie a ako pomôcku pri obrábaní nazývame prípravok. Používaný nástroj nazývame rezný nástroj. Objekt technologického spracovania sa nazýva polotovar, obrobok, alebo výrobok.

Obrábatelnosť nie je len funkciou obrábaného materiálu, ale aj spôsobu obrábania, použitého rezného materiálu a pod. Má teda podmienený charakter, lebo vyjadruje rôzne vlastnosti materiálu v závislosti od podmienok obrábania a požiadaviek, kladených na vyrábané súčiastky. Komplex technologických vlastností, určujúcich obrábatelnosť materiálu, možno pri danom spôsobe obrábania a druhu rezného materiálu vyjadriť týmito faktormi [4]:

- Rezná rýchlosť pri požadovanej trvanlivosti nástroja v_T . Úroveň tejto reznej rýchlosti určuje takzvanú kinetickú (rýchlostnú) obrábatelnosť materiálu.
- Rezná sila, krútiaci moment, alebo výkon, potrebný na odrezanie materiálu. Úroveň reznej sily (mernej reznej sily) určuje tzv. dynamickú (silovú) obrábatelnosť materiálu.
- Kvalita obrobenej plochy a presnosť lineárnych rozmerov obrobku určuje mikrogeometrickú povrchovú obrábatelnosť materiálu.
- Tvar (stupeň tvarovania) odchádzajúcej triesky.
- Teplota rezania

1.1 Abrazívne metódy obrábania

Pre abrazívne metódy obrábania je charakteristické, že sa pri nich používajú nástroje s ne-definovanou geometriou britu. Zastupujú ich aplikácie pri ktorých sa požaduje vysoká presnosť obrábaných plôch. Medzi prioritné metódy tohto druhu patrí: honovanie, brúsenie, lapovanie a superfinišovanie. [6]

1.2 Teória brúsenia

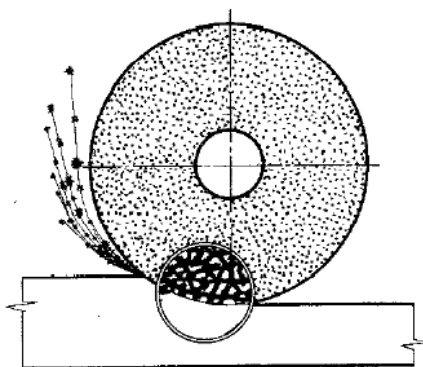
Brúsenie je obrábanie nástrojom s mnohými reznými klinmi vytvorenými zo zrn brusiva, ktoré sú spravidla v nástroji spojené spojivom tak, že nástroj vykazuje pórovitú štruktúru. Existencia pórov je nevyhnutná pre zabezpečenie odvodu triesok (produktov brúsenia) z miesta rezu (zóny rezania).

Brúsenie, je veľmi presný spôsob obrábania, je založený na súčasnej práci množstva rezných klinov, spôsobujúcich, že hĺbka odoberanej plochy je veľmi malá, čo je znak jemného obrábania. Brúsenie je veľmi rozšírené, napr. v automobilovom priemysle a výrobe ložísk. Brúsenie ako spôsob obrábania môže byť a býva použité tam, kde sa vyžaduje:

- presný geometrický tvar a rozmery s nízkou drsnosťou obrobenej plochy
- obrábanie súčiastok, ktoré inak ako brúsením sa veľmi ťažko obrábajú (napr. niektoré ťažko obrábatel'né kalené ocele).
- obrábanie súčiastok, pre ktoré je brúsenie najhospodárnejšie (napr. ostrenie rezných nástrojov) [7]

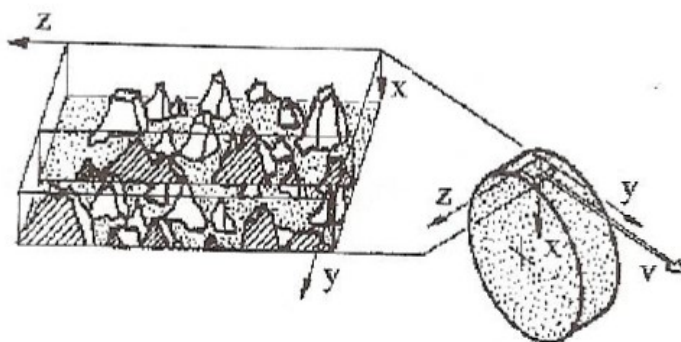
1.2.1 Základné znaky procesu brúsenia

Súčiastky vyrobené na iných ako brúsiacich strojoch spravidla nedosahujú požadovanú presnosť (často sa aj tepelne spracúvajú), dokončujú sa brúsením, pri ktorom súčiastka dostane nový rozmer, požadovaný tvar a drsnosť povrchu. Nástrojom je obyčajne brúsiaci kotúč, ktorým sa dajú hospodárne obrábať tvrdé kalené a cementované súčiastky, spekané karbidy a iné tvrdé kovové i nekovové materiály. Brúsením sa obnovuje aj rezacia schopnosť opotrebovaných nástrojov. Tomuto spôsobu brúsenia sa hovorí ostrenie. [8]



Obr. 2. Nepravidelný úber materiálu [8]

Každé jednotlivé zrno brúsiva pôsobí ako rezný nástroj, vniká do materiálu obrobku, z ktorého sa oddeľujú veľmi jemné triesky. Triesky majú veľmi malé rozmery a vplyvom vysokej teploty odletujú ako iskry. Zrná brúsiva sú uložené v spojive brúsneho kotúča a sú nepravidelne rozmiestnené, ako je znázornené na Obr. 3. Zrná majú nepravidelný tvar, zaoblené vrcholy a majú teda spravidla i záporné rezné uhly (uhol čela).



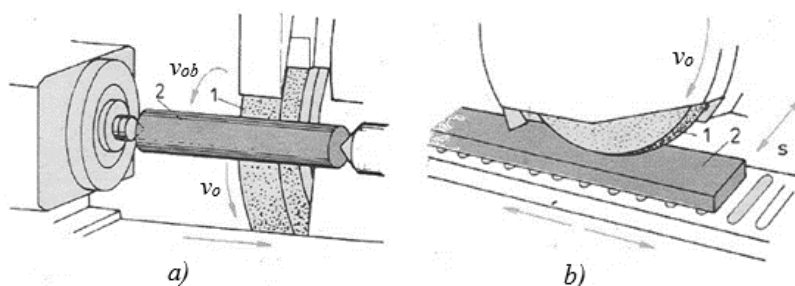
Obr. 3. Povrch brúseného kotúča [8]

Brúsny kotúč vykonáva hlavný otáčavý rezný pohyb. Obrába pri veľkých rezných rýchlostiach množstvom brúsiacich zrn na pracovnej ploche kotúča. Brusné zrná oddeľujú triesku od obrobku a brúsny kotúč odreže za časovú jednotku obrovské množstvo veľmi jemných triesok. Skôr ako brúsiace zrná na začiatku rezného pochodu vniknú do materiálu, najprv sa po jeho povrchu klížu. Odobranie jednej triesky trvá asi 0,0001 až 0,00005s. [8]

1.2.2 Základné pohyby pri brúsení

Rozoznávame dva základné spôsoby brúsenia (Obr. 4.):

- brúsenie rotačných plôch - brúsny kotúč sa otáča obvodovou rýchlosťou v_o a obrobok v opačnom zmysle rýchlosťou v_{ob}
- rovinné brúsenie – brúsny kotúč sa otáča rýchlosťou v_o , stôl s obrobkom koná priamočiary vratný pohyb rýchlosťou v_{ob}



Obr. 4. Pohyb pri brúsení: a) brúsenie valcových plôch, b) rovinne brúsenie

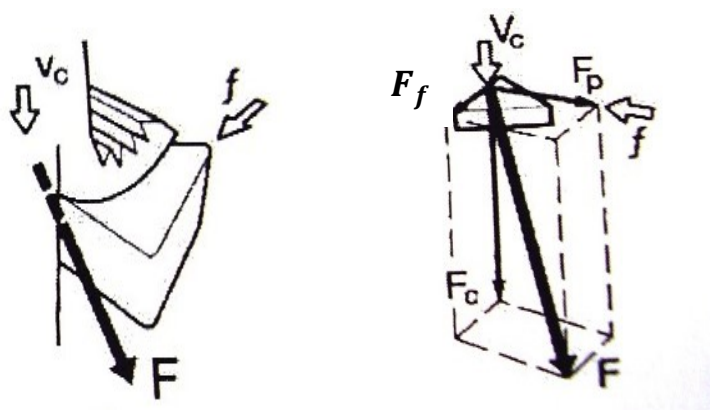
1. brúsny kotúč, 2. obrobok [32]

1.2.3 Kinematika brúsenia

Silu, pôsobiacu na nástroj, ktorou oddeľujeme triesku, nazývame rezná sila. Rezným odporom nazývame odpor materiálu proti vnikaniu nástroja do obrobku. Obe veličiny majú rovnakú veľkosť, ale opačnú orientáciu. Dôležité je poznať rezné sily pri obrábaní a to z viacerých hľadísk [15]:

- výpočet a konštrukciu časti stroja
- pre konštrukciu nástrojov
- vedeckého poznania rezného procesu
- voľba a výpočet rezných pomerov

Rezné sily, vzhľadom na nehomogenitu obrábaného materiálu, majú dynamickú povahu. Výsledná rezná sila sa rozkladá do zložiek (Obr. 5.) v priestorovej súradnej sústave. Táto sústava je tvorená osami x , y , z . Výslednú reznú silu F tvoria tri zložky:



Obr. 5. Zložky reznej sily [15]

- a) tangenciálna sila F_c ,
- b) radiálna sila F_p - pasívna sila
- c) axiálna sila F_f – posuvová sila

$$F = F_c + F_p + F_f \quad , \text{kde platí} \quad F_f < F_c < F_p \quad (1)$$

V procese brúsenia, keďže nástroj musí byť tlačný do rezu vzniká rezná sila F , ktorej výslednica je rozložená do hlavnej (tangenciálnej) sily F_c , prísuvovej sily (radiálnej) F_p a osovej sily F_f . Veľkosť tangenciálnej zložky si určíme zo vzťahu :

$$F_c = \frac{1000 \cdot P_s}{v_k} \quad , [\text{N}] \quad (2)$$

kde,

P_s - skutočný výkon na hriadeľi stroja [kW]

v_k - obvodová rýchlosť kotúča [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

Rezná sila F na obvode brúsneho kotúča je definovaná vzťahom:

$$F = \frac{k_b \cdot a_z \cdot b \cdot z}{2} \quad , [\text{N}] \quad (3)$$

kde,

k_b – špecifický rezný odpor pri brúsení (35 000 až 200 000 MPa)

a_z – stredná hodnota hĺbky odoberanej vrstvy, [mm]

b – šírka reznej časti zrna, [mm]

z – počet súčasne zaberajúcich zrn

Rezná sila F je asi o 20 % menšia pri použití reznej kvapaliny, ako pri práci bez chladenia. To má významný vplyv hlavne pri práci s kotúčom, ktorý má otupené zrná. Pri brúsení s použitím a bez použitia rezných kvapalín sa podstatne mení trenie. Tento rozdiel je tým väčší, čím väčšími sú otupené zrná kotúča. Pri nadmernom otupení kotúča vzrastie sila F v priemere až o 2 až 2,5 – krát pri brúsení bez chladenia. [15]

Ako pri každom obrábaní je kinematika určená hlavným a vedľajším pohybom. Hlavným pohybom je pracovný rotačný pohyb brúsneho kotúča, vedľajší pohyb je pohyb obrobku, ktorý môže byť priamočiary posuvný, alebo rotačný. Výsledný rezný pohyb je daný výslednicou týchto dvoch pohybov. Hlavný rotačný pohyb je niekoľko násobne vyšší, ako vedľajší pohyb (aj 100 - 200x), preto za reznú rýchlosť považujeme obvodovú rýchlosť brúsneho kotúča v_o [m.s⁻¹]. Posuv je definovaný ako posunutie brúsneho kotúča za jednu otáčku obrobku (pri rotačnom brúsení), alebo priamočiary posun obrobku (kotúča) za časovú jednotku (pri rovinnom brúsení). [9]

Rezná rýchlosť pri brúsení je definovaná vzťahom

$$v_c = \frac{\pi \cdot D_{max} \cdot n_s}{60 \cdot 10^3}, [\text{m.s}^{-1}] \quad (4)$$

kde,

D_{max} – maximálny priemer brúsneho kotúča [mm]

n_s – frekvencia otáčania brúsneho kotúča [ot.mm⁻¹]

v_c – je v rozmedzí od približne 30 až 35 m.s⁻¹

pri rýchlostnom brúsení je to 80 ÷ 100 m.s⁻¹

Ukazovateľom efektívnosti brúsenia je objemový úber Q_w čo je objem odbrúseného materiálu za jednotku času [mm³min⁻¹]. Skutočný úber je však daný aj účinnosťou brúsenia (vplyv ostroty zrn, chladiacej kvapaliny a pod.)

$$Q_w = v_o \cdot h \cdot v_{ks} \quad , [\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}] \quad (5)$$

kde,

v_o - obvodová rýchlosť [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

h - prísun [mm]

v_{ks} - pozdĺžny posuv [mm]

Obvodová rýchlosť obrobku v_{ob} sa určuje podobne [9]

$$v_{ob} = \frac{\pi \cdot D_{ob} \cdot n_{ob}}{60 \cdot 1000} \quad , [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (6)$$

kde,

D_{ob} - priemer obrobku [mm]

n_{ob} - počet otáčok obrobku [min^{-1}].

Stredný prierez odoberaného materiálu je definovaný vzťahom:

$$A_s = \frac{v_{ob}}{60 \cdot v_o} \cdot a_p \cdot f_n \quad , [\text{mm}] \quad (7)$$

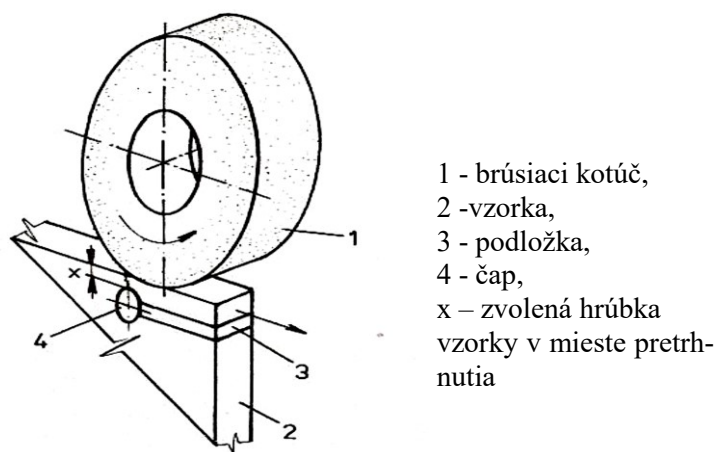
a_p – hĺbka odoberanej vrstvy materiálu [mm]

f_n – relatívny posuv brúsneho kotúča za jednu otáčku obrobku [mm]

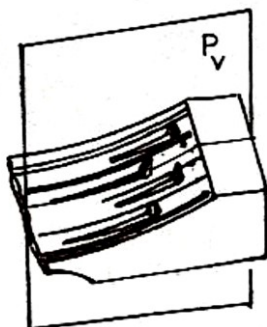
1.2.4 Tvorba triesky pri brúsení

Hodnovernú informáciu o špecifikácii procesu tvorenia triesky pri brúsení možno získať len experimentálne, pomocou zariadení na Obr. 6. a 7. Spoľahlivou metódou, ktorá umožňuje hlbšiu identifikáciu javov tvorenia triesky pri brúsení je fixácia zóny rezania „okamžitým“ zastavením brúsenia. V minulosti sa vyvinuli viaceré metódy, ktoré zabezpečujú fixáciu zóny tvorenia triesky pri metódach obrábania nástrojmi s definovanou geometriou. Ich aplikácia na proces brúsenia sa spája s problémom vysokých rezných rýchlostí, ktoré vysoko prevyšujú rýchlosti, používané pri sústružení alebo frézovaní, preto bolo treba vyvinúť metodiku fixácie zóny rezania, vhodnú pre tieto podmienky.

Skutočné brúsenie prebieha rýchlosťou 30 až 100 m. s⁻¹. O zastavenie tohto procesu bez skreslenia sa pokúšalo mnoho autorov. Riešenia dospeli k zariadeniam, ktorými možno zastaviť proces brúsenia jedným zrnom. Po prvý krát sa podarilo získať korene triesok pri brúsení reálnym brúsiacim kotúčom rozpracovaním originálnej metódy, vyvinutej v bývalom Československu. Jej podstata je vo vytrhnutí určitej časti obrábaného materiálu vplyvom vnútorných napätí od reznej sily pri vychádzaní nástroja zo záberu. Metóda bola vyvinutá pre metódy obrábania nástrojom s definovaným rezným klinom. Jej aplikácia na brúsenie viedla k pozoruhodným výsledkom. Predovšetkým sa dokázalo, že túto metódu neobmedzuje rezná rýchlosť. Táto skutočnosť vyplýva z princípu metódy. Skúšobnou vzorkou je úzka platnička (hrúbky 5 až 10 mm), ktorá sa brúsi kotúčom na hornej ploche. V mieste vychádzania brúsiaceho kotúča zo záberu je vyvrtaný otvor s čapom a rovnobežne s brúsiacou plochou je vyrezaná úzka drážka, v ktorej je vložená plechová platnička, ktorá zabraňuje deformácii vzorky. V znázornenej polohe kotúča, pri dostatočne malej hrúbke steny v tomto mieste sa vzorka pretrhne a prudko sa vymrští proti brúsiacemu kotúču. Možno dokázať, že začiatková rýchlosť vzorky je vyššia ako rezná rýchlosť, a tým sa prerušuje kontakt brúsiacich zrn s brúseným povrchom. [11]



Obr. 6. Princíp metódy na prerušenie procesu brúsenia



Obr. 7. Vzorka vzniknutá vytrhnutím z obrobku [11]

1.2.5 Termodynamické javy

Jedným z najdôležitejších činiteľov, ktoré ovplyvňujú proces obrábania, je teplo. Brúsenie sprevádza značný vývoj tepla v mieste tvorenia triesky a tým sa ohrievajú kontaktné vrstvy brúsiacich zrn a spojiva. Zohrievajú sa povrchové vrstvy obrobku. V súvislosti s interakciou medzi abrazívnymi zrnami a obrábaným povrchom, hovoríme o troch druhoch interakcie. Preto je aj teplota na kontaktných plochách zrn rôzna. Maximálna teplota vzniká na kontaktných plochách zrn, ktoré odoberajú triesku. Teplota na abrazívnych zrnách, ktoré pracujú v podmienkach pružnej alebo plastickej deformácie materiálu, je väčšinou nižšia a mení sa v širokých hraniciach v závislosti od hĺbky vniknutia brúsiaceho zrna. Z hľadiska poznania procesu prebiehajúceho v zóne kontaktu zrna a materiálu, má význam poznanie teploty v mieste kontaktu, ako aj teplotného poľa v brúsiacom zrne. Na určenie oboch týchto charakteristík v prácach viacerých autorov väčšinou sa používali nepriame metódy. Ich aplikácie mali rad chýb, a tým sa vytvorila len priebežná predstava o teplote rezania. [11]

Pri interakcii sústavy s okolím dochádza k stavovým zmenám, sústava prechádza s nestabilného počiatočného stavu do stavu konečného.

Teplo Q vzniknuté pri brúsení z reznej sily F_c a reznej rýchlosti v_c [6]

$$Q = F_c \cdot v_c \quad , [J \cdot s^{-1}] \quad (8)$$

Tepelnú bilanciu v mieste obrábania možno vyjadriť vzťahom:

$$Q_c = Q_t + Q_n + Q_o + Q_p \quad , [J] \quad (9)$$

Q_c – celkové množstvo tepla

Q_t – množstvo tepla odvedeného trieskou

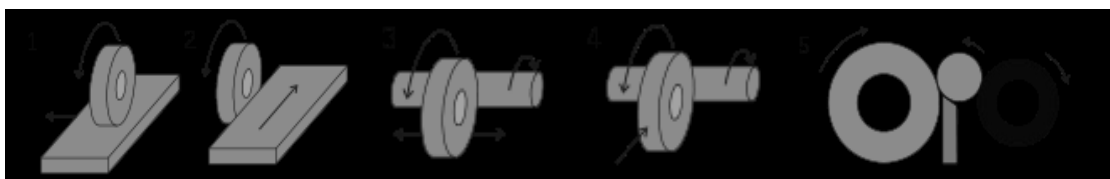
Q_n - množstvo tepla odvedeného nástrojom

Q_o - množstvo tepla odvedeného obrobkom

Q_p - množstvo tepla odvedeného prostredím

1.2.6 Základné spôsoby brúsenia

Základné spôsoby brúsenia ako sú uvedené na Obr. 8. Sú definované podľa tvaru obrobeného povrchu, podľa aktívnej časti brúsnych kotúčov, podľa vzťahu obrobku a brúsneho kotúča, podľa smeru najväčšieho posuvu, podľa smeru obvodových rýchlostí obrobku a brúsneho kotúča a pod.



Obr. 8. Základné spôsoby brúsenia

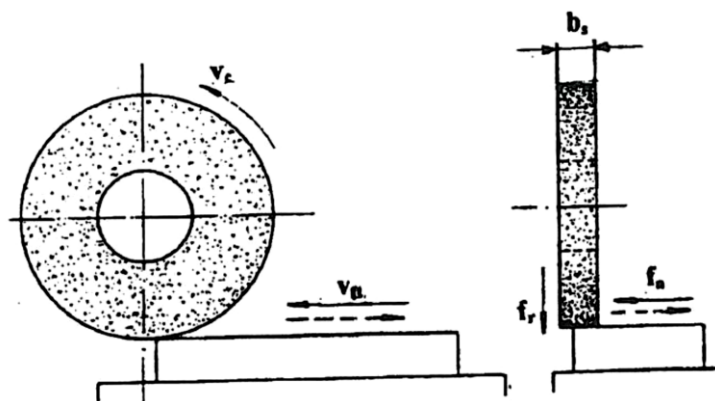
1. Rovinné brúsenie obvodom kotúča.
2. Rovinné brúsenie čelom kotúča.
3. Rotačné brúsenie.
4. Rotačné brúsenie zapichovacím spôsobom.
5. Bezhrotové brúsenie.

1.2.7 Rovinné brúsenie

Proces prebieha na rovinných brúskach. Obrobok sa upína priamo na pracovný stôl, ale môže byť aplikované aj upínanie elektromagnetické, pričom rozoznávame nasledujúce spôsoby rovinného brúsenia:

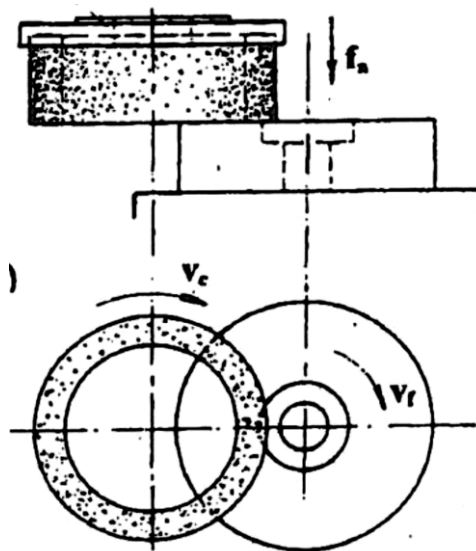
- Obvodové - Obvodom kotúča s pozdĺžnym pohybom pracovného stola (Obr. 9) – Pracovný stôl koná pozdĺžne vratný pohyb neprerušovaný (tangenciálny po-

suvný pohyb) a priečny pohyb (axiálny) prerušovaný (koná sa v úvrtiach pozdĺžneho pohybu). Hrúbka brúseného predmetu sa nastavuje výškovým prestavením brúsneho vretenníka. [7]



Obr. 9. Rovinné brúsenie obvodové [14]

- Čelné – ide o rovinné brúsenie čelom brúsneho kotúča a s pozdĺžnym (tangenciálnym) pohybom pracovného stola (Obr. 10). Používa sa pri odbrusovaní väčších prídavkov na veľké plochy.



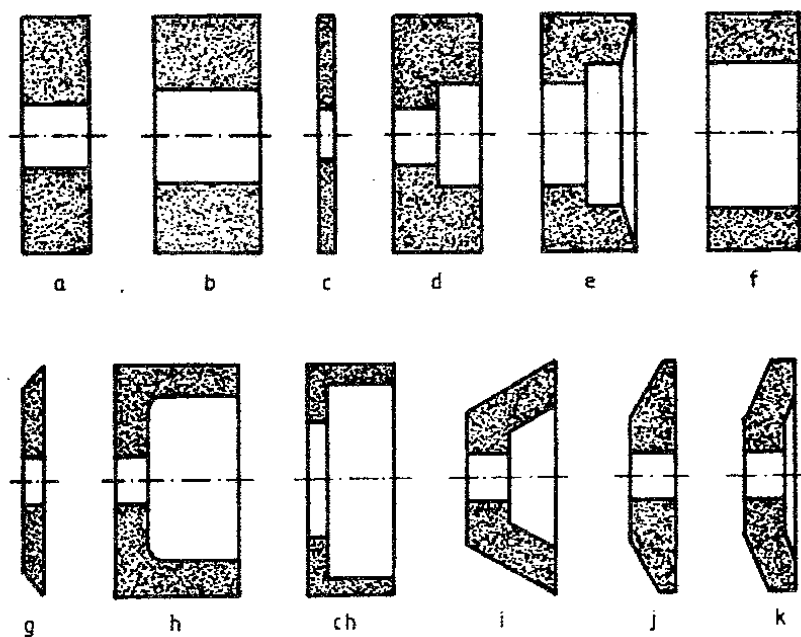
Obr. 10. Rovinné brúsenie čelné [14]

1.2.8 Význam reznej kvapaliny pri brúsení

Pri procese brúsenia je v mieste styku nástroja s obrobkom teplota veľmi vysoká, preto musí mať použitá rezná kvapalina veľmi dobrý chladiaci účinok. Podľa tohto hľadiska je možné rozdeliť operácie brúsenia do dvoch základných skupín, podľa toho, či sa jedná o dodržanie vysokej kvality povrchu, alebo o značné objemové rozptýlenie tepla. Typickou operáciou patriacou do prvej skupiny je brúsenie závitov, pri ktorom sa používajú rezné oleje. Oleje pôsobia oveľa lepšie spolu s jemnou štruktúrou brusného kotúča a zabráňujú jeho porušeniu. Aj v tomto prípade je však možné použiť pri chladení emulzie, ktoré však budú musieť mať väčšie koncentrácie (10 až 15%). Operácie patriace do druhej skupiny sú valcové a bezhrotové brúsenie a brúsenie plôch. Pri týchto operáciách sú vhodné emulzie, alebo vodné roztoky. Pri chladení kotúčov s bakelitovou väzbou roztokom sódy vo vode je nutné zmenšiť jej obsah pod 0,5%. Pri brúsení titanu a jeho zliatin, alebo pri brúsení materiálu so malou tepelnou vodivosťou je možné odporučiť aktivované emulzie. Rezné kvapaliny s veľkým obsahom mydlových zložiek môžu zlepšiť kvalitu brúseného povrchu, ale na druhej strane môžu spôsobovať zalepovanie brusného kotúča, poprípade aj zanášanie ostatných častí brúske a pomalšie usadzovanie triesok, čo sú z hľadiska brúsenia značné nevýhody.

1.3 Brúsne nástroje

Brúsne kotúče môžu mať rôzne tvary, tak ako sú uvedené na Obr. 11. (plochý, hrncový, miskový, tanierový a i.). Pri hrotovom brúsení sa najviac využívajú ploché kotúče. Brúsne kotúče možno aj tvarovať (orovnávať) postupným odoberaním vrstiev, najčastejšie diamantovým hrotom, tzv. diamantovým orovnávačom. Takto získame brúsne kotúče pre brúsenie tvarov (vonkajších rotačných plôch všeobecných) zapichovacím spôsobom (radiálnym brúsením)

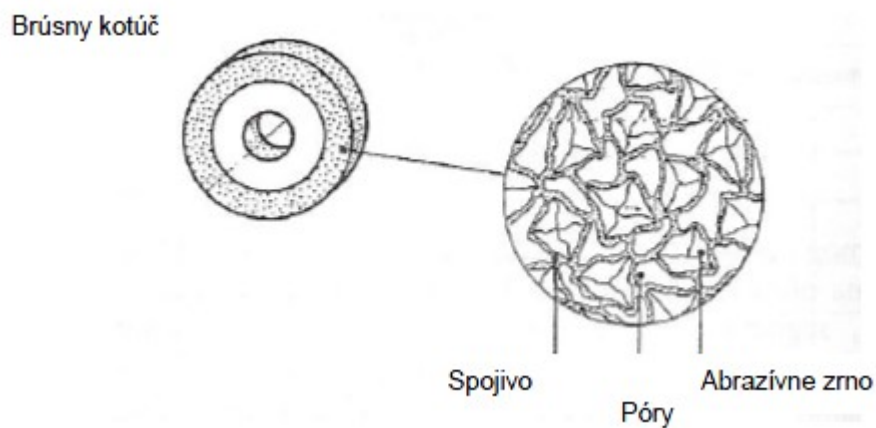


Obr. 11. Tvary brúsnych kotúčov [12]

Popis Obr. 11: a) plochý, b) plochý s veľkým otvorom, c) rezací, d) s jednostranným vybraním, e) so skoseným vybraním, f) prstencový, g) jednostranne skosený, h) hrncový, ch) hrncový s veľkým otvorom, i) miskový, j) kužeľový, k) tanierový [12]

1.3.1 Označovanie brúsnych nástrojov

Ako brúsne nástroje sa najčastejšie používajú brúsne kotúče Obr. 12. Brúsny kotúč pozostáva z brusiva, spojiva a pórov.



Obr. 12. Zloženie brúsneho kotúča [10]

Ako brusivo sa používajú korundy a to biely, označený A99 (Al_2O_3 + 1% prímiesí, najmä Fe_2O_3), ružový, označený A98 (Al_2O_3 + 2% prímiesí, najmä Fe_2O_3), hnedý, označený A96 (Al_2O_3 + 4% prímiesí), potom sa používajú tiež legované korundy (legované s Mn, Zr a i.) a rôzne upravené korundy (mikrokryštalické, polotrieštivé, s usmernenou kryštalizáciou, tzv. Secret-Gel a i.). Ďalej sa používajú silíciumkarbidy a to zelený, označený C49 (s 1% prímiesí), zelenosivý až sivý, označený C48 (s 2% prímiesí) a sivý až čierny C47 (s 3 a viac percentami rôznych prímiesí). Napokon ako brusivo sa používajú diamanty (najmä syntetické) a kubický nitrid bóru.

Druh brusiva

Tavený Al_2O_3 (korund)	biely	A99B
	biely	A99
	ružový	A98
	legovaný	A98M
	hnedý	A96
	čierny	A85
karbid	zelený	C49
kremíka	sivý	C48
	čierny	C47
diamant		D
B_4C NB		B

Brusivo sa používa vo forme brúsnych zrn rôznej veľkosti, (tzv. zrnitosti, číslo ktorej je číslom triediaceho sita, pretože brúsne zrná sa triedia sústavou triediacich sít označených počtom očiek na dĺžku anglického palca). Tak máme brusivo a brúsne kotúče veľmi hrubé, hrubé, stredné, jemné, veľmi jemné a osobitne jemné

Stupeň zrnitosti

veľmi hrubá	315 – 160
hrubá	125 – 63
stredná	50 – 25
jemná	20 – 10
veľmi jemná	8 – 5
osobitne jemná	4 – M10

Spojivo brúsnych kotúčov u korundov a silíciumkarbidov býva najmä keramické alebo z umelých živíc a i. U diamantových brúsnych kotúčov a kotúčov z kubického nitridu bóru býva spojivo najmä kovové alebo z umelých živíc a i. Spojivo drží pohromade zrná a musí mať určitú tvrdosť (odolnosť voči vylúpnutiu brúsnych zrn zo spojiva). Spojivo na zlepšenie svojich vlastností býva niekedy impregnované (keramickou sírou, grafitom).

Spojivo

keramické	V
silikátové	S
magnezitové	O
šelakové	E
gumové	R
zo synt. živice	B
glejové	G

Tvrdosť sa označuje písmenami abecedy (písmená zo začiatku abecedy sa používajú pre mäkké kotúče, zo stredu abecedy pre stredné a z konca pre tvrdé).

Tvrdosť brúsneho nástroja udáva odpor brúsnych zrn proti vylomeniu z nástroja a je závislá na pevnosti väzby nástroja (druh a množstvo spojiva). Pre tvrdosť platia nasledujúce pravidla:

- čím tvrdší materiál brúsime, tým má byť mäkkší nástroj,
- čím väčšia styčná plocha, tým mäkkší má byť kotúč,
- pri brúsení prerušovaných plôch treba použiť tvrdší nástroj,
- pre menej presné a tuhé stroje sa volí tvrdší nástroj.

Stupeň tvrdosti

osobitne tvrdý	V, Z
veľmi tvrdý	T, U
tvrdý	P, Q, R, S
stredný	L, M, N, O
mäkký	I, J, K
veľmi mäkký	G, H

Póry majú určitú veľkosť označovanú ako pórovitosť, táto je odstupňovaná stupňami od 1 (najhustejšie) cez stredné (6,7,8) až po najpórovitejšie (13). Póry slúžia na to, aby sa pri brúsení do nich mohli umiestniť triesky (mikrotriesky), a tak opustiť miesto brúsenia. [12]

Štruktúra povrchu

veľmi hutný	1, 2
hutný	3, 4
polohutný	5, 6
pórovitý	7, 8
Veľmi pórovitý	9, 10
Osobitne pórovitý	11, 12, 13

Tab. 1. Príklad označenia brúsneho nástroja

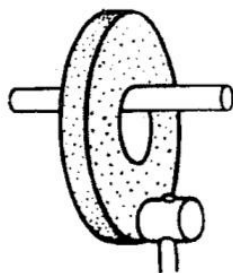
Typ tvar	Hlavný rozmer [mm]	Technická charakteristika				
T5	300x25x32-90x13	49C	80	K	9	V

kde,

49C	-	Typ zrna
80	-	Zrornosť
K	-	Tvrdosť
9	-	Štruktúra
V	-	Typ spojiva

1.3.2 Upínanie brúsnych nástrojov

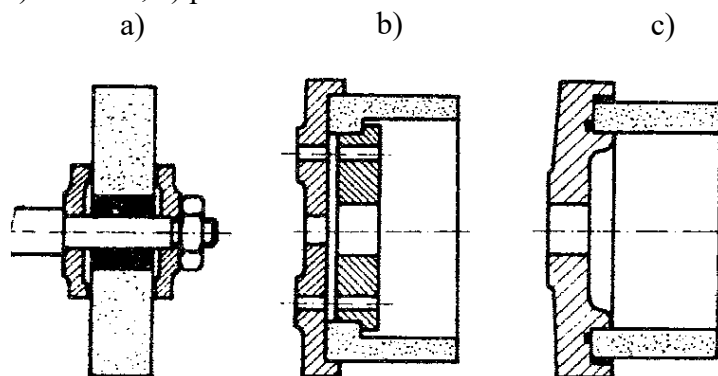
Pred samotným upnutím sa kotúč, ktorý je na trň nasadený, skúša poklepom drevenou paličkou ako je uvedené na Obr. 13. [8]



Obr. 13. Skúšanie brúsneho kotúča poklepom

Upínanie brúsnych nástrojov ktoré je uvedené na Obr. 14., rozdeľujeme:

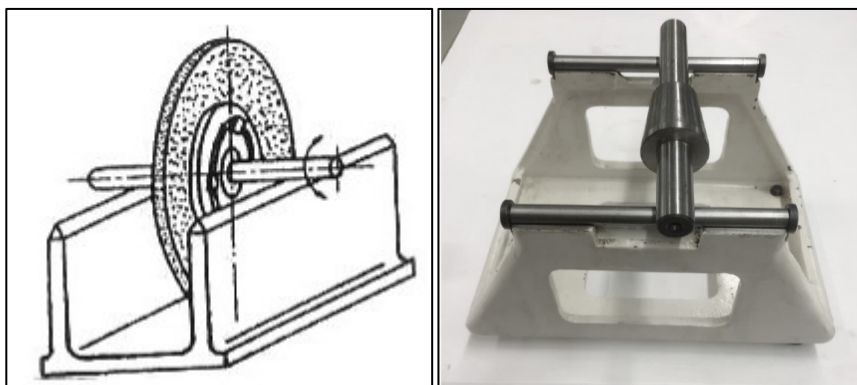
a) ploché, b) hrncové, c) prstencové



Obr. 14. Upnutie brúsnych kotúčov

1.3.3 Vybáženie brúsneho kotúča

Pri vyšších nárokoch na pokojný chod vretena brúsky treba vyvážiť brúsny kotúč. Odstredivé sily nevyváženého kotúča sú zdrojom vynútených kmitov, ktoré majú za následok zhoršenie kvality povrchu. Statické vyvažovanie brúsneho kotúča sa vykonáva na vyvažovacom stojane a prestavovaním teliesok v drážkach upínacej príruby. Pre presné brúsenie a pre vyššie obvodové rýchlosti než $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ treba brúsne kotúče o väčšej šírke ako 30mm vyvažovať aj dynamicky na špeciálnom vyvažovacom zariadení, kedy sa eliminuje tiež vplyv momentových dvojíc nevyvážených hmôt. Niektoré brúsky sú vybavené prídavným zariadením, ktorým možno vyvážiť kotúče za chodu brúsky priamo na vretene automaticky, alebo poloautomaticky. (Obr. 15.)



Obr. 15. Statické vyvažovanie

1.3.4 Orovnávanie brúsnych kotúčov

Brúsne zrná v kotúči môžu dobre uberať materiál len pokiaľ sú ostré a pokiaľ majú potrebnú medzeru pre triesku. Zrná celou svojou vyčnievajúcou časťou obvykle nevznikajú do obrobku, takže medzi spojivom a obrobkom sú medzery pre triesky. Tieto medzery sa postupným otupovaním brúsnych zrn a pôsobením rezných podmienok znižujú a môžu byť trieskami zanesené tak, že sa kotúč po čase zahradí a kotúč tým stráca rezné vlastnosti. Orovnávaním sa zanesené a otupené kotúče jednak zdršujú (ostrie), jednak sa renovuje ich tvar. Orovnáva sa ručne alebo strojovo nástrojmi, ktoré sa nazývajú orovnávače.

Okrem chemických a fyzikálnych vlastností, má tvar a geometria brúsneho kotúča pri brúsení veľký vplyv na dosiahnutú kvalitu povrchu a vznikajúce rezné sily. Orovanie môžeme definovať aj ako jemné obrobenie povrchu brúsneho kotúča, pri ktorom sú brúsne zrná vylamované, prerezované a štiepané. Brúsny kotúč je orovnaním tzv. "Naostrený" [10]

1.3.5 Samoostrenia brúsnych kotúčov

Brúsny kotúč by mal byť schopný sa ostriť sám, čo však by bolo možné len vtedy, keby jeho charakteristika (brusivo, zrnitosť, tvrdosť, spojivo) a obvodová rýchlosť boli vždy také, že by sa otupené brúsne zrná štiepili a lámali, popr. uvoľňovali skôr, než by sa kotúč mohol páliť. Tak ideálny kotúč je však k dispozícii len zriedka, pretože sa charakteristika kotúčov nedá udržať v dostatočnej a stálej presnosti.

S rýchlo ubúdajúcim kotúčom nemožno správne dokončiť jednotlivé operácie. Podobne nevhodný by bol aj naopak kotúč, ktorý by s ohľadom na maximálnu životnosť

bol zbytočne tvrdý, a preto málo výkonný. Preto sa obvykle používa kompromis, t.j kotúč o niečo tvrdší, než je podmienka pre samoostrenie.

Úmyslom orovnaní je vytvorenie, alebo obnovenie rezivosti na danom brúsnom kotúči, odstránenie brúseného materiálu a prachu zo štruktúry kotúča. Procesom orovnávaní je možné ovplyvniť kvalitu brúseného povrchu obrobku, resp. drsnosť jeho povrchu

Na orovnanie sa používajú rôzne orovnávacíe spôsoby a rôzne typy orovnávacích nástrojov. Môžeme ich rozdeliť do dvoch základných skupín:

- bezdiamantový orovnávač
- diamantový orovnávač

Bezdiamantový orovnávač je určený väčšinou pre vytvorenie hrubého tvaru kotúča alebo k menej presnému orovnaniu. Orovnáva sa buď ručne, alebo pomocou špeciálneho orovnávacieho zariadenia. [10]

2 KOMPOZITNÉ MATERIÁLY

Kompozitné materiály možno označiť ako širokú, rôznorodú skupinu materiálov. Zväčša sa však chápe kompozit ako taká látka, ktorá splňa tieto podmienky:

- skladá sa z najmenej z dvoch, chemicky výrazne odlišných zložiek, ktorých obsah je minimálne 5% z celkového obsahu materiálu
- zložky majú z makroskopického hľadiska rovnomerné rozloženie v celom objeme,
- bola vytvorená umelo,
- výsledné vlastnosti kompozitov sa odlišujú od vlastností zložiek [17].

Takéto podmienky vzájomne vylučujú združené prírodné materiály (napr. drevo ako združený materiál s ligninovou matricou, vystuženými celulóзовými vláknami), plátované materiály a i. V závislosti od vlastností možno rozdeliť kompozity na:

- kompozity so špeciálnymi fyzikálno-mechanickými vlastnosťami.
- kompozity s vysokými mechanickými vlastnosťami,

Prvá skupina sa používa predovšetkým ako funkčný materiál, napr.: v meracích prístrojoch. Druhá skupina sa používa ako konštrukčný materiál [17].

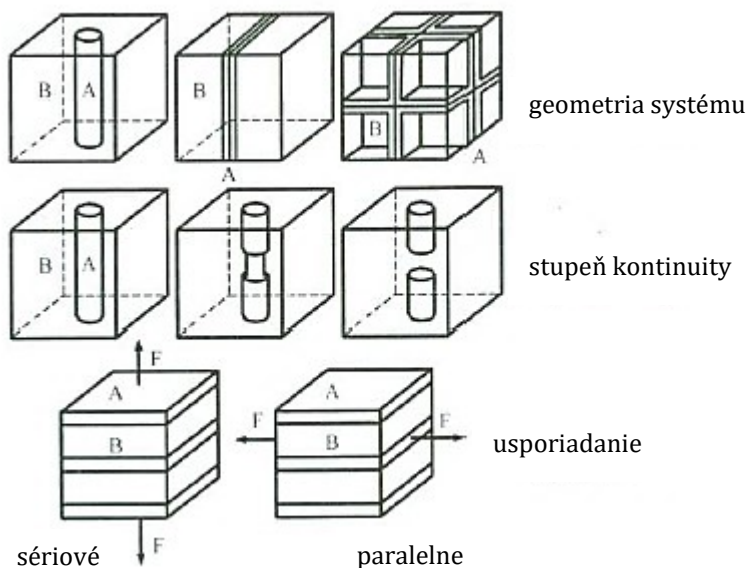
Kompozity možno označiť za materiály, ktoré vznikli fyzikálnou kombináciou existujúcich jednoduchých materiálov. Matrica, základná hmota má funkciu spojiva. Výstuž tvorí ďalšia zložka, vložená fáza, ktorá má spevňujúci účinok.

Na vlastnosti kompozitu zloženého z fáz A (matrice) a B (vlozenej fázy) majú vplyv najmä tieto parametre (Obr. 16.):

- objemový podiel zložiek V_a, V_b
- geometria systému, ktorá môže byť charakteristická
 - jednorozmernou kontinuálnou fázou (vlákno, tyčinka)
 - dvojrozmernou kontinuálnou fázou (doska, lamela)
 - trojrozmernou kontinuálnou fázou (priestorová sieť)
- stupeň kontinuity (od úplnej kontinuity po diskkrétne častice)
- usporiadanie fáz (extrémami sú usporiadania paralelne a sériové)

Vlastnosti kompozitu môžeme považovať za približne aditívne a dajú sa teda odvodiť od vlastností východiskových zložiek. Usporiadanie fáz výrazne ovplyvňuje mechanické vlastnosti kompozitov. Pri zaťažení paralelného modelu sa musí splniť podmienka

rovnakej deformácie fáz, pričom napätia prenášané fázami budú rôzne, pri sériovom modeli bude naopak rovnaké napätie vo fázach, ale budú sa rozdielne deformovať [17].



Obr. 16. Charakteristické vlastnosti kompozitov [17]

Z toho je možné odvodiť moduly pružnosti:

$$E_p = E_a \cdot V_a + E_b(1 - V_a) , \text{ paralelný modul} \quad (10)$$

$$E_s = \frac{E_a \cdot E_b}{E_b \cdot V_a + E_a(1 - V_a)} , \text{ sériový modul} \quad (11)$$

Modul pružnosti kompozitu so sériovým usporiadaním je vždy nižší než pri paralelnom a rozhodujúci vplyv na modul má poddajnejšia fáza. V skutočnosti nie je usporiadanie ideálne paralelné, alebo ideálne sériové a hodnoty modulu kompozitu ležia medzi hodnotami pre E_p a E_s [17].

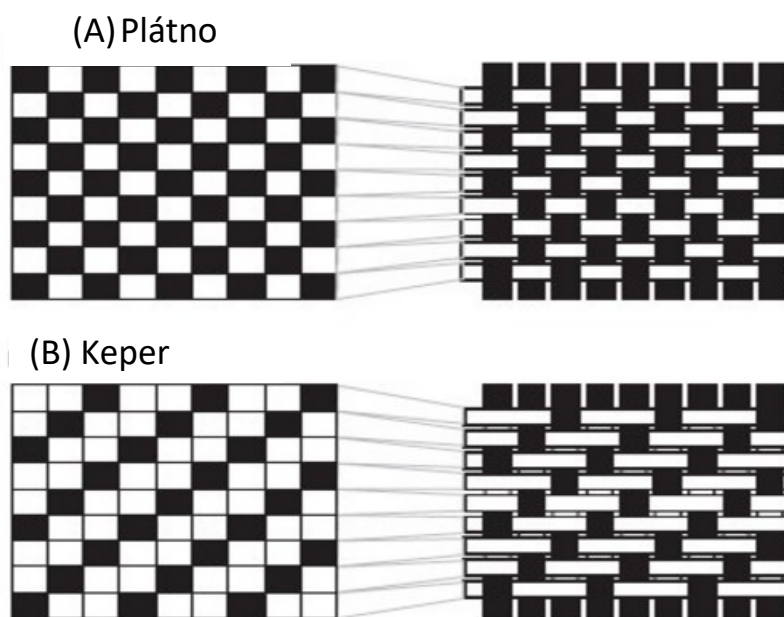
2.1 Kompozity na báze polymérov

Takmer všetky biologické systémy sú zložené z polymérov, ktoré spĺňajú buď funkcie mechanické (drevo, kosti, koža), alebo vplývajú v prírode na chemické reakcie (lístie, bunky).

Po tisícročia využíval človek prírodné polyméry, ale až v minulom storočí sa vyvinuli polyméry syntetické. Jednoduché syntetické polyméry majú menšiu tuhosť ako kovové materiály, ale aj menšiu ako drevo či kosti. Je to preto, že drevo aj kosti sú v podstate kompozitmi: ich polymérová matrica je spevnená vláknami, alebo časťami. Preto sa neskorší vývoj aj v oblasti plastov sústredil na kompozity. V súčasnosti existuje veľký počet kompozitov na báze polymérov, ktorý sa každoročne zvyšuje [17].

Vrstevné materiály (lamináty) vznikajú spojením viacerých vrstiev polyméru a vlozenej fázy. Vložená fáza nie je voľne uložená v matrici, ale jej jednotlivé vlákna sú navzájom spojené formou tkanín s rôznymi väzbami, alebo formou rohoží, prípadne rovingov (zväzkov vlákien). Výrobky z laminátov sa zhotovujú vrstvením tkanín, alebo rohoží tak, aby sa dosiahla požadovaná pevnosť a tuhosť so zreteľom na podmienky namáhania výrobku. Jednotlivé vrstvy sa nasycujú kvapalnými alebo práškovými živcami (UP, PF a pod.), ktoré sa v ďalšom štádiu vytvrdzujú. Medzi najpoužívanejšie vrstevné plasty podľa druhu výstuže možno zaradiť sklené lamináty. Sú to vrstevné materiály, zložené z vrstiev sklenenej výstuže a spojiva. K vrstevným plastom patrí aj tvrdý papier (napr.: umakart) a tvrdé tkaniny (textgumoid) vyrábané z papiera, resp. z bavlnených tkanín impregnovaných živcami a spracované lisovaním pri zvýšených teplotách. Lamináty sa používajú na stavbu častí karosérií niektorých automobilov. Sklené lamináty sa uplatňujú aj pri výrobe športových a turistických lietadiel (trupy a krídla). Tvrdé tkaniny sa používajú na klzné ložiská a tesnenia [17].

Špeciálnym prípadom vrstevných plastov sú sendviče. Ide o laminátové, alebo hliníkové potahy s jadrom z ľahčených plastov. Určené napr. na výrobu karosérii chladiarenských vozov a obytných prívosov [17].



Obr. 17. Typy tkania [18]

Plátňová väzba Obr. 17.(A) je vhodná na jednoduché spracovanie, pretože môže prísť k zvlneniu a tým k viditeľnej povrchovej vade. Zložité tvarovanie je veľmi ťažké. Táto väzba má však kvalitnú rozmerovú stratu a veľkú výhodu je malý otrep pri rezaní.

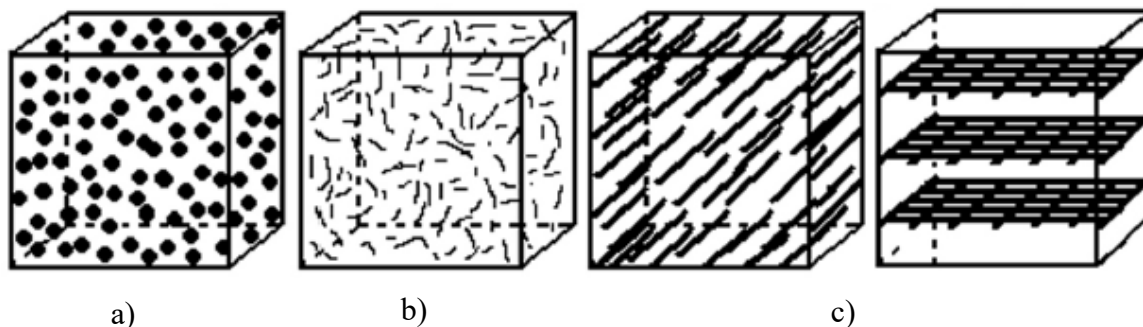
U keprové väzby Obr. 17.(B) je zvlnenie v oveľa menšej miere než väzba plátňová, preto tu je zaručená vyššia tuhosť a pevnosť laminátu. Usporiadanie vlákien tejto väzby prináša lepšiu schopnosť a spojenú možnosť výroby tvarovo zložitejších materiálov.

Vystužené polyméry sú materiály vytvorené spojením vlozenej fázy (plniva) a makromolekulárnej látky, väčšinou s cieľom zlepšiť mechanické vlastnosti. Polymérna zložka tvorí základnú spojitú maticu kompozitu. Plnivom je neprchavá prísada organického aj anorganického pôvodu. Podľa tvaru plniva môžeme vystužené plasty rozdeliť na kompozity s časticovým plnivom (sadze, minerálne látky, kovy ako Al, oxidy kovov) a na kompozity s vláknitým plnivom (vlákna sklené, bórovité, azbestové, bavlnené celulózoové, sisalové, grafitové, kovové). Základom vystužených polymérov sú najmä reaktoplasty. Plnivami sa však modifikujú aj termoplasty, napr.: PTFE plnený grafitom a práškovým bronzom sa používa na pohybové, nemazané tesnenia a klzné ložiská [17].

2.1.1 Rozdelenie podľa tvaru sekundárnej fázy

Rozdelenie kompozitov podľa tvaru sekundárnej fázy popisuje Obr. 18.:

a) časticové, b) s krátkymi vláknami, c) s dlhými vláknami [17]



Obr. 18. Rozdelenie kompozitných materiálov

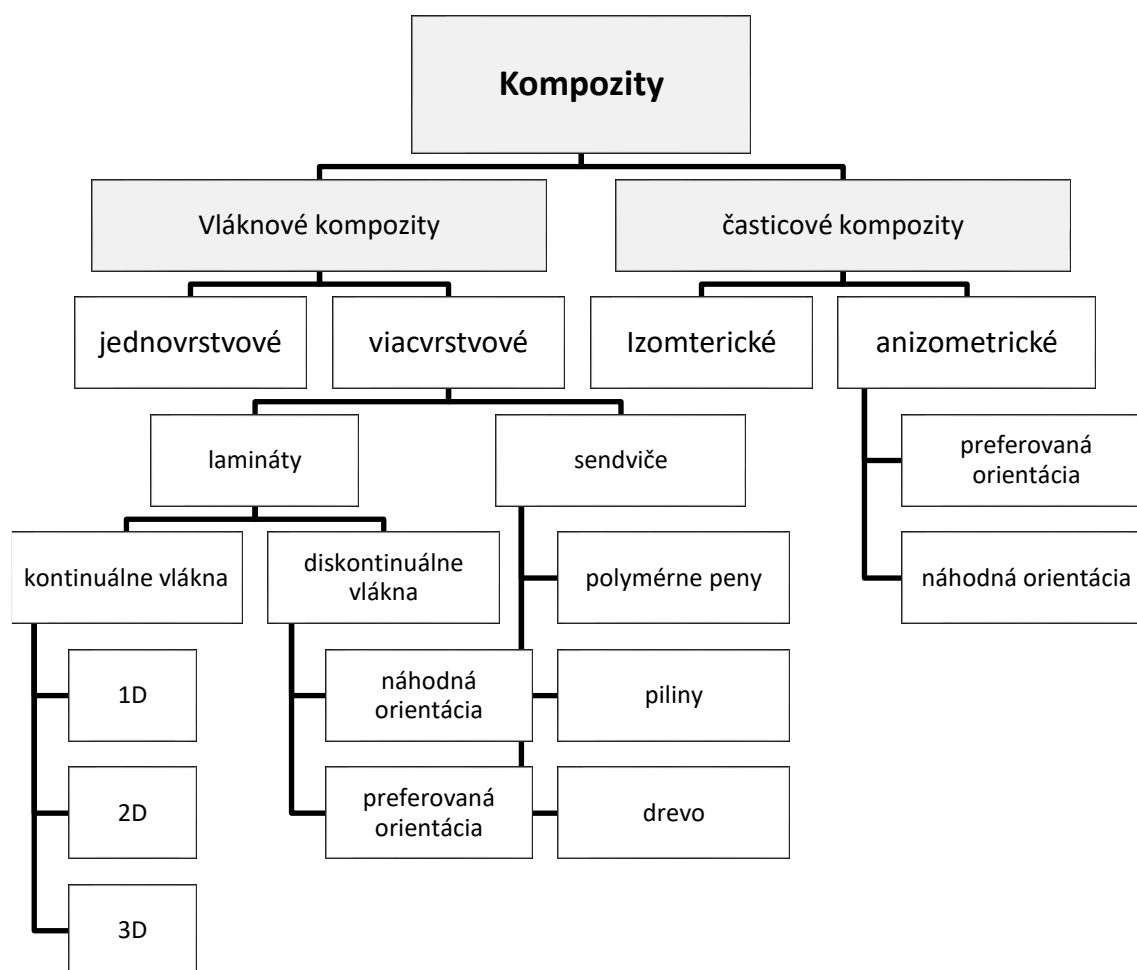
- a) Kompozity s časticovými vystužujúcimi fázami (Obr 18a): vystužujúce fázy tvoria diskkrétne častice obvykle tvrdého materiálu rovnomerne rozložené v mäkšej matrici. Častice môžu byť guľovité, ihlicovité, doštičkovité, príp. nepravidelného tvaru. Patrí sem:
- disperzne spevnené kompozity: obsahujú veľmi jemné častice sekundárnej fázy, ich priemer obvykle nepresahuje $0,25 \mu\text{m}$. Sú to kompozity s matricou spevnenou disperzne diskontinuálnou fázou [20]. Častice týchto veľkostí pôsobia ako prekážky pohybu dislokácií v matrici a majú významný spevňujúci účinok, ktorý sa väčšinou zachováva i pri vyšších teplotách (dobrá žiarupevnosť)
 - disperne spevnené materiály na báze hliníka
 - disperzne spevnené žiarupevné zliatiny [21],
- b) Kompozity s vystužujúcimi vláknami (Obr. 18b): jedným z významných typov sú vláknové kompozity skladajúce sa z matrice a vystužujúcich vlákien. Podľa dĺžky vlákien je možné ich rozdeliť do dvoch skupín: krátkovláknové (pomer dĺžka / priemer: $(L/D < 100)$), dlhovláknové ($(L/D > 100)$). Vlákna majú obyčajne o jeden až dva rády vyššiu pevnosť ako matrice a prenášajú tak takmer všetky napätia zaťažujúce kompozitný dielec. Dochádza tak k vzniku šmykových síl na rozhraní vlákno a matrice, ktoré v prípade adhézie medzi oboma komponentami umožňujú prenos všetkého napätia z menej pevnej matrice do vlákien. Tie sú schopné niesť všetky napätia

pôsobiace na kompozitný dielec, takže nepevné ale deformovateľné spojivo je prakticky bez napätí. Ako výstuž sa používajú najčastejšie vlákna sklenené, uhlíkové a kevlarové, matrice bývajú najčastejšie polyesterové, epoxidové, alebo fenolové [20]. Avšak v poslednej dobe sa začína klásť dôraz aj na kovové matrice. Krátkovláknové kompozity sa používajú predovšetkým na vstrekané výlisky, alebo pre extrudované plastové výrobky.

- c) Kompozity vrstevné(whiskery) (Obr. 18c). Dlhovláknové kompozity sa často používajú pri veľkých konštrukciách ako sú lode, tlakové nádoby, krídla veterných turbín. Závisí to však od druhu použitých vlákien a ich vlastností. Rozdelenie kompozitov podľa výstuže a jej usporiadania je znázornené na Obr. 19.

Tab. 2. Pevnosť niektorých vlákien a whiskerov

Vlákno	R_m [MPa]	Whisker	R_m [MPa]
B	3500	Al_2O_3	21000
W	2800	B_4C	14000
Be	1400	SiC	21000
C	2100	C	20000
Borsic	3150	Fe	13400



Obr. 19. Rozdelenie kompozitov podľa geometrie výstuže

2.1.2 Rozdelenie podľa veľkosti vlákien

Podľa veľkosti obsahujúcich vlákien rozdeľujeme kompozity na:

- makrokompozity
- mikrokompozitné materiály
- nanokompozity

2.1.3 Rozdelenie podľa typu matrice

Podľa materiálu matrice rozdeľujeme kompozity na:

- kompozity s kovovou maticou

- Kompozity s polymérou matricou (epoxidové, polyesterové a polyamidové živice, polyetylén a polypropylén)
- kompozity s keramickou matricou (SiC, ZrO₂, Al₂O₃, Si₃N₄)

2.1.4 Lamináty

Ako kompozitné materiály (lamináty) sa označujú látky skladajúce sa z niekoľkých jednotlivých materiálov, ktoré boli spojené do jedného celku. Tým sa spájajú žiaduce vlastnosti jednotlivých materiálov v jednej látke [22].

Látka, ktorá v spojení spôsobuje zvýšenie pevnosti či tvrdosti, sa nazýva spevňovacia zložka, alebo spevnenie materiálu, zatiaľ čo látka, ktorá zaisťuje súdržnosť materiálu označujeme ako spojivo, alebo matrica. Pokiaľ sa spevňovacia zložka skladá z vlákien hovoríme o laminátoch [22].

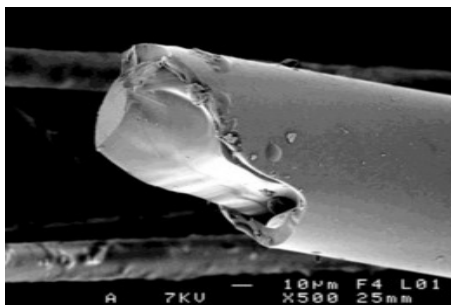
Prostredníctvom spevňovania sa zvyšuje pevnosť, tuhosť a tvrdosť kompozitných materiálov. Okrem toho je možné v závislosti na kombináciu zložiek zmeniť taktiež aj ostatné vlastnosti, napr.: tepelnú a elektrickú vodivosť, tepelnú odolnosť a odolnosť proti oteru. Spevňovacie pôsobenie vlákien a mechanické vlastnosti kompozitného materiálu sú dané jednotkami dĺžky, priemerom a chemickým zložením vlákien a tiež ich množstvom a polohou [22].

Pre použitie materiálu matrice sa hodia všetky dobré tekuté termoplasty a duroplasty vrátane elastomerov a emulzií. Z termoplastov sa okrem polykarbonátu (PC), polystyrénu (PS) a polyetylénu (PE) používa prevažne polypropylén (PP) a polyamid (PA). Z duroplastov sa kvôli vynikajúcim mechanickým a elektrickým vlastnostiam, ale aj kvôli veľmi priaznivým vlastnostiam zosieťovaniu používajú predovšetkým epoxidové živice (EP), ale používajú sa tiež aj polyesterové, silikónové či vinylesterové živice [22].

Veľká výhoda laminátov spočíva v tom, že vhodným zložením vlákien a matrice je vždy možné vytvoriť materiál, špeciálne určený pre potreby užívateľa. Okrem skla, klasického vláknitého materiálu, sa do základného polyméru pridávajú predovšetkým porovnateľné uhlíkové vlákna [22].

2.1.5 Sklolamináty

Sklolamináty sa väčšinou skladajú z duroplastov, polyesterových, alebo epoxidových živíc a sklenených vlákien. Pretože sa s jednotlivými sklenenými vláknami ťažko manipuluje, spracovávajú sa ako premeny, alebo ako tkanina siete, či rúna. Behom výroby tvarových dielov je plast tekutý a neskôr sa vytvrdzuje [22].



Obr. 20. Sklenené vlákno

Vlastnosti sklolaminátu sú dané používaním živice a typom sklenených vlákien, podielom sklenených vlákien na celkovom objeme a ich usporiadaní. Pevnosť sa zvyšuje s rastúcim obsahom vlákien a s ich usporiadaním do jedného smeru [22]. Vplyv spevnenia na pevnostné mechanické vlastnosti popisuje Tab. 3.

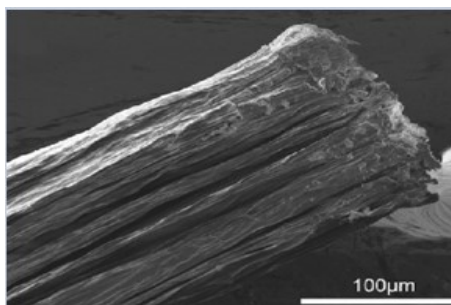
Tab. 3. Typ spevnenia

Typ spevnenia	Obsah hmot. %	Modul pružnosti E [MPa]
Sieť zo skleneného hodvábia	25	6000
	35	8000
	45	10000
Tkanina so skleneného hodvábia	45	12000
	55	16000
	65	20000
Prameň so skleneného hodvábia	75	40000

2.1.6 Plasty spevnené uhlíkovým vláknom

Súčiastky z plastov spevnených uhlíkovým vláknom sa skladajú z vysoko tvrdých a teplotne stabilných vlákien na báze uhlíku, ktorá určuje ich pevnosť a sú vložené do duktilných matric a nízkou tepelnou pevnosťou. Rôzne uhlíkové vlákna pritom môžu byť spojené s najrôznejšími spôsobmi s príslušnou polymérou matricou. To dáva veľké množstvo kombinácií materiálu, ktoré majú z časti dosť odlišné vlastnosti. Tieto materiály sa označujú súhrnným názvom plasty spevnené uhlíkovým vláknom (CFRP z angl. - Carbon fiber reinforced polymer) [22].

Pokiaľ možno efektívne využiť vynikajúci profil vlastností sa dnes z pravidla používajú uhlíkové vlákna vo forme nekonečných vlákien pri objemovom podiele vlákien 50-65% [22].



Obr. 21. Uhlíkové vlákno

Plasty spevnené uhlíkovým vláknom sa prvom rade používajú v leteckom priemysle, alebo tiež v strojárstve a samozrejme aj všade tam kde je treba vyhovieť rôznymi špeciálnymi požiadavkami, napr.: na zníženie zotrvačnosti či na dobré vlastnosti tlmenia. Pre ďalšiu oblasť využitia týchto materiálov môžeme menovať športové vybavenie pre voľný čas (napr.: tenisové rakety, surfy, chrániče a pod.) [22].

Vlastnosti uhlíkových vlákien:

- uhlíkové vlákna majú proti syntetickým vláknam progresívne deformačné správanie,
- nízka hustota $\rho = 1,6$ až $2,0 \text{ g.cm}^{-3}$,
- mimoriadne vysoká odolnosť voči korózii ,
- dobrá tepelná a elektrická vodivosť $\sigma \approx 6,7 \cdot 10^4 \text{ S.m}^{-1}$,
- uhlíkové vlákna sú v porovnaní so sklenenými vláknamy silno anizotropné,

- uhlíkové vlákna sú za normálnych podmienok veľmi krehké a pri spracovávaní sa ľahko lámu. Pri spracovávaní povrchu sa upravuje apretácia na báze epoxidového kryštálu. Slúži ako ochrana pri spracovávaní a súčasne ako prostriedok pre zlepšenie väzby medzi vláknom a matricou,
- uhlíkové vlákna majú vysokú odolnosť proti dlhodobému dynamickému namáhaniu. Dynamické vlastnosti laminátu s uhlíkovými vlákňinami sú lepšie ako u ostatných materiáloch. [22]

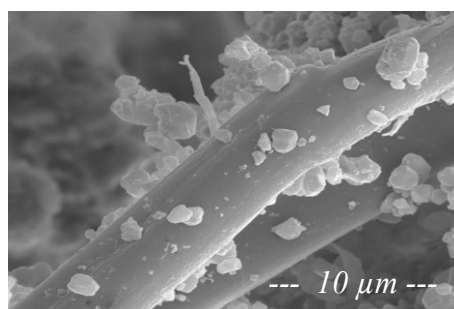
Vývoj spracovania uhlíkových vlákien podľa jednotlivých kontinentov uvádza Tab. 4.

Tab. 4. Spotreba technických uhlíkových vlákien v tonách [22]

	1993	1997	2002	2004	2007
USA	3 650	6 260	5 670	13 700	7 950
Európa	1 220	2 260	5 200	7 100	8 660
Japonsko	1 970	2 580	2 860	12 800	3 500
Juhovýchodná Ázia	1 450	1 800	2 700	2 000	4 200
ostatné	1 290	1 380	2 510	-	3 270
celkom	9 580	14 280	18 940	35 000	27 580

2.1.7 Aramidové vlákna

Sú to vlákna na báze lineárnych organických polymérov, ich kovalentné väzby sú orientované podľa osy vlákna. Prednosťou týchto vlákien je vysoká pevnosť a tuhosť [22].



Obr. 22. Aramidové vlákno

V Tab.5 sú uvedené vybrané mechanické vlastnosti aramidových vlákien

Tab. 5. Mechanické vlastnosti aramidových vlákien [22]

Aramid	Hustota [g.cm ⁻³]	Priemer [μm]	Medza pevnosti v ťahu [N.mm ⁻²]	Ťažnosť
vysokoťažný	1,45	12	3600	4,0
s vysokou tuhosťou	1,45	12	3800	2,8
ultratuhý	1,45	12	3400	2,0

Vlastnosti aramidových vlákien:

- je to najľahšie vystužené vlákno s hustotou $\rho = 1,45 \text{ g.cm}^{-3}$, z čoho plynie vysoká pevnosť v ťahu, jeho vlastnosti sú silne anizotropné, znamená to, že jeho vlastnosti merané v smere vlákna sa líšia od vlastností meraných v priečnom smere,
- Medza pevnosti v tlaku v smere vlákna je výrazne nižšia než medza pevnosti v ťahu. Pri navrhovaní konštrukcií z aramidových vlákien je preto nutné počítať ich citlivosťou na zaťaženie tlakom, pôsobiacich v pozdĺžnom smere,
- Aramidové vlákna sú hydrofilné, absorbujú vlhkosť (až do 7%). Vlhkosť ovplyvňuje pevnosť spoja medzi vláknom a matricou, preto vlákna musia byť pred použitím vysušené. Absorbovaná vlhkosť neovplyvňuje iba pevnosť spoja vlákna s matricou, ale i pevnosť vlastného vlákna.
- U aramidových vlákien dochádza pri expozícii žiarením s vysokou energiou k výraznému poklesu pevnosti.
- Aramidové vlákna nie sú príliš odolné vysokým teplotám. Vo forme kompozitu odolávajú teplote až 300°C, neroztavia sa a preto sú vhodné pre protipožiarne ochranné obleky (KEVLAR).
- Lubrikácia vlákien má na niektoré spojivové systémy zmäkčujúci účinok. V problematických prípadoch je potrebné vlákno delubrikovať v organických rozpúšťadlách.
- Vytvrdené konštrukčné prvky z aramidových kompozitov sa obtiažne obrábajú [22].

2.1.8 Matrica kompozitov

Matrica je spojivo výstuže vo vláknových kompozitoch. Vlákná musia byť v kompozite zaфіxované tak, aby bolo možné zavádzať a odvádzať záťaž. K prenosu síl dochádza s pomocou adhézie medzi vláknovou výstužou a matricou. Úlohou matrice je tiež chrániť výstuž proti vonkajším vplyvom. Modul elasticity vláknien v pozdĺžnom smere musí byť väčší ako modul materiálu v matrici. Ťažnosť matrice musí byť vyššia ako ťažnosť vláknien, zatiaľ čo pevnosť vláknien musí byť väčšia ako pevnosť matrice.

Zďaleka najpoužívanéjšie sú polymérové matrice, pre špeciálne účely sú na matricu vhodné tiež kovové, keramické materiály a uhlík. Polymérové matrice sa zvyčajne delia na reaktoplastové a termoplastové, od ktorých sa niekedy odlišuje malá skupina matric z elastomérov, pri čom sa viac ako 90% matric zhotovuje z reaktoplastov.

Kvalita vzájomnej väzby výstuže s matrice má značný vplyv na mechanické a termické vlastnosti kompozitu. K zvýšeniu priľnavosti sa preto textilné vlákna napúšťa šlichtou, alebo vhodnými chemikáliami, prípadne sa ožarujú (aramidové vlákna) ultrafialovými lúčmi. Váhový podiel šlichty obnáša spravidla 1,5%, do šlichty sa pridáva 0,05% silanu, najčastejšie tzv. Organosilan. [22]

Vytvrdzovanie matrice je zložitý proces spojený s vývojom tepla, zvýšením viskozity a zmenšením objemu. Niektoré technológie si vyžadujú prídavok urýchľovača, veľmi dôležitou charakteristikou vytvrdzovacieho procesu je doba želatinácie. Napríklad na výrobu prepregu sa živica musí dostať z kvapalného stavu do pred vytvrdeného stavu (tzv. Resitol), v ktorom už živica netečie, je ale lepivá a po ohriatí sa dotvrdí. Konečný stav vytvrdenej živice (Resin), sa vyznačuje nelepivosťou, nerozpustnosťou a vysokou teplotou.

U tenkých laminátov je najvhodnejší spôsob vytvrdzovania zväzkom elektrónov, ktoré spôsobuje polymerizáciu a zosieťovanie živice citlivé na ožiarenie. Ďalej možno použiť röntgenové lúče a mikrovlnný ohrev. Medzi nové formy patrí použitie ultrafialového žiarenia (UV) u živice s pridanými fotoiniciátormi. [22]

Spevňujúca zložka (plnivo) sa pripravuje oddelene, ešte pred výrobou kompozitu. Častice spevňujúcej fázy sa musia vmiešať do taveniny. Hlavným nedostatkom, ktorý sa musí pri tomto spôsobe výroby prekonať je medzifázová reakcia medzi spevňujúcimi časticami a matricou. Spevňujúca zložka môže byť amorfná, polykryštalická alebo monokryštalická. Práškové spevňujúce častice sú tuhé látky, ktorých maximálny rozmer je menší

ako 1 mm. Pevné a tuhé vlákna uložené v mäkšej a plastickej matrici zvyšujú pevnosť, tuhosť, únavovou odolnosť a mernú pevnosť kompozitu. Matrica prenáša vonkajšie zaťaženie na vlákna a zaručuje potrebnú plasticitu a húževnatosť. Jednosmerné uloženie priebežných vlákien sa využíva k zámernému získaniu anizotropných vlastností výrobku. Menší stupeň anizotropie zaisťujú kolmé usporiadanie vlákien. Spevňujúce častice môžu byť termodynamicky stabilné, budú mať lepšiu kompatibilitu k medzifázovému rozhraniu pri spevňovaní, ktorá vedie k zníženiu porušenia pri zvýšených teplotách, medzifázové rozhrania. Ak sú spevňujúce častice a matrica čisté, prispieva to k pevnosti týchto hraníc. Pevnosť tejto zložky je mnohonásobne vyššia ako pevnosť matrice, no vlastnosti kompozitu majú byť lepšie ako vlastnosti fáz, ktoré ho vytvárajú. [22]

2.2 Technológia výroby kompozitov

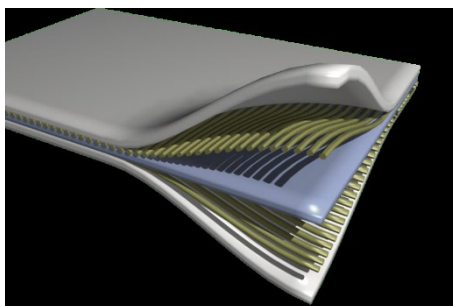
Metódy prípravy kompozitných materiálov spevnených časticami sa rozdeľujú podľa spôsobu vzniku sekundárnej fázy v matrici a podľa použitej technológie. Výhoda metód závisí od zvoleného materiálu, zvolených kritérií výroby, ekonomiky, náročnosti prípravy a v neposlednom rade aj od technického vybavenia laboratória.

Komponenty z kompozitných materiálov je možné vyrobiť viacerými technológiami. Výber technológie závisí od tvaru vyrábaného komponentu, požiadaviek na jeho mechanické vlastnosti, kvalitu štruktúry a povrchu, výšky nákladov ochotných vynaložiť na výrobu výrobku a od požadovanej produktivity. Spôsoby vytvárania kompozitných materiálov sú [22]:

- Presycovanie výstuže kvapalnou fázou (nanášanie tekutej matrice na povrch vlákien).
- Vákuová, alebo tlaková impregnácia výstuže tekutou matricou.
- Namáčanie výstuže v matrici a jej následné tvarovanie.
- Infiltrácia vlákien tekutou matricou zo spodnej strany, z vrchnej strany a kombinovane (zaliatie, nasypenie alebo ponorenie výstuže).
- Práškovou metalurgiou (lisovaním za studena a následným spekaním).
- Zlisovanie za tepla (matrica sa pri lisovaní za tepla roztaví a výstuž sa rozmiestni v jej objeme).
- Nástrekom matrice s krátkou výstužou
- Infiltráciou plynnej fázy (penové kompozitné materiály.)

- Infiltráciou tekutej výstuže (náter pórovitých materiálov).
- Valcovaním za tepla (pri kontinuálnom laminovaní zavalcovaním výstuže umiestnenej medzi fóliami matrice).
- Elektrolytickým nanášaním kovu.

Tieto spôsoby tvorby kompozitných materiálov sa uplatňujú v rôznych technológiách výroby komponentov z kompozitných materiálov, ktorými sú: ručné kladenie za mokra, striekanie, lisovanie za studena, lisovanie pomocou vákua (VBM), lisovanie prepregu, lisovanie v autokláve (Obr. 27), lisovanie za tepla a tlaku, injektážna a infúzna technológia, vysokotlakové RTM vstrekovanie, vákuo-injekčná technológia (VARTM), vákuové presycovanie, technológia ťahania, kontinuálne laminovanie, navíjanie, odstredivé liatie, odlievanie. [22]

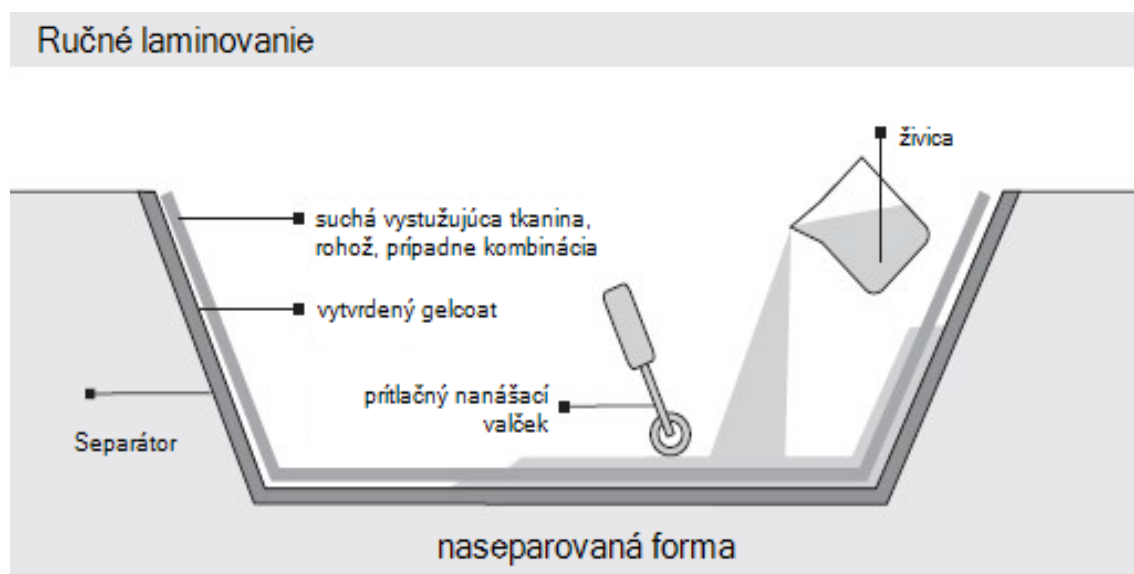


Obr. 23. Schematické znázornenie a príklad kompozitného materiálu

2.2.1 Ručné kladenie za mokra (laminovanie)

Ručné laminovanie (Obr. 24.) sa používa na výrobu škrupinových komponentov. Výroba laminátov je obľúbenou metódou pri výrobe karosárskych dielov prototypov. Výrobky vyrobené laminátovaním majú dobré mechanické vlastnosti a môžu byť vyrobené s viditeľnou štruktúrou kontinuálnych výstužných vlákien. Výroba je technicky nenáročná, nenákladná, má veľký rozsah uplatnenia a je použiteľná na výrobu komponentov aj s väčšími rozmermi. Na formu sa naniesie separačná vrstva, ktorá zabezpečí, aby sa forma a vyrábaný komponent nezlepili. Výber separátoru závisí od drsnosti povrchu formy, teploty vytvrdzovania a typu matrice budúceho komponentu. Po vyleštení separačnej vrstvy sa do formy naniesie vrstva živice (epoxidovej alebo polyesterovej), na ktorú sa uloží tkanina výstuže, ktorá musí živicom presiaknuť. Živica sa nanáša valčekom, stierkou, alebo štetcom.

Celá plocha tkaniny musí byť dokonale premočená. Cyklus sa opakuje pokiaľ sa nedosiahne požadovaná hrúbka, alebo počet vrstiev tkaniny. Po zatvrdnutí sa komponent vyberie z formy, orežú sa pretŕčajúce okraje výrobku a povrch sa vyleští a nalakuje. Nevýhodou laminovania do jednodielnej formy je, že jednou operáciou nie je možné zhotoviť viacej rôzne orientovaných funkčných plôch a taktiež väčšia prácnosť výroby. Ručné kladenie tkaniny výstuže tvorí základ aj pri iných technológiách. [23],[24]

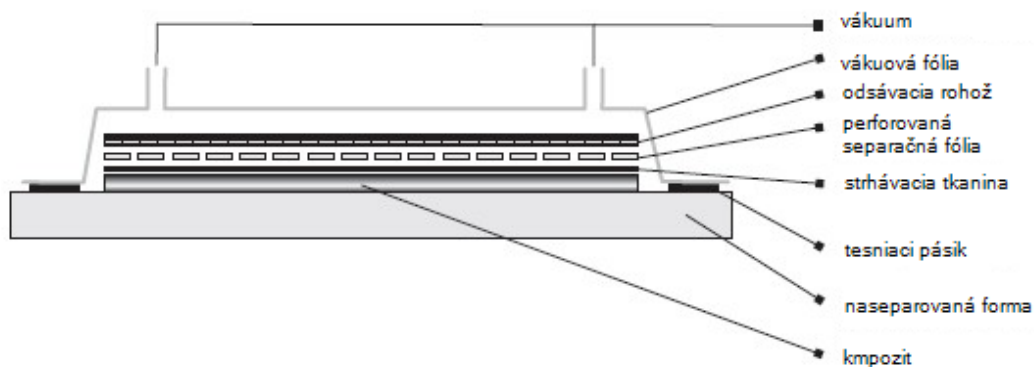


Obr. 24. Schéma ručného laminovania

2.2.2 Technológia VBM

Vacuum Bag Molding má rovnaký postup ako ručné kladie za mokra. Na poslednú premočenú vrstvu sa položí perforovaná separačná fólia. Ďalšiu vrstvu tvorí odsávací vrstva (absorpčná tkanina), ktorej úlohou je nasiaknuť prebytočnú živicu. Takto vyskladaná forma sa vloží do vreca z ktorého sa odsaje vzduch. Vákuum zabezpečí zníženie počtu pórov v kompozite, stlačenie vrstiev výstuže atmosférickým tlakom, a vytlačenie prebytočnej živice. Schéma technológie VBM je na Obr. 25. [25]

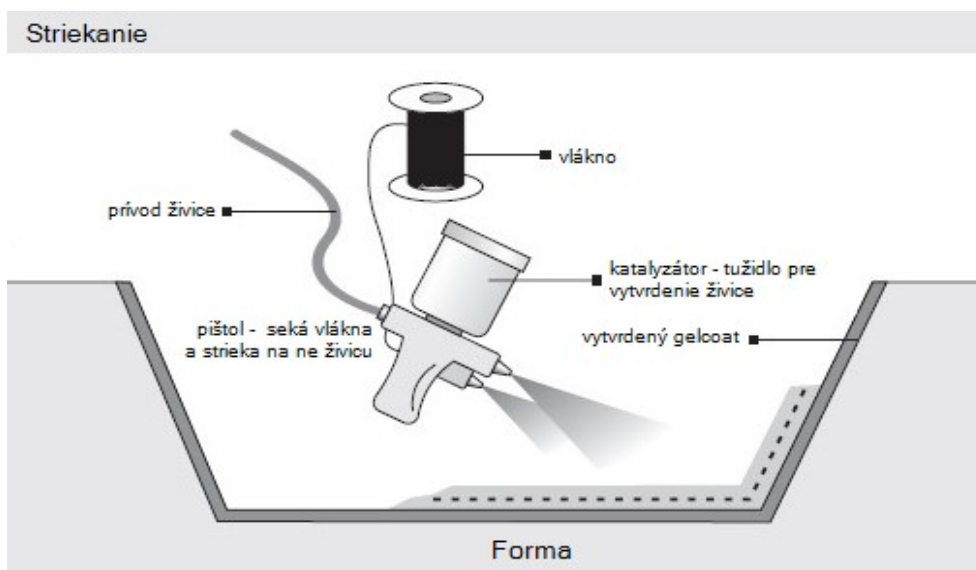
Lisovanie pomocou vakua



Obr. 25. Schéma usporiadania vrstiev pri VBM

2.2.3 Striekanie

Pri tejto technológii sa matrica aj sekané vlákno nanáša do naseparovanej formy špeciálnou pneumatickou striekacou pištoľou. Nástrek sa realizuje vo viacerých vrstvách a vrstvy sú zhutňované pomocou valčekov, čím sa odstraňuje aj zachytený vzduch. Striekanie môže byť vykonávané ručne alebo automatický (strojom). Schéma technológie je na Obr. 26. [25]



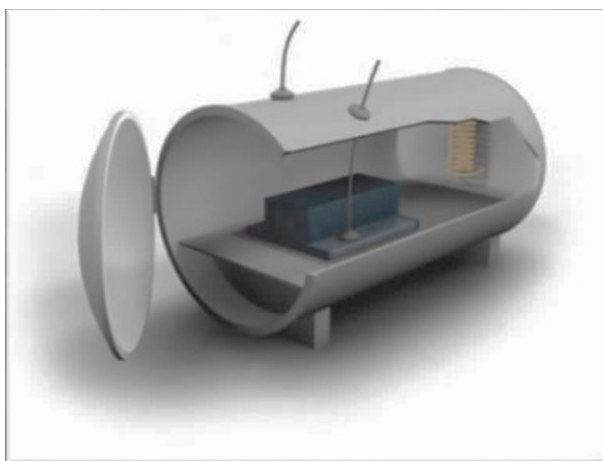
Obr. 26. Schéma výroby kompozitu pomocou technológie striekania

2.2.4 Lisovanie z prepregu

Technológia spočíva v ručnom ukladaní prepregu s lepkavým povrchom do jednej časti naseparovanej formy. Prepreg je polotovár, materiál v podobe vopred naimpregnovanej tkanina s epoxidovou živicom, ktorý vytvrdne pri zvýšenej teplote. Naukladaný polotovar sa lisuje v uzavretej dutine medzi vyhrievanými časťami formy. Vzduch zachytený na prepregu, ktorý je uväznený v zatvorenej forme, často spôsobuje pórovitosť výrobkov (nepodarky). [23]

2.2.5 Technológia výroby v autokláve

Technológia sa používa na výrobu pohľadových komponentov z kompozitných materiálov s viditeľnou orientáciou kontinuálnych výstužných vlákien. Autokláv je nádoba, v ktorej je možné zvýšiť tlak aj teplotu. Do jednostrannej formy s aplikovanou tenkou separačnou vrstvou sa ručne ukladajú prepregy vyrezané na CNC rezačke (plotri), ktoré sú po uložení prikryté separačnou perforovanou fóliou a tkaninou vsiakajúcou prebytočnú živicu a spolu s formou sú vložené do obalu, v ktorom sa vytvorí vákuum. Takto pripravená zostava s prepregmi sa vloží do autoklávu, kde kontrolovaným procesom prepregy vytvrdnú. Kombinácia tlaku v autokláve a vákuu vytvoreného na formu zabezpečí minimálnu pórovitosť súčiastky. [23]



Obr. 27. Schéma autoklávu [25]

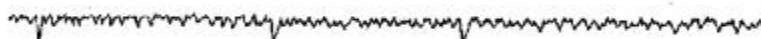
3 DRSNOST' POVRCHU

Drsnost' povrchu je definovaná ako súhrn nerovností povrchu s relatívne malými vzdialenosťami vznikajúcich ako dôsledok použitej technológie výroby (CSN EN ISO 4287). [28]



Obr. 28. Štruktúra povrchu

Mikronerovnosť - jemná nerovnosť (drsnosť povrchu) - je daná stopami, ktoré zanecháva rezný nástroj, prípadne brusivo. [28]



Obr. 29. Drsnosť povrchu

Makronerovnosť - rozľahlejšie periodická nerovnosť (vlnitosť povrchu) - najčastejšie spôsobujú vibrácie sústavy Stroj - Nástroj - Obrobok – Prostredie. [28]



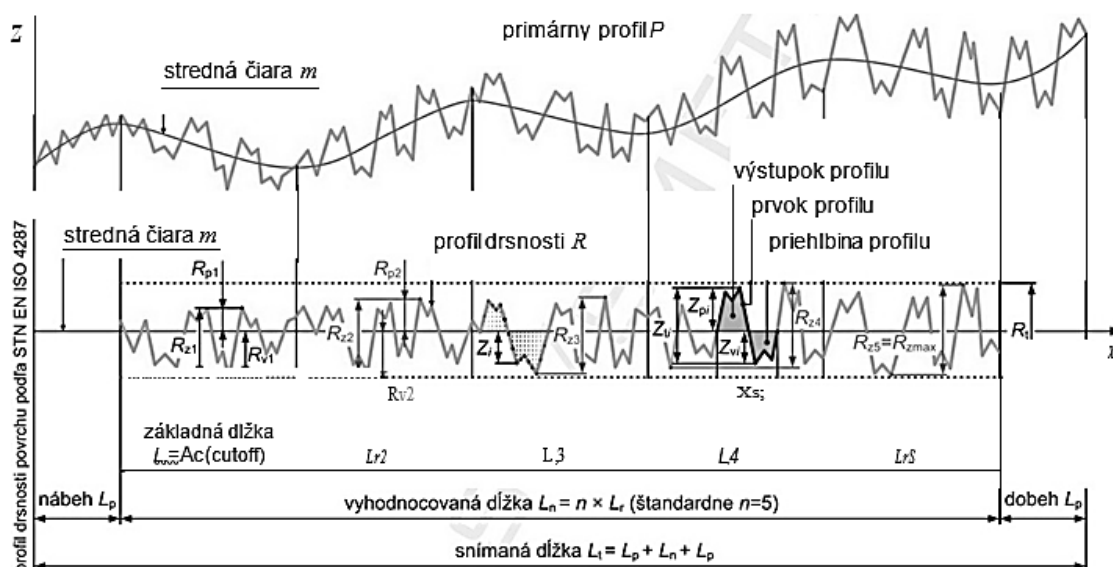
Obr. 30. Vlnitosť povrchu

3.1 Parametre povrchu profilu

- P (parameter štruktúry) - parameter vypočítaný zo základného profilu
- R (parameter drsnosti) - parameter vypočítaný z profilu drsnosti
- W (parameter vlnitosti) - parameter vypočítaný z profilu vlnitosti

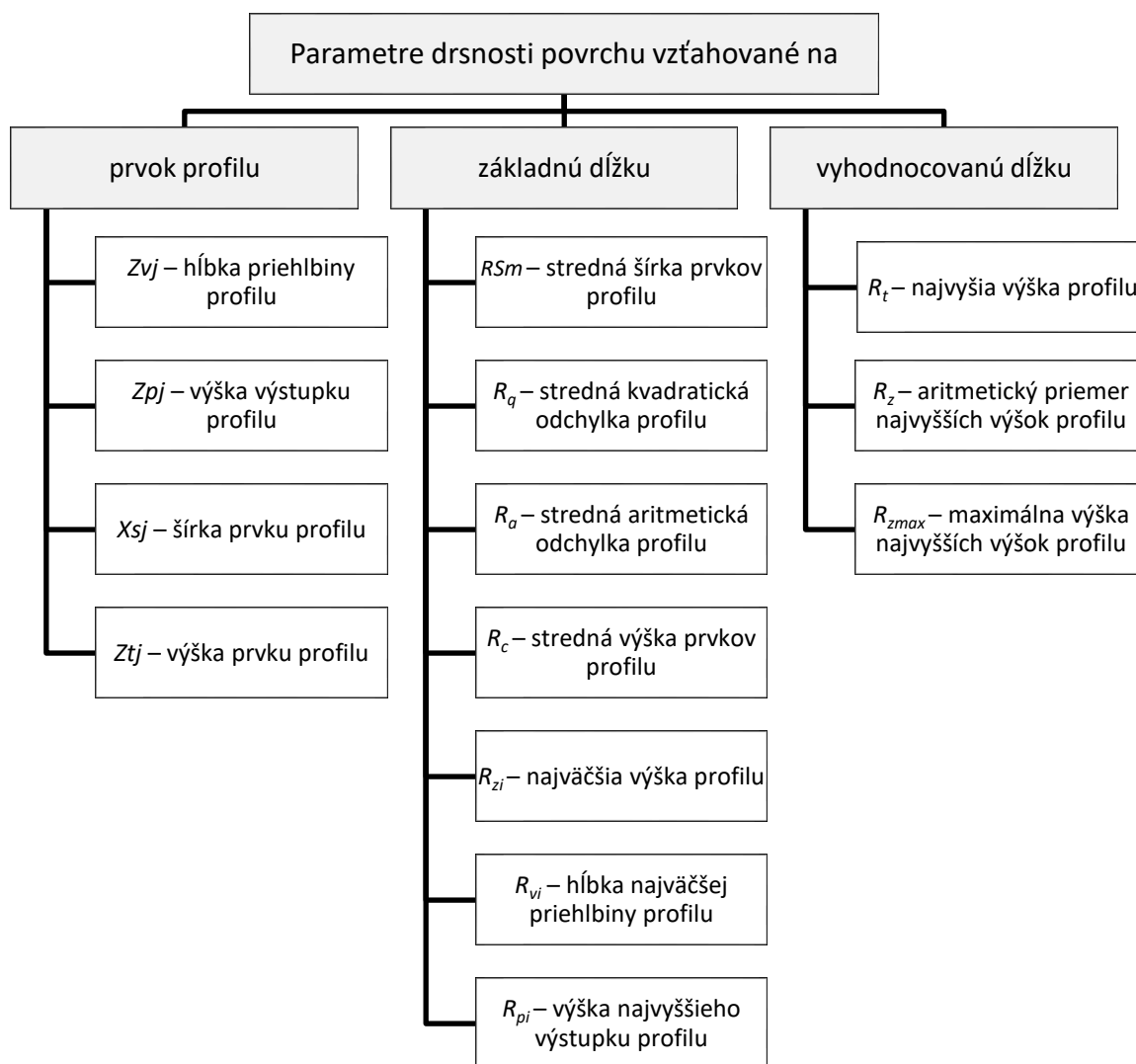
V praxi sa vo veľkej miere drsnosť povrchu kontroluje dotykovým spôsobom profilovou metódou. Snímaný profil, nazývaný primárny profil, obsahuje okrem zložiek drsnosti aj ďalšie zložky (vlnitosť a tvar), ktoré je pre vyhodnotenie drsnosti potrebné eliminovať filtrowaním . Po odfiltrowaní sa získa profil drsnosti Obr. 29. [28]

Z merania dotykovou metódou sa nevyhodnocuje celá snímaná dĺžka L_t . Na začiatku a konci snímania dochádza k nežiaducim rušeniam spôsobeným rozbehom a dobehom snímača. Odstránením týchto častí profilu sa získava vyhodnocovaná dĺžka L_n . Vyhodnocovaná dĺžka sa delí na niekoľko základných dĺžok L_r (označená tiež λ_c zvyčajne je 1 až 5). Stredná čiara profilu m rozdeľuje skutočný profil tak, že v rozsahu základnej dĺžky je súčet štvorcov odchýlok profilu od tejto čiary minimálny. V rámci každej základnej dĺžky sa samostatne vyhodnocujú charakteristiky v pozdĺžnom a priečnom smere. Najčastejšie vyhodnocovanými parametrami drsnosti povrchu sú: stredná aritmetická odchýlka povrchu R_a , aritmetický priemer najväčších výšok profilu R_z a maximálna hodnota najväčších výšok profilu R_{zmax} . [28]



Obr. 31. Základné parametre drsnosti

Parametre drsnosti sú vzťahované alebo na prvok profilu, základnú alebo na vyhodnocovanú dĺžku. Bližšie parametre popisuje Obr. 32.



Obr. 32. Základné parametre drsnosti povrchu

Na vyhodnocovanie drsnosti sa najčastejšie používa systém strednej čiary, normalizovaný podľa ČSN EN ISO 4287.

Pri hodnotení v systéme strednej čiary sa používajú tieto kritéria drsnosti:

- Stredná aritmetická odchýlka profilu R_a – je stredná aritmetická hodnota absolútnych odchýlok profilu v rozsahu základnej dĺžky:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l [y(x)] dx \text{ alebo } R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [y(x_i)] \text{ , } [\mu\text{m}] \quad (12)$$

- Výška nerovností R_z je definovaná ako stredná hodnota z absolútnych hodnôt výšok piatich najvyšších výstupkov profilu a hĺbok piatich najnižších prehĺbení profilu v rozsahu základnej dĺžky:

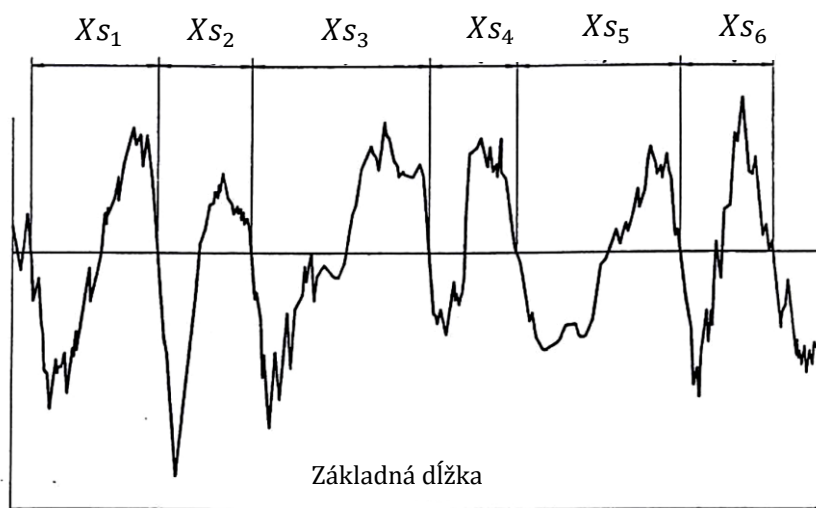
$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 (y_{pi}) + \sum_{n=1}^5 (y_{vt})}{5}, [\mu\text{m}] \quad (13)$$

- Maximálna výška nerovností profilu R_m je výšková charakteristika drsnosti povrchu, určená vzdialenosťou medzi čiarou prehĺbení profilu a čiarou výstupkov profilu v rozsahu základnej dĺžky[11]:

$$R_m = y_{pmax} + y_{vmax}, [\mu\text{m}] \quad (14)$$

- Priemerná šírka prvkov profilu RSm - patrí medzi frekvenčné parametre. Členitosť povrchu je v príslušnej norme identifikovateľná cez strednú šírku prvku profilu RSm . Tento parameter na rozdiel od výškových závislí od vzdialenosti vrcholkov a priehĺbín. Priemerná šírka prvkov profilu RSm - je aritmetický priemer širok Xs prvkov profilu v rozsahu základnej dĺžky. [28]

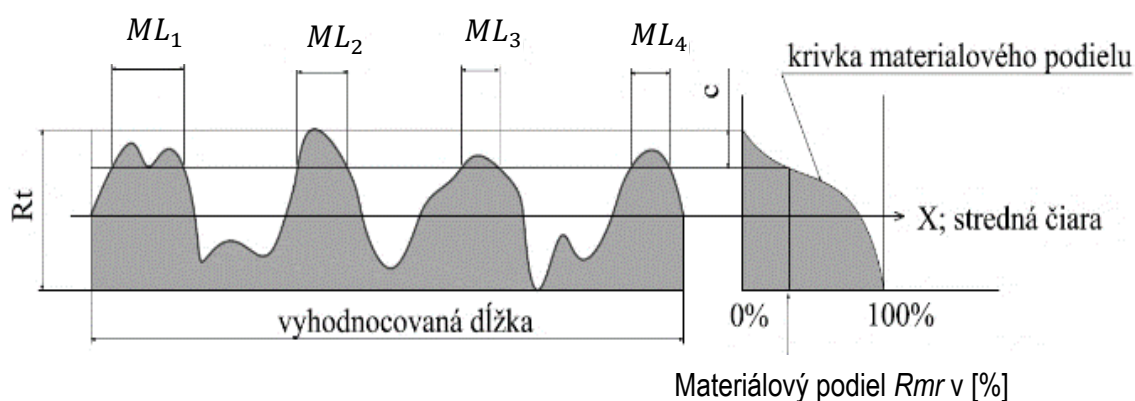
$$RSm = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m Xs_i, [\mu\text{m}] \quad (15)$$



Obr. 33. Priemerná šírka prvkov profilu RSm [28]

- Materiálový pomer Rmr - Jedno z dôležitých uplatnení hodnotení povrchu v inžinierskej praxi je jeho využitie ako dotykovej plochy pri vzájomnom pohybe dvoch súčastí. Materiálový pomer označovaný symbolom Rmr je pomer (vyjadrovaný v %) dĺžky nosnej plochy ML_n v ktorejkoľvek hĺbke profilu k celkovej dĺžke profilu L_n . [28]

$$Rmr = \frac{ML_n}{L_n}, [\mu\text{m}] \quad (16)$$



Obr. 34. Materiálový podiel profilu Rmr

3.2 Metódy merania drsnosti povrchu

Pri kontrole drsnosti povrchu sa využívajú metódy, ktoré možno rozdeliť na metódy kvalitatívne a kvantitatívne.

3.2.1 Metódy kvalitatívne

sú založené na subjektívnom porovnávaní kontrolovaného povrchu s povrchom vzorovým, ktorého drsnosť je známa. Porovnávať sa môžu iba povrchy opracované rovnakým, alebo aspoň podobným spôsobom pričom výsledkom kontroly je zistenie, že kontrolovaná plocha je hladšia, alebo drsnejšia ako vzorová, resp. že jej drsnosť je v rozmedzí dvoch po sebe nasledujúcich vzoriek (napr. $3,2 \mu\text{m}$ a $6,3 \mu\text{m}$). Na porovnávanie sa využívajú vzorkovnice drsnosti povrchu Obr. 35. Sú to kazety zoradené do jednotlivých kolekcí obsahujúce vzorky (etalóny) obrobené rôznymi druhmi opracovania v rôznych stupňoch drsnosti. Porovnávanie sa vykonáva hmatom a zrakom, pričom hmat umožňuje presnejšie rozlíšenie dvoch drsností. Pri kontrole zrakom je možné pomôcť si lupou, alebo sa využívajú porovnávacie mikroskopy. [16]



Obr. 35. Jednotlivé vzorky drsnosti povrchu a vzorkovnice

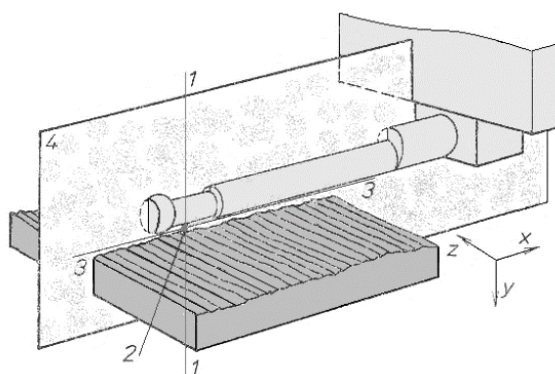
3.2.2 Metódy kvantitatívne

vyjadrujú drsnosť povrchu číselne pomocou niektorého z parametrov definovaných na Obr. 31. Prístroje, ktorými sa tieto parametre zisťujú, sú založené buď na optickom (bezdotykovom), alebo dotykovom spôsobe merania.

Pri optickom spôsobe zisťovania drsnosti sa využíva napríklad princíp svetelného rezu a princíp interferenčný. [16]

3.2.3 Dotyková meracia metóda

Pri dotykovom spôsobe zisťovania drsnosti (Obr. 36.) sa po povrchu pohybuje merací dotyk s malým polomerom prierezu hrotu (zvyčajne 2 μm až 10 μm), ktorý je súčasťou snímača založeného zvyčajne na indukčnom, alebo piezoelektrickom princípe. Pohyb dotyku pozdĺž meraného povrchu je motoricky. Vychýľovanie meracieho hrotu vyvoláva zmenu elektrických veličín, ktoré sa zachytávajú a spracovávajú vo vyhodnocovacej jednotke. Tá následne vyhodnotí preddefinované parametre a výsledné hodnoty vypíše cez tlačiareň, displej, alebo ich zasiela do počítača. Forma výstupu ako aj možnosť voľby vyhodnocovaných parametrov sú závislé na type a výbave profilomera.



Obr. 36. Dotyková metóda snímania profilu

1 – os meracieho hrotu, 2 – dotyk hrotu s povrchom, 3 – smer rezu povrchu, 4 – rovina rezu

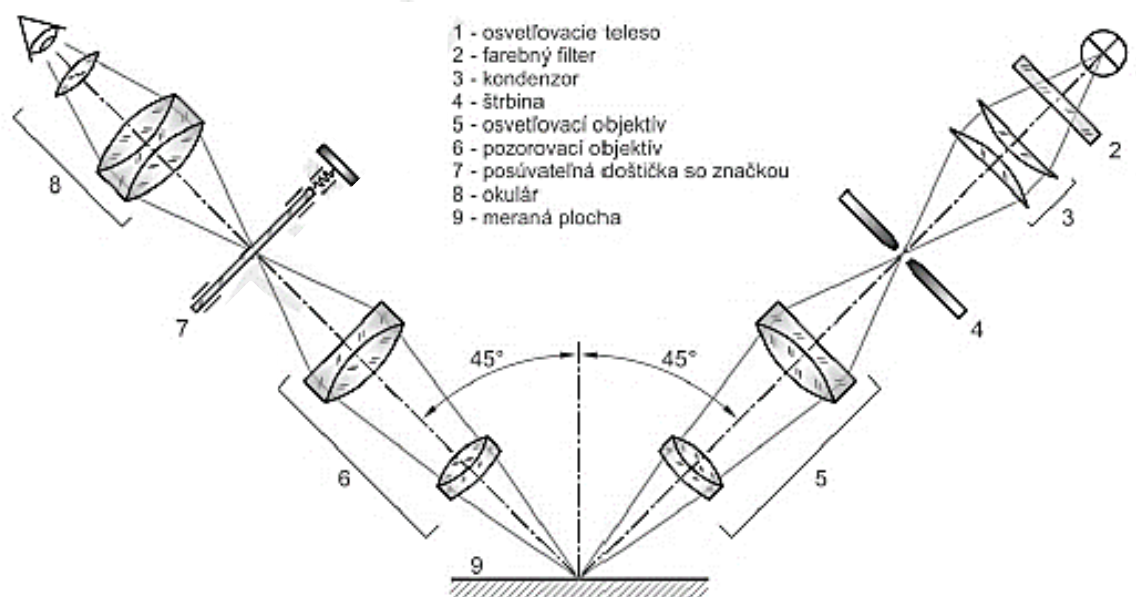


Obr. 37. Dotykový merací prístroj SURFTEST SJ410

Pri určovaní drsnosti povrchu plochy je dôležitý smer zisťovania drsnosti. Ak nie je predpísaný tak pri obrábaní sa zisťuje priečna drsnosť t.j. kolmo na stopy po opracovaní, v prípade ak nie je možné určiť prevažujúci smer stôp tak sa meria v dvoch na seba kolmých smeroch a rozhoduje väčšia nameraná hodnota. [16]

3.2.4 Bezdotyková meracia metóda - Metóda svetelného rezu

Na meranie drsnosti povrchu metódou svetelného rezu sa používa prístroj, ktorého schéma je na Obr. 38. Na stĺpe masívneho stojana je výškovo a otočne prestaviteľné rameno s osvetľovacím a pozorovacím mikroskopom, ktorých osi zvierajú 90° . Lúče vychádzajúce z osvetľovacieho telesa **1** prechádzajú farebným filtrom **2** a kondenzorom **3**. Rovnobežný zväzok lúčov je obmedzený štrbinou **4** do tvaru veľmi tenkej svetelnej roviny a je premiataný sústavou šošoviek osvetľovacieho objektívu **5** pod uhlom 45° na meraný povrch. Prienikom svetelnej roviny s povrchom vzniká obraz profilu šikmého rezu nerovností plochy, ktorý sa pozoruje druhým mikroskopom **6**, **7**, **8** s rovnakými optickými vlastnosťami ako má osvetľovací mikroskop. V zornom poli meracieho okulára **7**, **8** má svetelný rez tvar úzkeho zvlneného prúžku v tmavom poli. Optické zväčšenie mikroskopického obrazu zabezpečujú výmenné páry objektívov **5** a **6**, ktoré sa volia na základe odhadu parametra drsnosti meraného povrchu pomocou vzorkovnice drsnosti.



Obr. 38. Optická schéma mikroskopu pre svetelný rez [27]

3.2.5 Interferenčná metóda merania drsnosti povrchu

Interferenčná metóda sa využíva pri meraní drsnosti povrchu veľmi jemne obrobených plôch (brúsených, honovaných, superfinišovaných, lapovaných) do hodnoty $Ra = 1 \mu\text{m}$. Princíp interferencie fázovým posuvom (koherentné vlnenie), čo sa dosiahne využitím jedného zdroja, kedy sa svetlo rozdelí a opäť spojí. Interferencia sa v okulári javí ako súbor

svetlých a tmavých kriviek. Označenie a názov interferencie pochádza od Thomasa Younga (1801). [27]

3.3 Kvalita povrchu pri brúsení

Povrch a jeho kvalita je daná stupňom presnosti a drsnosti povrchu. Drsnosť a požadovanú presnosť brúseného povrchu zväčša ovplyvňuje tuhosť stroja, sústavy, druh nástrojov, ich vyváženie, kvalita hrotov a presnosť strediacich jamiek, presnosť nastavenia stroja, spôsob a stupeň presnosti merania, vibrácie systému, druh použitého brusného kotúča, tepelné deformácie súčiastky, rezné parametre a druh spojiva. Pri procesoch, kde sa pracuje s vyššími rýchlosťami sú povrchy materiálov kvalitnejšie. Pri brúsení na čisto čelom brúsneho kotúča dosahujeme tolerancie presnosti v rozsahu IT 5 až IT 7, drsnosť povrchu $Ra = 0,4$ až $1,6 \mu\text{m}$. Pri brúsení na čisto obvodom brúsneho kotúča býva presnosť v rozsahu IT 5 až IT 7 a drsnosť povrchu $Ra = 0,2$ až $1,0 \mu\text{m}$. Pri jemnom brúsení môžeme dosiahnuť stupeň presnosti IT 3 až IT 4 a drsnosť povrchu $Ra = 0,025$ až $0,4 \mu\text{m}$.

Celkovú drsnosť povrchu tvoria stopy jednotlivých brúsnych zrn. Na drsnosť povrchu má taktiež značný vplyv kruhový priečny alebo pozdĺžny posuv obrobku, chladenie, hĺbka rezu, druh brusiva, štruktúra a tvrdosť kotúča. Vývoj v oblasti brúsenia sa orientuje na prechod k používaniu nových druhov brusiva a vyšším rezným rýchlostiam. [11]

4 REGRESNÁ ANALÝZA

Regresná analýza skúma funkčný vzťah (priebeh závislosti), podľa ktorého sa mení závisle Premenná Y pri zmenách nezávislých veličín x_1, x_2, \dots, x_k .

4.1 Jednoduchá lineárna regresia

Lineárnu závislosť medzi závisle premennou Y a nezávisle premennou X vyjadruje regresná priamka.

$$y = b_0 + b_1 \cdot x \quad (17)$$

Bodovým odhadom tejto regresnej priamky je priamka, ktorej koeficienty počítame metódou najmenších štvorcov. Konštanta b_0 pri grafickom zobrazení priamky určuje bod, v ktorom priamka pretína os y . V praxi nemá koeficient b_0 vždy logickú interpretáciu. Jeho hlavný zmysel je, že posúva regresnú priamku v priestore. Nazýva sa preto aj lokujúcou konštantou. Koeficient b_1 , smernice regresnej priamky udáva, o koľko merných jednotiek sa v priemere zmení závislá priemerná, ak sa nezávislá premenná zmení o jednu mernú jednotku. Práve tento koeficient dáva informácie o priebehu závislosti, nazývame ho regresným koeficientom. Regresný koeficient je kladné číslo (priamka je rastúca), ak s rastom nezávisle premennej rastie aj závisle premenná a naopak – vtedy hovoríme o priamej závislosti. Pri nepriamej závislosti je koeficient b_1 záporný a priamka je klesajúca.

Tieto priamky môžeme potom označovať ako združené regresné priamky a ich koeficienty združené regresné koeficienty.

4.2 Nelineárna párová regresia

Pri odhade parametra týchto funkcií možno opäť využiť už spomínanú metódu najmenších štvorcov. Aby však bolo možné túto metódu využiť aj na nelineárne závislosti, je treba príslušné funkcie upraviť - pomocou substitúcie, zlogaritmovaním.

Celé funkcie pod regresnou funkciou. Môže mať tvar:

- hyperboly 1 stupňa
- logaritmickej funkcie
- exponenciálnej krivky

Vzťah medzi premennými môžeme vyjadriť i pomocou viac parametrickej nelineárnej funkcie paraboly 2. stupňa

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CIELE DIPLOMOVEJ PRÁCE

1. Voľba technologických podmienok pri brúsení vzorkov
2. Veľkosť výberového súboru $N = 10$ meraní
3. Brúsenie vzorkov pri zmenených technologických podmienkach (boli definované vedúcim diplomovej práce): $n = 2550$ ot/min

Tab. 6. Technické parametre experimentu

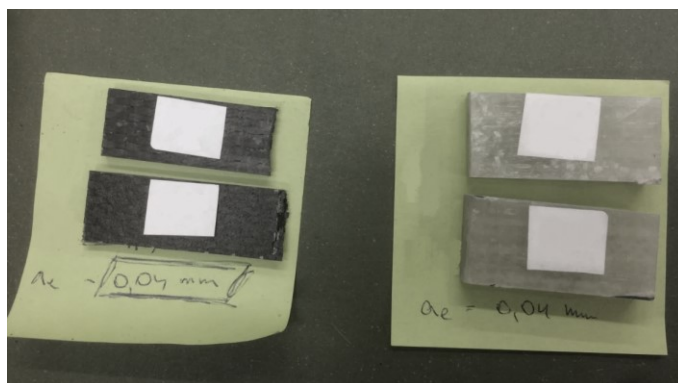
Hĺbka úberu materiálu	Posuvová rýchlosť
$a_{p1} = 0,04 \text{ mm}$	$v_{f1} = 2,5 \text{ m/min}$
$a_{p2} = 0,03 \text{ mm}$	$v_{f2} = 7 \text{ m/min}$
$a_{p3} = 0,02 \text{ mm}$	$v_{f3} = 12,5 \text{ m/min}$
$a_{p4} = 0,01 \text{ mm}$	$v_{f4} = 23 \text{ m/min}$

4. Vplyv chladiacej kvapaliny Microtrend 217M na proces brúsenia
5. Vplyv smeru orientácie vlákien a smeru brúsenia na smer vyhodnocovania
6. Vyhodnocované parametre drsnosti Ra , Rz , Rsm , Rmr
7. Grafické spracovanie
8. Záver

6 TECHNOLOGICKÝ POSTUP EXPERIMENTU

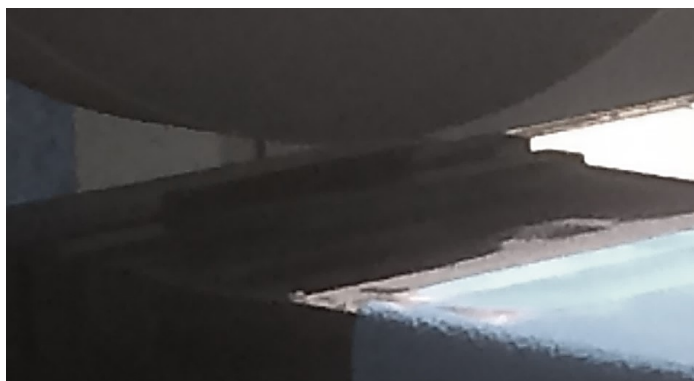
Pri výrobe komponentov z vláknových kompozitov sa kladie veľký dôraz na kvalitu a prevedenie výsledného povrchu. V experimente sa sleduje dôležitosť jednotlivých parametrov pri procese brúsenia na výslednú charakteristiku povrchu.

- Proces experimentu prebehol na Univerzite Tomáša Baťu v Zlíne vo fakultnom laboratóriu.
- V celom projekte boli použité dva typy vzoriek, kompozit s uhlíkovými (CFRP - Carbon fiber reinforced polymer) a sklenenými vláknami (GFRP - Glass Fiber Reinforced Polymer) u ktorých prebiehal proces brúsenia. (Obr. 39.)



Obr. 39. Vyhodnocované vzorky CFRP a GFRP

- Brúsenie bolo vykonané na rovinatej brúske BRH 20.03F (VOJUS) za sucha a s použitím chladiacej kvapaliny odporúčanej výrobcom zariadenia. Išlo o rovinné brúsenie obvodové, t.z. brúsilo sa obvodom brúsneho kotúča s pozdĺžnym pohybom pracovného stola
- Vzorky boli brúsené pozdĺž bočnej hrany, kde sa následne vyhodnocovali stanovené parametre drsnosti



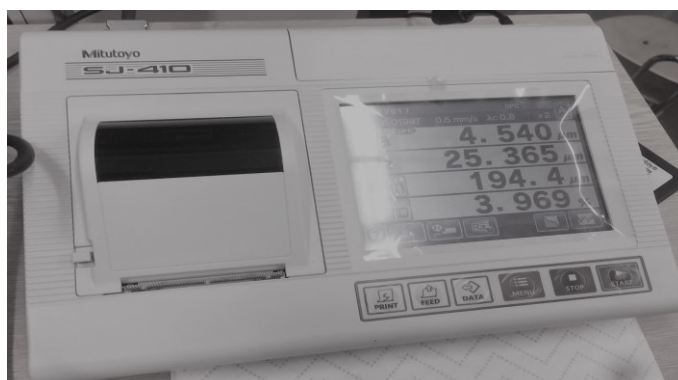
Obr. 40. Brúsenie vzorky CFRP

- Pre brúsenie boli použité dva brúsne kotúče, kryštalický kotúč a kotúč kubického nitrídu bóru. Upnutie kotúčov bolo ploché pomocou čapu a príruby. Vyvažovanie prebehlo na statickom stojane.
- Pre vyhodnocovanie drsnosti bolo použité zariadenie SURFTEST série SJ410 značky Mitutoyo. Vyhodnocovaná bola priečna drsnosť t.j. smer kolmo na smer brúsenia vzoriek. Hodnota $\lambda_c = 8\mu\text{m}$ bola konštantná pre všetky dané merania. Meranie na každej vzorke prebehlo 10x z čoho sa následne vyhodnotil aritmetický priemer a odchýlku výberového súboru.



Obr. 41. Použitý dotyk 12AAB403- Mitutoyo SJ-400 5μm

- Zo stanovených hodnôt aritmetického priemeru jednotlivých parametrov sa vyhodnotil priebeh závislosti.



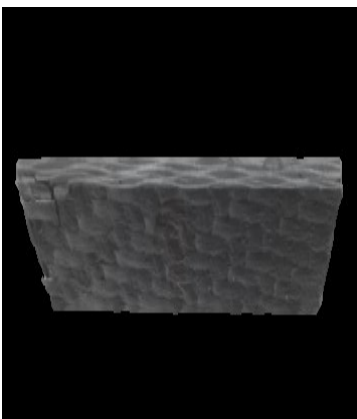
Obr. 42. Meracie zariadenie SURFTEST SJ410

6.1 Kompozit s epoxidovou matricou a uhlíkovými vláknami (CFRP)

Kompozitné materiály spevnené uhlíkovými vláknami ponúkajú väčšiu tuhosť a pevnosť ako ktorékoľvek ostatné kompozity, sú však oveľa drahšie ako napr. kompozitné materiály spevnené sklenenými vláknami. Kontinuálne vlákna v polyesterovej alebo epoxidovej matrici dávajú najlepšie vlastnosti. Vlákna prenášajú mechanické zaťaženia, matrica prenáša zaťaženia na vlákna, je tvárna a húževnatá, chráni vlákna pred poškodením pri manipulácii a od okolitého prostredia. Od materiálu matrice závisí pracovná teplota a podmienky spracovania kompozitu.

Materiál: Uhlíkový prepreg od talianskej firmy IMP – UD, prepreg GV420U 37% (mat. C) a tkanina GG630T 37% (mat. Ct) (HT)

Tab. 7. Materiál C-IMP503Z (CFRP)

	Parameter	Hodnota	Jednotka
	Modul pružnosti v ťahu	54 800	MPa
	Medza pevnosti v ťahu	656	MPa
	Modul pružnosti v ohybe	56 400	MPa
	Medza pevnosti v ohybe	693	MPa
	Rázová húževnatosť	0,08	J.cm ⁻²
	Hustota	1150 - 1250	kg.m ⁻³


Telesá boli narezané v smere vlákien (L) a naprieč k smeru vlákien (T) v prípade prepregu aj tkaniny. Tkanina bola narezaná aj pod uhlom 45 °. Bližšie informácie vrátane experimentálnej skúšky materiálového vzorku sa nachádzajú v Prílohe III.

6.2 Kompozity s epoxidovou matricou a sklenenými vláknami (GFRP)

Kompozity, tvoriace polyesterová matrica/sklenené vlákno (GFRPs) sú najlacnejšie a najčastejšie používané. Poslednou inováciou je používanie termoplastov ako materiálu pre výrobu matrice buď vo forme tkaniny z lacného polypropylénu a sklenených vlákien, ktoré sa dajú teplom formovať, roztaveného polypropylénu, alebo ako drahý vysokoteplotný termoplast, napr. PEEK, ktorý dodáva kompozitom lepšiu vysokoteplotnú odolnosť a húževnatosť. V kompozitoch epoxidová matrica/sklenené vlákna sa pre vyššie zaťaženia používajú kontinuálne vlákna. Sekané sklenené vlákna sú lacnejšie, a používajú sa v oveľa väčších množstvách. Výrobky GFRP sa používajú od tenkých elektronických plošných spojov až po stožiare lodí, karosérie a vnútorné panely automobilov, domáce spotrebiče, nábytok a armatúry.

Vzorka použitá v experimente je sklolaminátový vodiaci pás SMC (UP GF25) vystužený z 25% sklenenými vláknami nenasýtených polyesterových lisovacích zmesí.

Tab. 8. Kompozit so sklenenými vláknami (GFRP)

	Parameter	Hodnota	Jednotka
	Modul pružnosti v ťahu	12 500	MPa
	Pevnosť v ohybe	200	MPa
	Rázová húževnatosť	90	J.cm ⁻²
	Hustota	200	kg.m ⁻³
	Tepelná rozťažnosť	18.10 ⁻⁹	K ⁻¹

6.3 Stacionárna brúska

Brúska BRH 20.03 (Obr.43) sa z funkčného hľadiska vyznačuje tým, že stôl vykonáva pozdĺžny pohyb po vedení vyhotovenom na prednej strane a priečny pohyb vykonáva vreteník spolu so stojanom v ktorom je vedenie pre jeho zvislý posuv. Hydraulické a elektrické

ovládania tvoria samostatné celky, ktoré sú umiestnené mimo stroja. Rovinná brúska je určená na brúsenie rovinných a tvarových plôch, súčiastok z ocele, liatiny a ostatných kovových i nekovových materiálov, pri ktorých sa vyžaduje dosiahnutie vysokej presnosti a kvality spracovania. Obrábanie je realizované obvodom brúsneho kotúča. Brúsené súčiastky podľa svojich rozmerov, tvaru a materiálu môžu byť upínanej priamo na elektromagnetickú dosku, alebo prostredníctvom vhodných upínačov.



Obr. 43. Rovinná brúska BRH 20.03 F

Tab. 9. Parametre rovinnej brúsky BRH 20.03 F

Parameter	Hodnota	Jednotka
Pracovná plocha stola:	200 x 630	mm
Najväčšia šírka brúsenia bez výbehu brúsneho kotúča	230	mm
Najväčšia dĺžka brúsenia	630	mm
Max. vzdialenosť osi vretena od upínacej plochy stola	525	mm
Rozmery brús. Kotúča (\varnothing x šírka x upín. diera)	250 x 20 – 50 x 76	mm
Minimálny priemer brúsneho kotúča	120	mm
Otáčky brúsneho vretena:	2550	min ⁻¹
Priemer brúsneho vretena	50	mm
Upínací kužel brúsneho vretena	1:5	
Max. pôdorysná plocha stroja (dĺžka x šírka)	2,7 x 1,5	m
Výška stroja	2240	Mm
Hmotnosť stroja	1860	kg
Rýchlosť stola plynule regulovateľná	1-30	m.min ⁻¹
Max. dráha pohybu stroja	710	mm
Max dráha zvislého posuvu	460	mm

6.4 Keramický brúsny kotúč AG 92/99 80I 8V 85

- AG 92/99 - Typ zrna
- 80 - Zrornosť
- I - Tvrdosť
- 8 - Štruktúra
- V - Typ spojiva

Kotúč obsahuje zmes abrazívneho materiálu, ktorá sa skladá z 50% bieleho korundu a 50% sintrovaného korundu. Zrornosť ma hodnotu 80 a trieda I radí kotúč medzi mäkké. Štruktúra ms číslo 8 značí, že sa jedná o pórovitý kotúč. V symbolizuje že sa jedná o kotúč keramický.

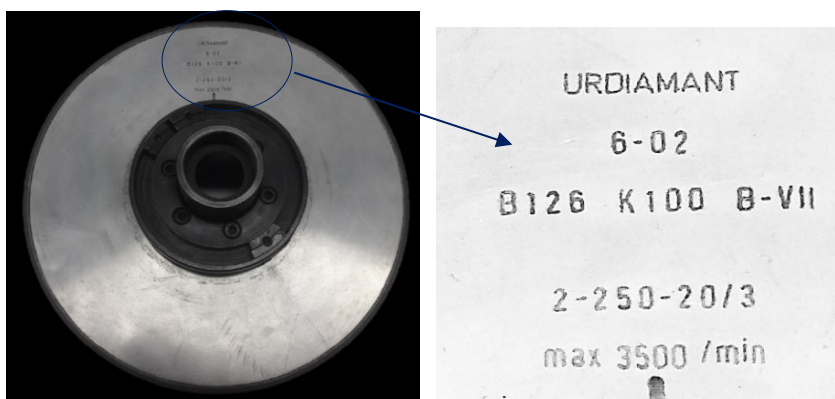
Rozmery brúsneho kotúča: 250 x 25 x 76 [mm]



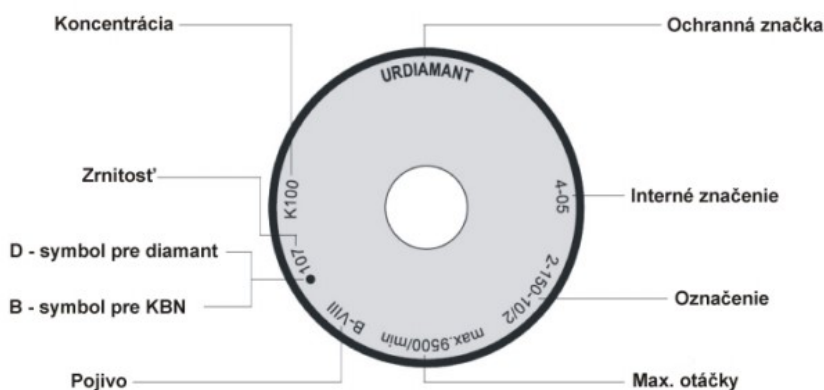
Obr. 44. Keramický kotúč AG 92/99 80I 8V 85

6.5 Brúsny kotúč z KNB - B126 K100 B-VII

Kubický nitrid bóru (KBN) - sa v prírode nenachádza. Je to syntetický materiál, ktorý sa vyrába syntézou za vysokých tlakov a teplôt z hexagonálneho nitridu bóru. Má podobné vlastnosti ako diamant. Špecifická hmotnosť je $3,48 \text{ g.cm}^{-3}$, tvrdosť je podľa Mohse $9 \div 10$. Na rozdiel od diamantu má väčšiu chemickú stálosť a tepelnú odolnosť ($1100 \div 1200 \text{ }^\circ\text{C}$). Z týchto dôvodov sa využíva hlavne na opracovanie zušľachtených kalených nástrojových ocelí.



Obr. 45. Brúsny kotúč z KNB - B126 K100 B-VII



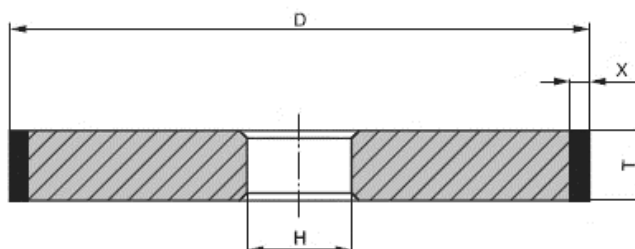
Obr. 46. Príklad značenia brúsnych kotúčov Urdiamant [29]

Podľa schémy na Obr.42 možno definovať vlastnosti kotúča použitého v experimente

- označenie brúsneho kotúča (1A1 2-250-20 / 3)
- druh spojiva (B-VII)
- zrnitosť KBN (B126)
- koncentrácia brúsivá (K100)

6.5.1 Priemer brúsneho kotúča

Čím väčší je priemer brúsneho kotúča, tým priaznivejšie sú termické a kinematické podmienky brúsenia, pretože brúsne zrnó je následkom dlhšej ochladzovacie dráhy menej namáhané, čo priaznivo pôsobí na životnosť kotúča. Voľba priemeru závisí od typu brúsky, ktorej konštrukcia by mala zaručiť dosiahnutie odporúčanej pracovnej rýchlosti. [29]



Obr. 47. Rozmery brúsneho kotúča [29]

kde,

$$D = 250\text{mm}, T = 20\text{mm}, X = 3\text{mm}, H = 76\text{mm}$$

6.5.2 Spojivo

Spojivo ovplyvňuje rozhodujúcim spôsobom výkon brúsenia, životnosť kotúčov, tvarovať stálosť, samoostriace vlastnosti a pod. Výberom spojiva výrazne ovplyvníme to, či KBN kotúč brúsi s veľkým výkonom brúsenie pri malom prítlaku, avšak s kratšou životnosťou (mäkké spojivo) a alebo s veľkou životnosťou pri nižšom výkone a väčším prítlaku (tvrdé spojivo). Pre voľbu spojiva je okrem brúseného materiálu a druhu brusiva dôležité určiť druh operácie a spôsob brúsenia.

Živicové spojivo je najpoužívanejším spojivom, pretože sa vyznačuje vysokou produktivitou brúsenie, nízkym vývinom tepla, dobrými samoostriacimi vlastnosťami. Spojivo je označené B-VII a používajú sa s chladením. živicová spojiva možno použiť aj bez chladenia za určitých podmienok (úzka brúsiace vrstva, nižšiu obvodová rýchlosť, prítlak, posuv, krátky strojné čas, nižšia koncentrácia pod.). [29]

6.5.3 Zrornosť

Zrornosť brusiva B126 radí kotúč do skupiny kotúčov vhodných pre operácie výkonného brúsenia a pre hrubovacie operácie. [29]

6.5.4 Koncentrácia brusiva

Koncentrácia brusiva K [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$] vyjadruje hmotnostnej obsah brusiva KBN v 1 cm^3 brúsiace vrstvy. Ako základ bola stanovená koncentrácia K100, kde 1 cm^3 brúsiaci vrstvy obsahuje 0,88 g brusiva a zaujíma 25% objemu brúsiace vrstvy. [29]

6.6 Meracie zariadenie SURFTEST séria SJ-410

Drsnomer od Mitutoyo SURTEST SJ-410 je mobilný prístroj, ktorý umožňuje jednoduché a presné meranie drsnosti povrchu dotykovou metódou. Nekĺzavá konštrukcia typu SJ-410 umožňuje vytvorenie primárnych profilov (P), drsnosti profilov (R) a vlnitosti profilov (W). Merací prístroj ponúka povrchovú kompenzáciu zakrivených, radiálnych a naklonených povrchov. Drsnomer je vybavený hnacou jednotkou s garantovanou priamosťou a s priečnou dĺžkou 25 mm a 50 mm. [30]

Technické parametre použitého drsnomeru sú popísané v Tab. 10

Tab. 10. Technické parametre SURFTEST SJ-410

	Posuvná jednotka	
	Priečny smer	SJ-411: 25 mm SJ-412: 50 mm
	Rýchlosť merania	0,05 mm/s; 0,1 mm/s; 0,2 mm/s; 0,5 mm/s; 1,0 mm/s
	Snímač	
	Meracia metóda	Bez kĺznej pätky - diferenciálny spôsob
	Rozsah merania	800 mikrometrov; 80 mikrometrov; 8 mikrometrov (Až 2,4 mm sa snímacím dotykom zo zvl. príslušenstvo)
	Polohovanie	$\pm 1,5^\circ$ (sklon), 10 mm (hore / nadol)
	Vyhodnocovacia jednotka	
	Profily	Skutočný profil (P), profil drsnosti (R), profil vlnitosti (W), MOTIF (R, W) a ďalšie
	Normy	EN ISO, VDA, JIS, ANSI a vlastné nastavenie
	Grafická analýza	BAC, ADC
	Digitálny filter	Gauss, 2CR75, PC75
	Dĺžka medzných hodnôt	λc : 0,08 mm; 0,25 mm; 0,8mm; 2,5 mm; 8 mm λs : 2,5 mikrometrov; 8 mikrometrov; 25 mikrometrov
	Tlačiareň	Termotlačiareň
Tolerancia	Farebné horné / dolné medze	
Rozhranie	USB, DIGIMATIC, RS-232C, nožný spínač	
Napájanie	Sieťový adaptér alebo dobíjacie batérie	

Meracie zariadenie Mitutoyo SJ-410 pri experimente vykonalo analýzy drsnosti v súlade s normou ISO 4287:1997. Veľkosť základnej dĺžky bola stanovená na $\lambda c = 0,8\text{mm}$. Pri uhlíkovom kompozite bola zvolená vyhodnocovaná dĺžka 2-násobok základnej dĺžky, pre limitovanú hrúbku vzorkov. Bolo tak porušené pravidlo o vzťahu základnej a vyhodnocovanej dĺžky merania, kedy vyhodnocovaná dĺžka stanovuje ako minimálne 3-násobok základnej dĺžky. Vyhodnocovaná dĺžka normálne tvorí päťnásobok základnej dĺžky, t. j. $L_n = 5 \times L_r$, $L_r = \lambda c$.

6.7 Chladiaca kvapalina

Microtrend 217M je vhodná pre väčšinu obrábacích operácií stredne ťažných ocelí, neže-
lezných kovov a zliatin. Patrí medzi rezné kvapaliny miešateľné vodou. V závislosti na
koncentracii sa používa kvapalina aj pre náročnejšie operácie obrábania a bežného brúse-
nia. Kvapalina Microtrend 217M bola zvolená na základe odporúčania výrobcu stacionár-
nej brúsky BRH 20.03 F. Bližšia špecifikácia použitej chladiacej kvapaliny je v Prílohe II.



Obr. 48. Použitá chladiaca kvapalina Microtrend 217M

7 ŠTATISTICKÉ HODNOTENIE EXPERIMENTU

Veľkosť výberového súboru, ako bolo spomenuté v cieľoch tejto práce bolo desať meraní. V štatistickom vyhodnotení experimentu sú tak uvedené len hodnoty aritmetického priemeru a smerodajná odchýlka daného výberu. Pri jednotlivých priebehoch bol definovaný index určenia R^2 . Štandardne sa udáva v percentách a jeho výška hodnoty stanovuje spohľadnosť závislosti medzi ukazovateľmi. Reznú rýchlosť môžeme definovať zo vzťahu (4) v stati 1.2.3. ($v_c = 33,38 \text{ m.s}^{-1}$)

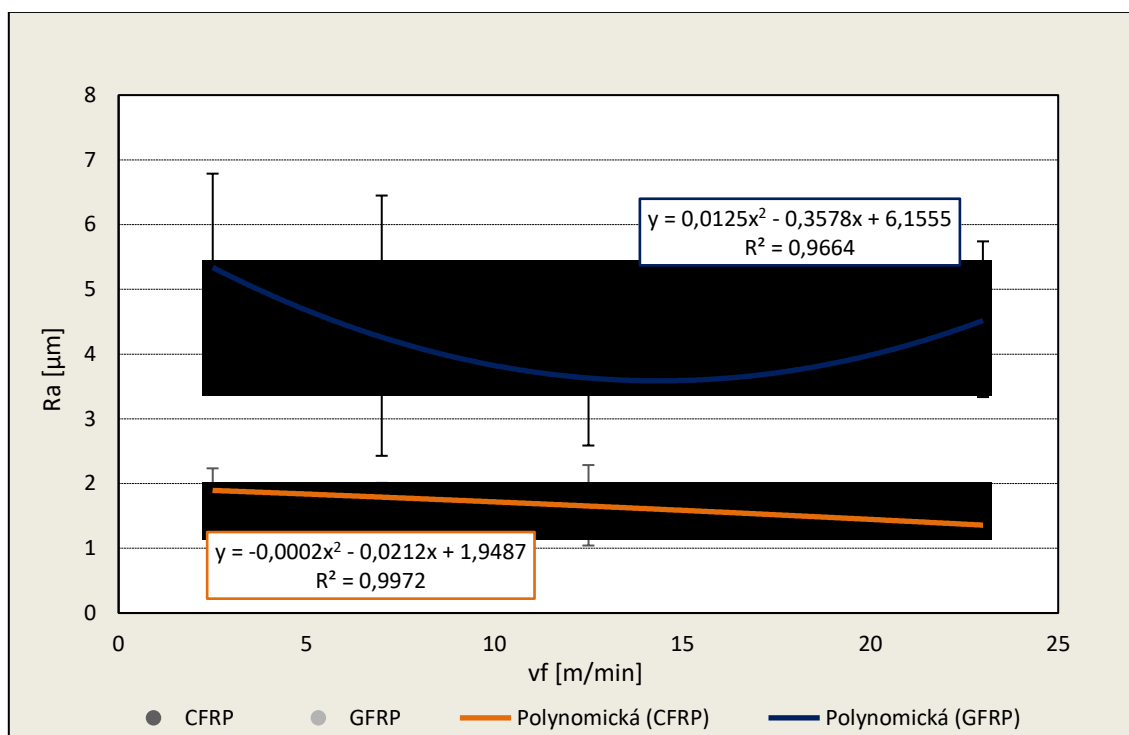
7.1 Vplyv rýchlosti posuvu nástroja v_f na kvalitu povrchu

V nasledujúcich dvoch procesoch sa skúmala drsnosť materiálu oboch kompozitov pri zmene rýchlosti posuvu v_f . Zvolené boli rýchlosti 2,5, 7, 12,5 a 23 m.min^{-1} . Brúsenie prebiehalo za sucha a za konštantnej hĺbky úberu $a_p = 0,04 \text{ mm}$. Ďalšie dôležité technologické podmienky procesu sú uvedené v kapitole 7.1.1 a 7.1.2.

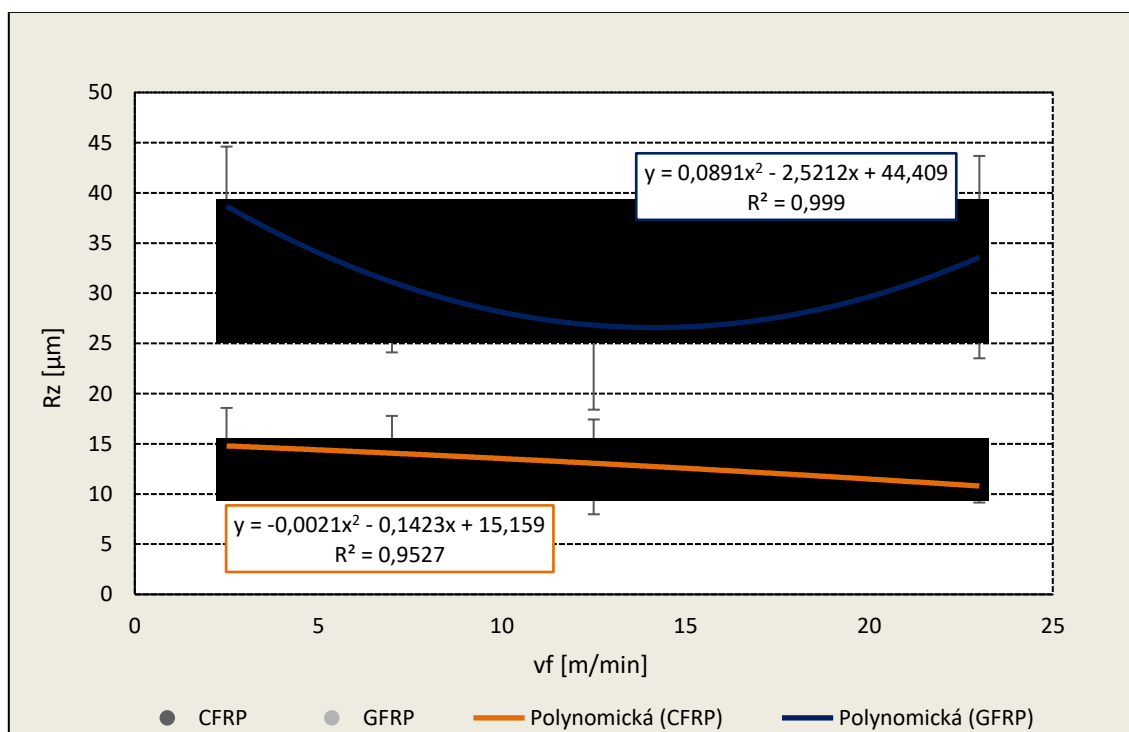
7.1.1 Vyhodnotenie drsnosti povrchu pri použití keramického kotúča

Proces brúsenia prebiehal pri nasledujúcich podmienkach

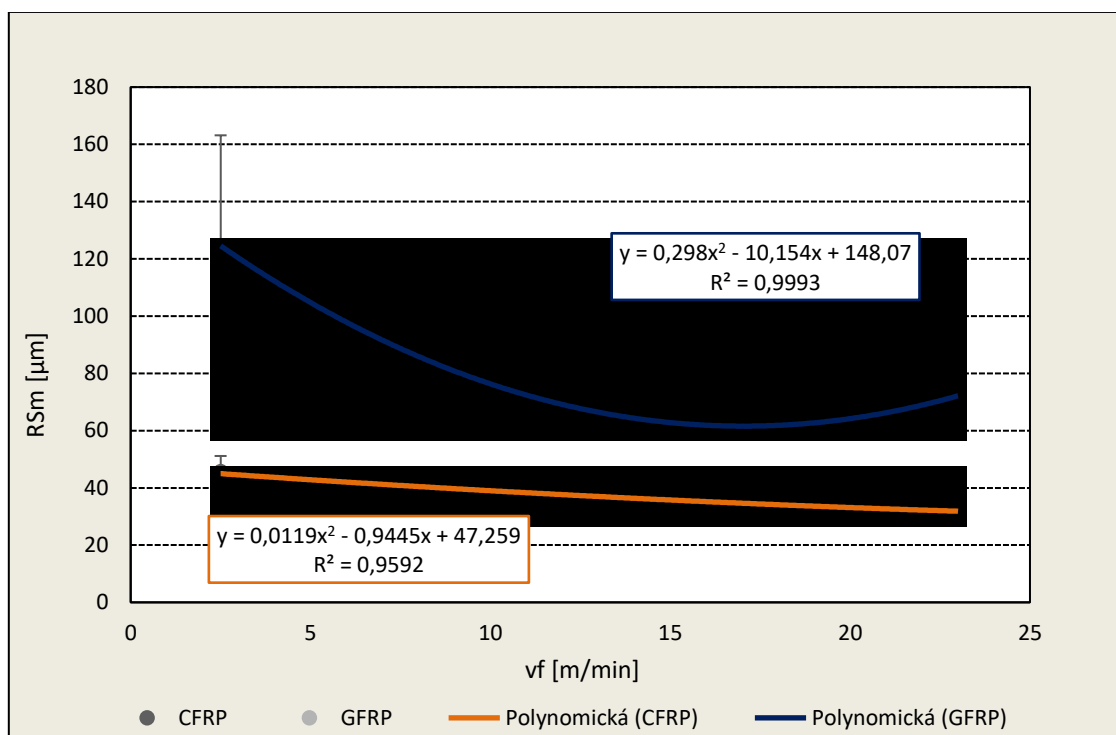
Materiál	- CFRP - GFRP
Hĺbka úberu	$a_p = 0,04 \text{ mm}$
Rýchlosť posuvu	$v_{f1} = 2,5 \text{ m.min}^{-1}$ $v_{f2} = 7 \text{ m.min}^{-1}$ $v_{f3} = 12,5 \text{ m.min}^{-1}$ $v_{f4} = 23 \text{ m.min}^{-1}$
Otáčky	$n = 2550 \text{ ot.min}^{-1}$
Rezná rýchlosť	$v_c = 33,38 \text{ m.s}^{-1}$
Proces brúsenia prebiehal	- za sucha
Brúsny kotúč	- keramický kotúč
Vyhodnocovanie	- kolmo na smer brúsenia



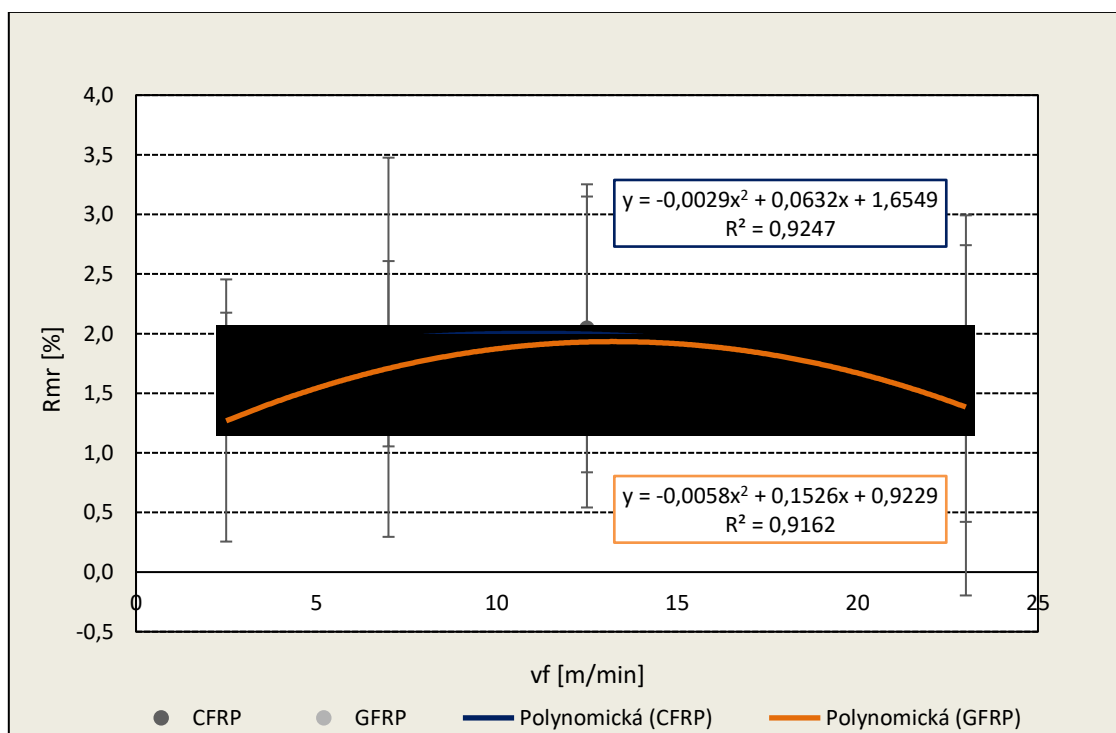
Graf 1. Závislosť priemernej aritmetickej odchýlky posudzovaného profilu (R_a) od rýchlosti posuvu pri použití keramického kotúči



Graf 2. Závislosť výšky nerovnosti posudzovaného profilu (R_z) od rýchlosti posuvu (v_f) pri použití keramického kotúči



Graf 3. Závislost střední vzdálenosti rýh posudzovaného profilu (R_{Sm}) od rychlosti posuvu (v_f) při použití keramického kotůči



Graf 4. Závislost materiálového podílu drsnosti posudzovaného profilu (R_{mr}) od rychlosti posuvu (v_f) při použití keramického kotůči

Zhodnotenie

Závislosť priemernej aritmetickej odchýlky Ra od typu použitého vzorku je zobrazený na prvom priebehu grafickej závislosti (Graf 1.). Možno vidieť že pri použití kotúča z mikrokryštalického korundu sa kvalita povrchu oboch vzoriek značne líši. Bude tomu tak aj neskorších prípadoch kedy materiál z CFRP dosahuje vo všetkých mierach lepšie kvalitatívne vlastnosti povrchu. Vysoké hodnota parametra Ra u vzorku z GFRP môže byť spôsobená vyššou mierou pórovitosti skúmaného materiálu, vplyvom výberu brúsneho kotúča, mierou poškodenia vlákien pri brúsení či technológiou zhotovenia kompozitu. Vzájomná závislosť napovedá že s rastúcou posuvovou rýchlosťou v_f rastie aj kvalita povrchových vlastností oboch vzoriek. Pri najvyššej testovanej posuvovej rýchlosti u vzorku z GFRP sa hodnoty Ra zvýšia. Krivka napovedá, že z hľadiska optimalizácie je najvhodnejšia posuvová rýchlosť pre túto materiálovú vzorku v_{f3} . Smerodajná odchýlka o materiálu CFRP ma pomerne vyrovnané hodnoty z porovnaním vzorky z GFRP, kedy je smerodajná odchýlka takmer päťnásobne vyššia.

Pri sledovaní závislosti výšky posudzovaného profilu Rz od rýchlosti posuv v_f (Graf 2.) je možno predpokladať rovnaké priebehy ako to bolo v prvej závislosti pri parametri Ra .

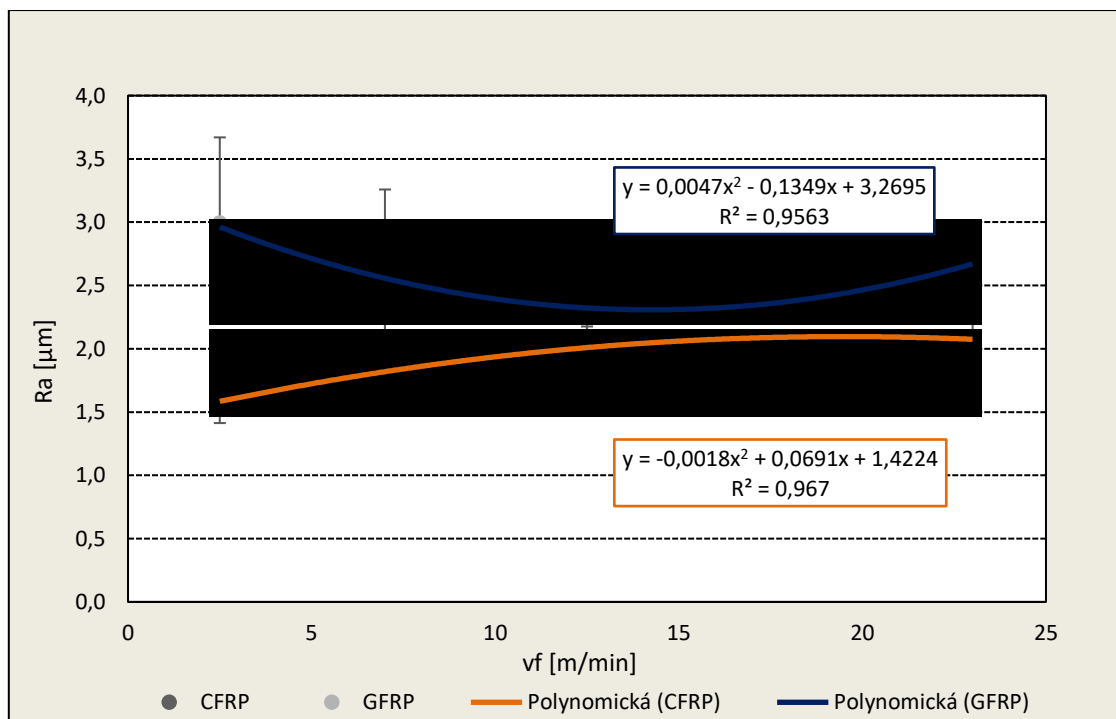
Závislosť strednej vzdialenosti rýh posudzovaného profilu RSm od rýchlosti posuvu v_f , (Graf 3.) vykresľuje rozdiel v povrchových vlastnostiach oboch vzoriek, hodnoty u uhlíkového kompozitu sú trojnásobne nižšie ako u sklolaminátu.

Z grafu závislosti materiálového podielu Rmr od rýchlosti posuvu v_f (Graf 4.) možno sledovať približne rovnaké správanie sa oboch kompozitných materiálov. Smerodajná odchýlka sa pohybuje okolo hodnoty 1,12% pri oboch kompozitoch.

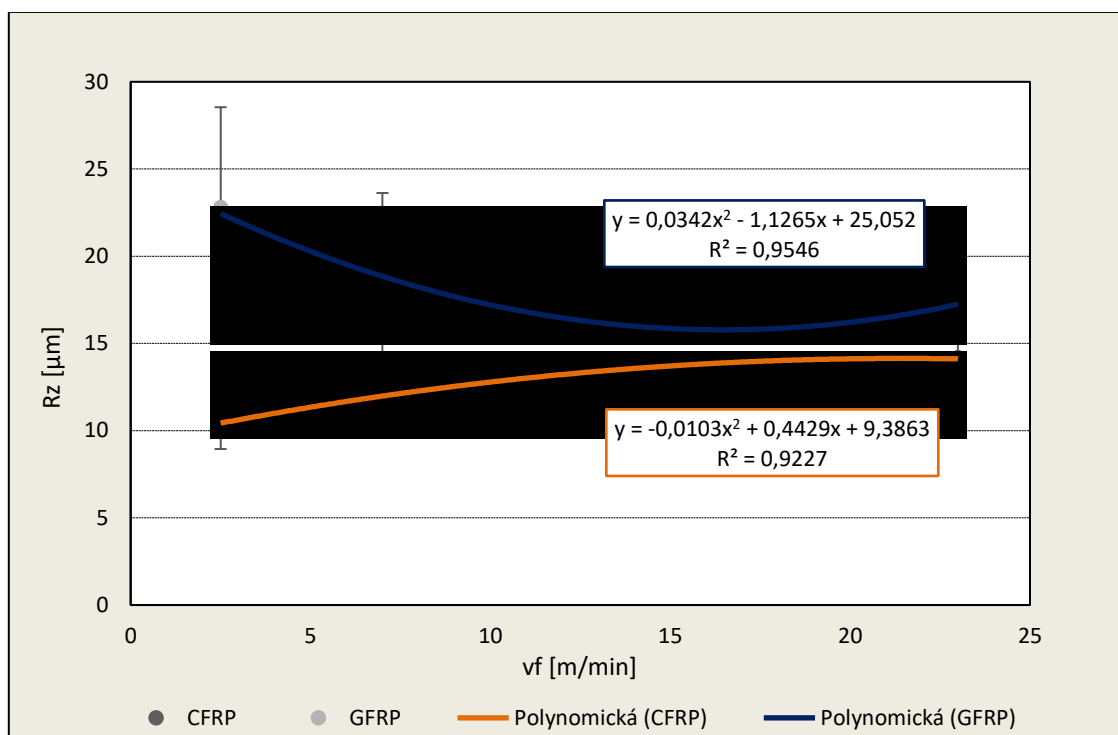
7.1.2 Vyhodnotenie drsnosti povrchu pri použití kotúča z KNB

Proces brúsenia prebiehal pri nasledujúcich podmienkach

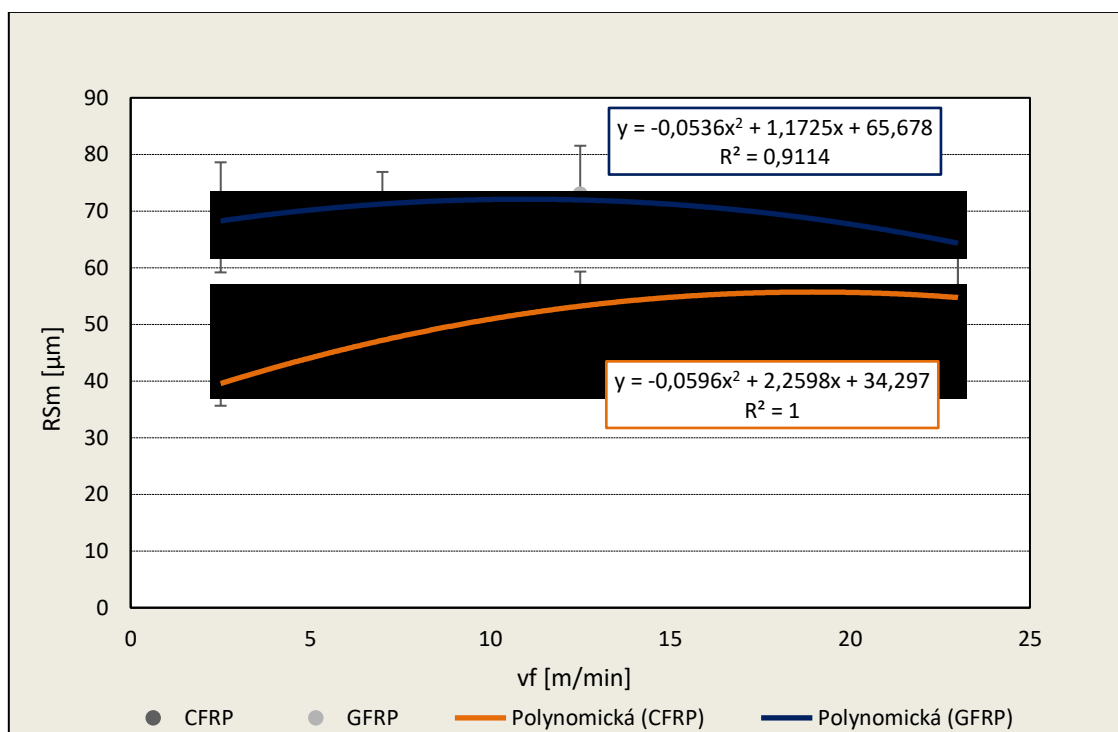
Materiál	- CFRP - GFRP
Hĺbka úberu	$a_p = 0,04 \text{ mm}$
Rýchlosť posuvu	$v_{f1} = 2,5 \text{ m.min}^{-1}$ $v_{f2} = 7 \text{ m.min}^{-1}$ $v_{f3} = 12,5 \text{ m.min}^{-1}$ $v_{f4} = 23 \text{ m.min}^{-1}$
Otáčky	$n = 2550 \text{ ot.min}^{-1}$
Rezná rýchlosť	$v_c = 33,38 \text{ m.s}^{-1}$
Proces brúsenia prebiehal	- za sucha
Brúsny kotúč	- kotúč z KNB
Vyhodnocovanie	- kolmo na smer brúsenia



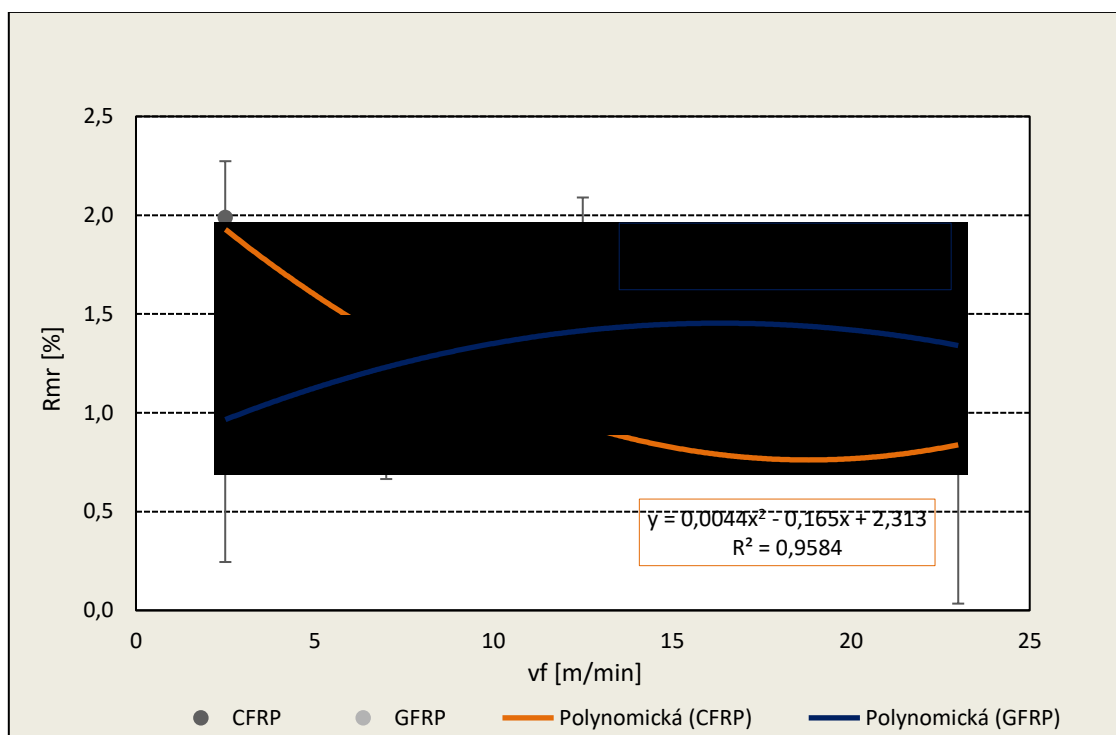
Graf 5. Závislosť priemernej aritmetickej odchýlky posudzovaného profilu (R_a) od rýchlosti posuvu (v_f) pri použití kotúča z KNB



Graf 6. Závislosť výšky nerovnosti posudzovaného profilu (R_z) od rýchlosti posuvu (v_f) pri použití kotůči z KNB



Graf 7. Závislosť strednej vzdialenosti rýh posudzovaného profilu (R_{Sm}) od rýchlosti posuvu (v_f) pri použití kotůči z KNB



Graf 8. Závislosť materiálového podielu drsnosti posudzovaného profilu (R_{mr}) od rýchlosti posuvu (v_f) pri použití kotúči z KNB

Zhodnotenie

Povrchové vlastnosti sa použitím kotúča z KNB zlepšili o oboch skúmaných materiálových vzoriek. Kým pri brusnom kotúči z Korundu bol rozdiel hodnôt R_a pri najnižšej posuvovej rýchlosti viac ako 2,5- násobne, pri brusnom kotúč z KNB sú kvalitatívne rozdiely viac vyrovnané a rozdielové hodnoty ukazujú menej ako 2-násobok (Graf 5.). Priebehy ďalej vykazujú rovnaký priebeh ako pri prvom použitom brusnom kotúči.

Aj hodnoty aritmetického priemeru najvyšších výšok profilu R_z (Graf 6.) pri odpovedajúcich hodnotách posuvovej rýchlosti v_f majú pomerne rovnaký priebeh, rozdielom je však opäť nižšie hodnoty rozptylu a tým aj hodnoty smerodajnej odchylky.

Vzájomná závislosť stredných vzdialeností rýh posudzovaného profilu R_{Sm} od posuvovej rýchlosti v_f (Graf 7.) ma s rastúcou rýchlosťou rastúci charakter.

Graf závislosť materiálového podielu drsnosti posudzovaného profilu R_{mr} od rýchlosti posuvu v_f má opačný charakter pre oba kompozitné materiály. Kým pre uhlíkový kompozit hodnota podielu R_{mr} s rastúcou rýchlosťou posuvu klesá, pre sklolaminát hodnoty s rastúcou rýchlosťou stúpajú. Krivky oboch priebehov sa pretínajú približne pri hodnote posuvovej rýchlosti $v_f = 8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ čo by znamenalo že za daných okolností môžu mať oba

skúmané materiály pri tejto rýchlosti posuvu podobný charakter materiálového podielu. Profily pribehov sa nachádzajú v Prílohe IV.

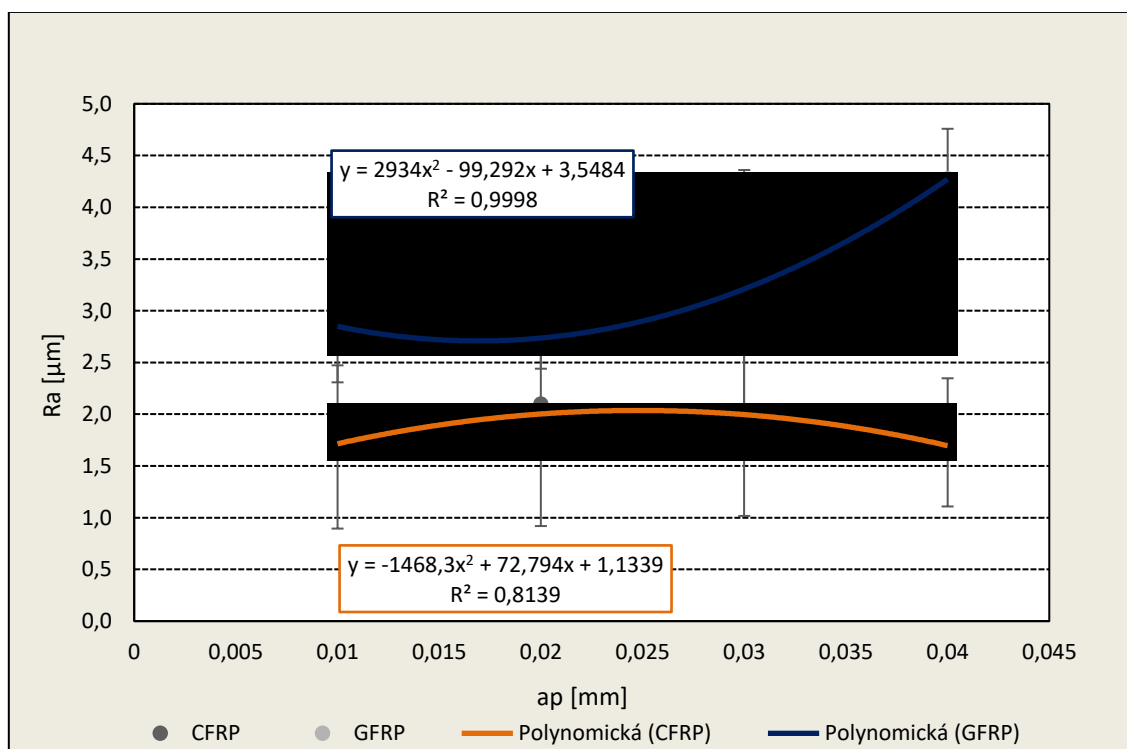
7.2 Vplyv úberu materiálu a_p na kvalitu povrchu

V ďalšom kroku sa opäť brúsili za sucha oba kompozity, ale tentokrát s konštantnou rýchlosťou posuvu v_f . Pri tomto experimente bola premennou veličinou hĺbka úberu a_p , kedy sa postupne volili hodnoty 0,04, 0,03, 0,02 a 0,01 mm. Ďalšie dôležité parametre sú opäť uvedené v kapitolách 7.2.1 a 7.2.2.

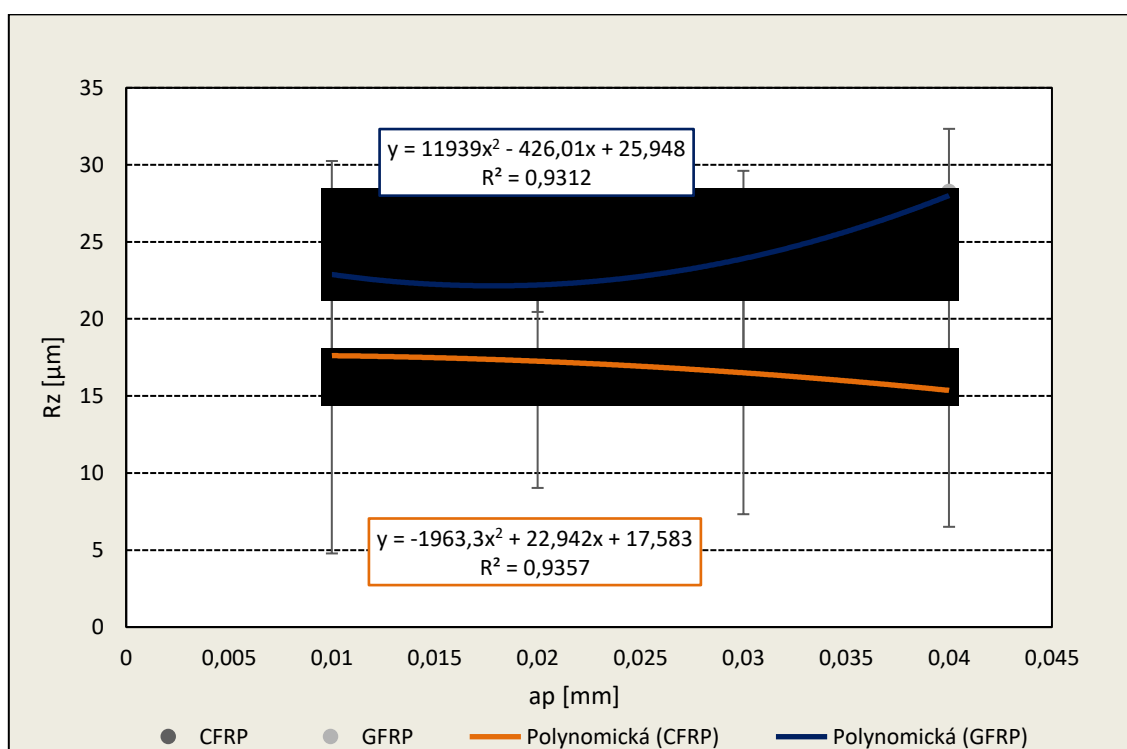
7.2.1 Technologické parametre pri použití keramického kotúča

Proces brúsenia prebiehal pri nasledujúcich podmienkach

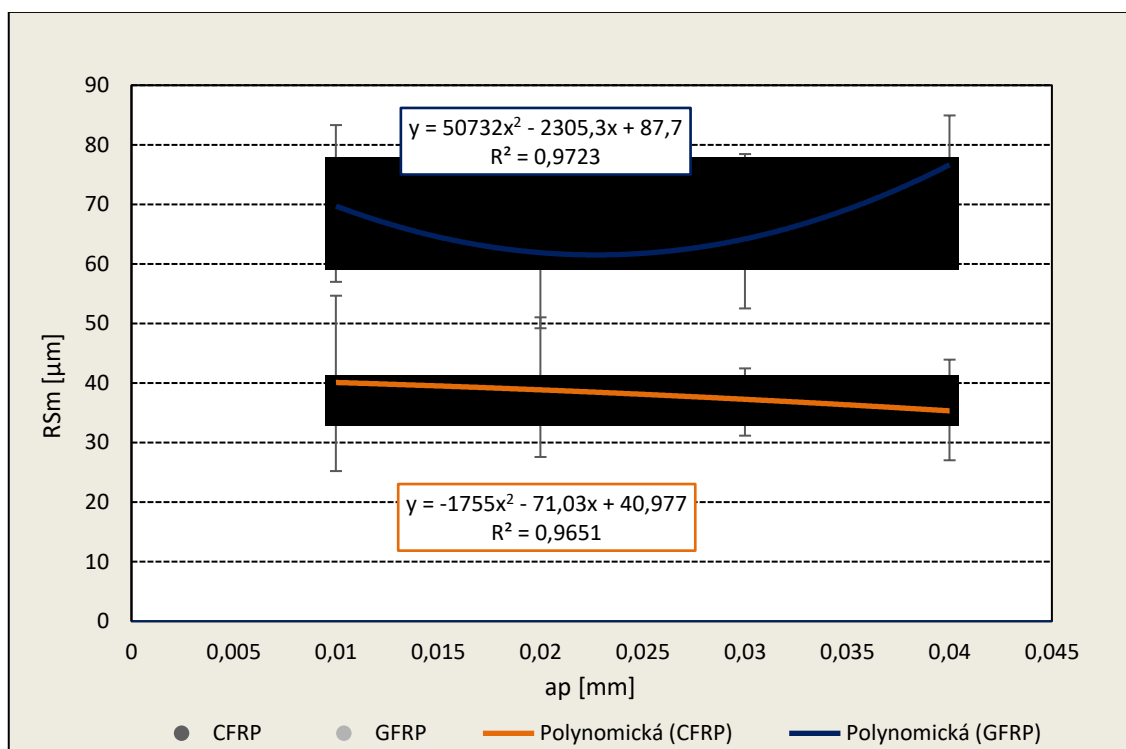
Materiál	- CFRP - GFRP
Rýchlosť posuvu	$v_f = 23 \text{ m.min}^{-1}$
Hĺbka úberu	$a_{p1} = 0,04 \text{ mm}$ $a_{p2} = 0,03 \text{ mm}$ $a_{p3} = 0,02 \text{ mm}$ $a_{p4} = 0,01 \text{ mm}$
Otáčky	$n = 2550 \text{ ot.min}^{-1}$
Rezná rýchlosť	$v_c = 33,38 \text{ m.s}^{-1}$
Proces brúsenia prebiehal	- za sucha
Brúsny kotúč	- keramický kotúč
Vyhodnocovanie	- kolmo na smer brúsenia



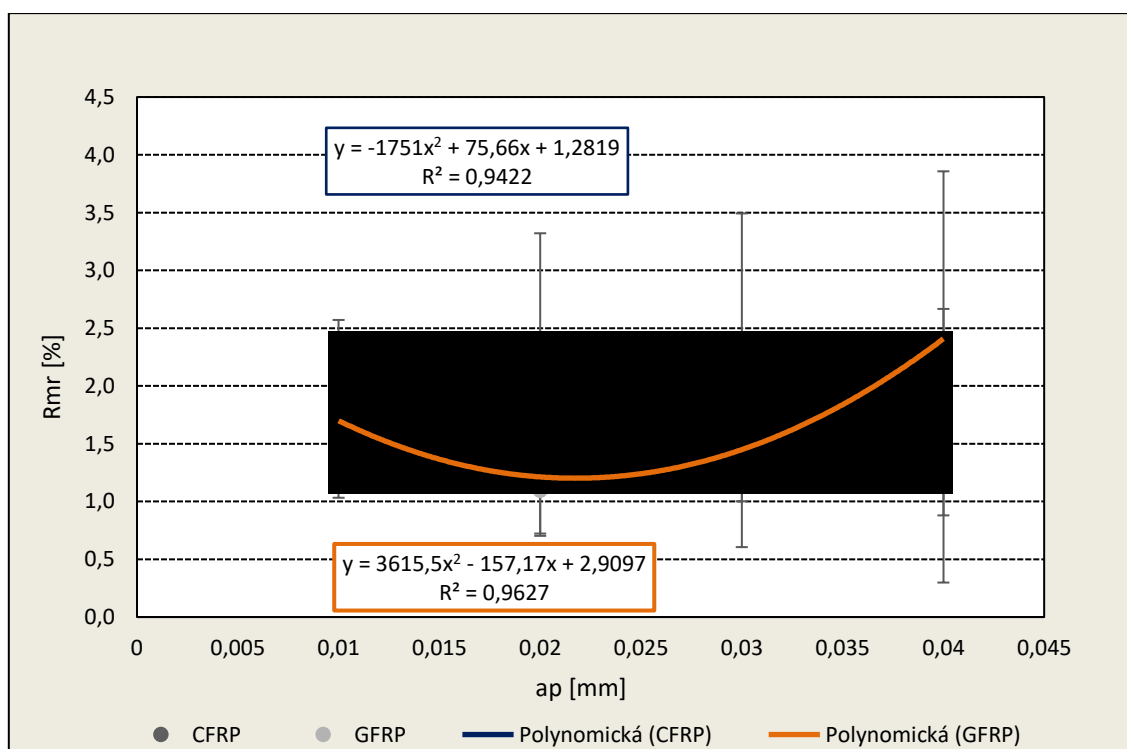
Graf 9. Závislosť priemernej aritmetickej odchýlky posudzovaného profilu (R_a) od úberu materiálu (a_p) pri použití keramického kotúča



Graf 10. Závislosť' výšky nerovnosti posudzovaného profilu (R_z) od úberu materiálu (a_p) pri použití keramického kotúča



Graf 11. Závislost střední vzdálenosti rýh posuzovaného profilu (R_{Sm}) od úberu materiálu (a_p) při použití keramického kotůča



Graf 12. Závislost materiálového podílu drsnosti posuzovaného profilu (R_{mr}) od úberu materiálu (a_p) při použití keramického kotůča

Zhodnotenie

Pri zmene technologických podmienok bola podľa zadania stanovená ako konštantná rýchlosť posuvovej rýchlosti a sledoval sa trend vplyvu závislosti úberu materiálu na povrchové vlastnosti obrábaných vzorkov. Tak ako v prvom zadaní aj teraz hodnoty povrchy kvality uhlíkového laminátu CFRP boli v nižších hodnotách. Brúsnym nástrojom bol kotúč z korundu.

V prvom priebehu (Graf 9.) bola sledovaná závislosť priemernej aritmetickej odchýlky posudzovaného profilu Ra od úberu materiálu a_p . Hodnoty uhlíkového kompozitu a skleneného kompozitu mali pri vyhodnocovaní vplyvom úberu materiálu rozdielne priebehy závislostí. Kým pri uhlíkovom kompozite sa hodnoty Ra pohybovali v celom rozsahu zmien medzi hodnotami 1,6 – 2,1 μm , pri sklolamináte sa priemerná aritmetická odchýlka povrchu vplyvom väčšieho úberu materiálu zvýšila z priemerných 2,8 μm na 4,2 μm s pomerne malou smerodajnou odchýlkou sledovaného parametra.

Závislosť výšky nerovnosti posudzovaného profilu Rz od úberu materiálu a_p (Graf 10.) mala obdobný charakter ako priebeh aritmetickej odchýlky. Pri nižších úberoch sa hodnota Rz u uhlíkového kompozitu mierne zvýšila. Pri sklolamináte naopak s rastúcou hĺbkou úberu sa hodnoty parametra zvyšovali.

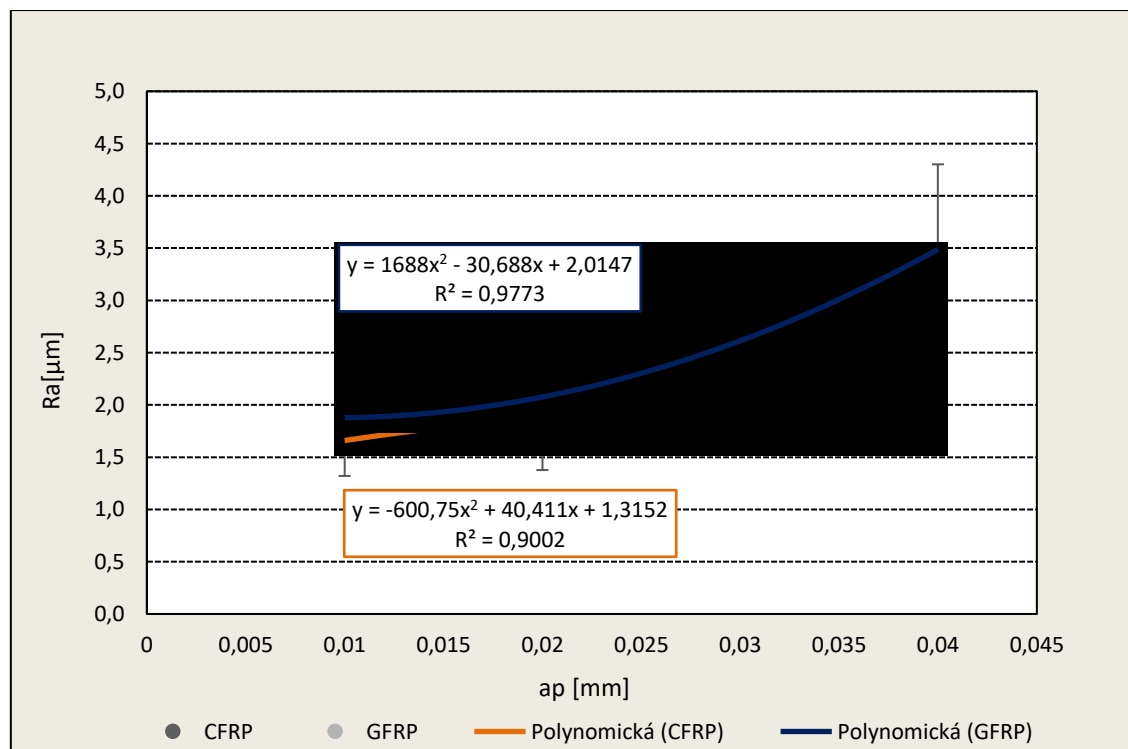
Hodnoty strednej vzdialenosti rýh RSm (Graf 11.) posudzovaného profilu uhlíkového kompozitu sa so zmenšujúcim úberom zvyšujú. Pri kompozite so sklenými vláknami, najnižšie hodnoty dosahujú pri úbere 0,02mm, naopak najvyššie hodnoty dosahuje pri úbere 0,04mm

Závislosť materiálového podielu drsnosti Rmr od úberu materiálu a_p (Graf 12.) ma s rastúcim úberom materiálu pri brúsení protichodný charakter na oba skúmané kompozity. Pri najmenšom úbere 0,01mm mali oba kompozity približne rovnaké hodnoty. Pri úbere 0,02mm kompozity dosahovali hraničné hodnoty parametra Rmr , uhlíkový kompozit dosahoval svoje maximum a sklolaminát minimálne hodnoty.

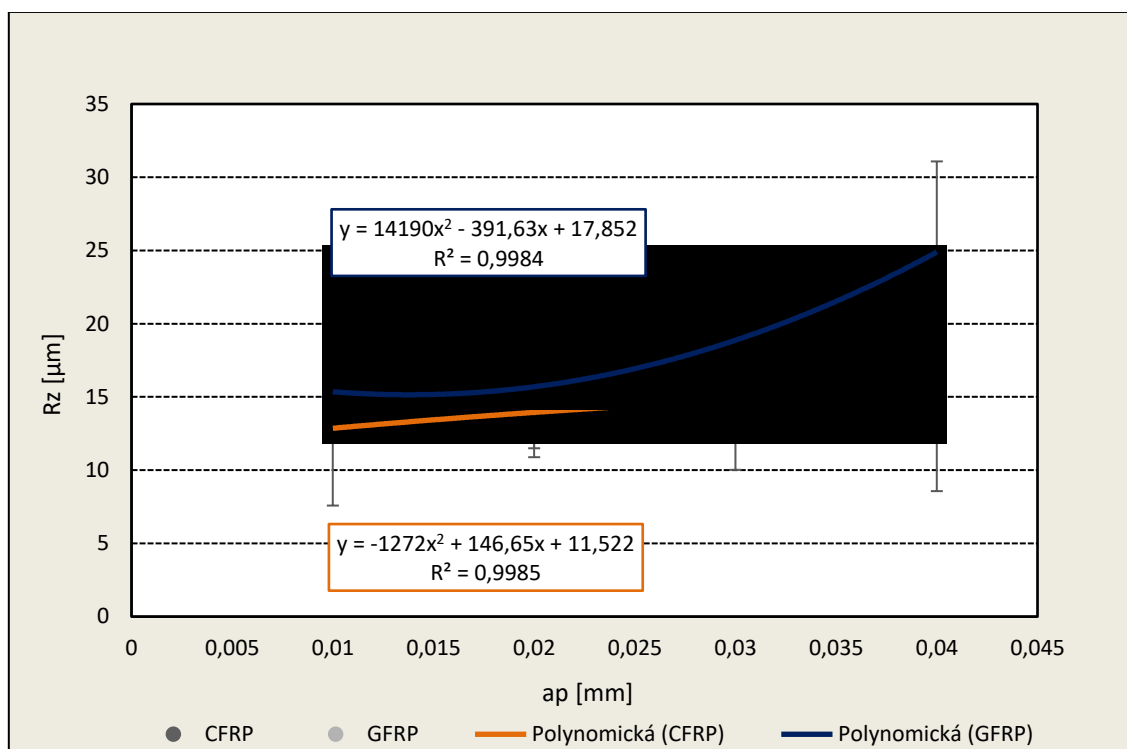
7.2.2 Technologické parametre pri použití kotúča z KNB

Proces brúsenia prebiehal pri nasledujúcich podmienkach

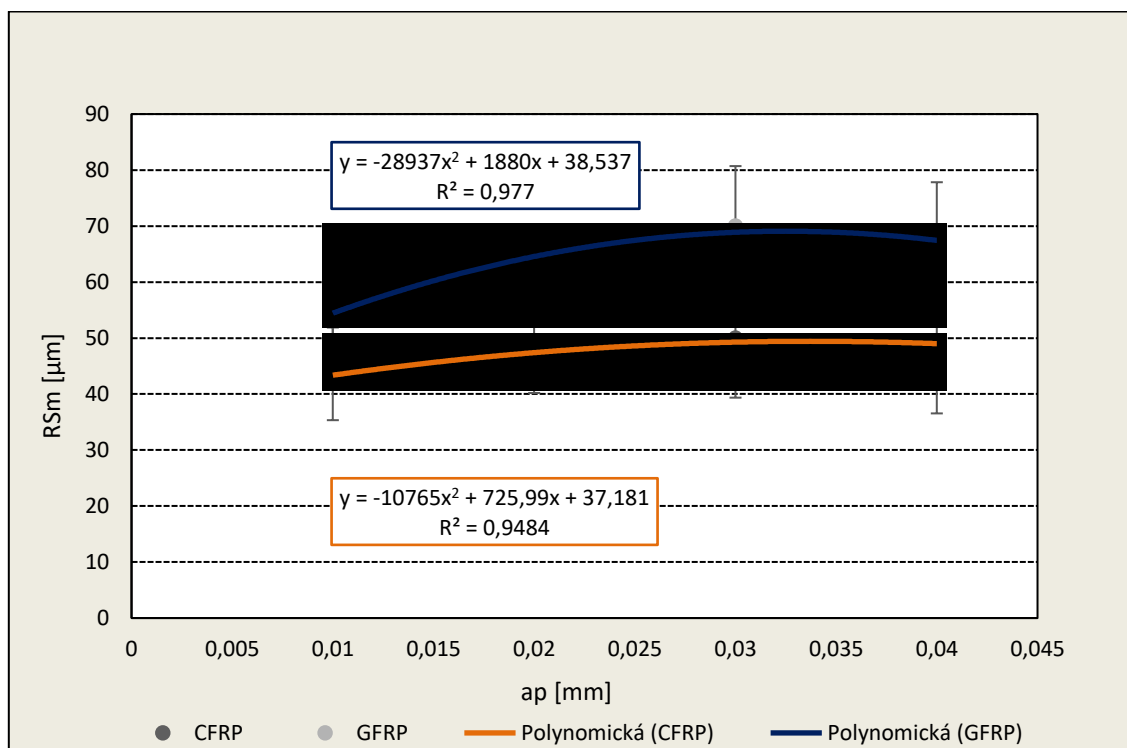
Materiál	- CFRP - GFRP
Rýchlosť posuvu	$v_f = 23 \text{ m.min}^{-1}$
Hĺbka úberu	$a_{p1} = 0,04 \text{ mm}$ $a_{p2} = 0,03 \text{ mm}$ $a_{p3} = 0,02 \text{ mm}$ $a_{p4} = 0,01 \text{ mm}$
Otáčky	$n = 2550 \text{ ot.min}^{-1}$
Rezná rýchlosť	$v_c = 33,38 \text{ m.s}^{-1}$
Proces brúsenia prebiehal	- za sucha
Brúsny kotúč	- kotúč z KNB
Vyhodnocovanie	- kolmo na smer brúsenia



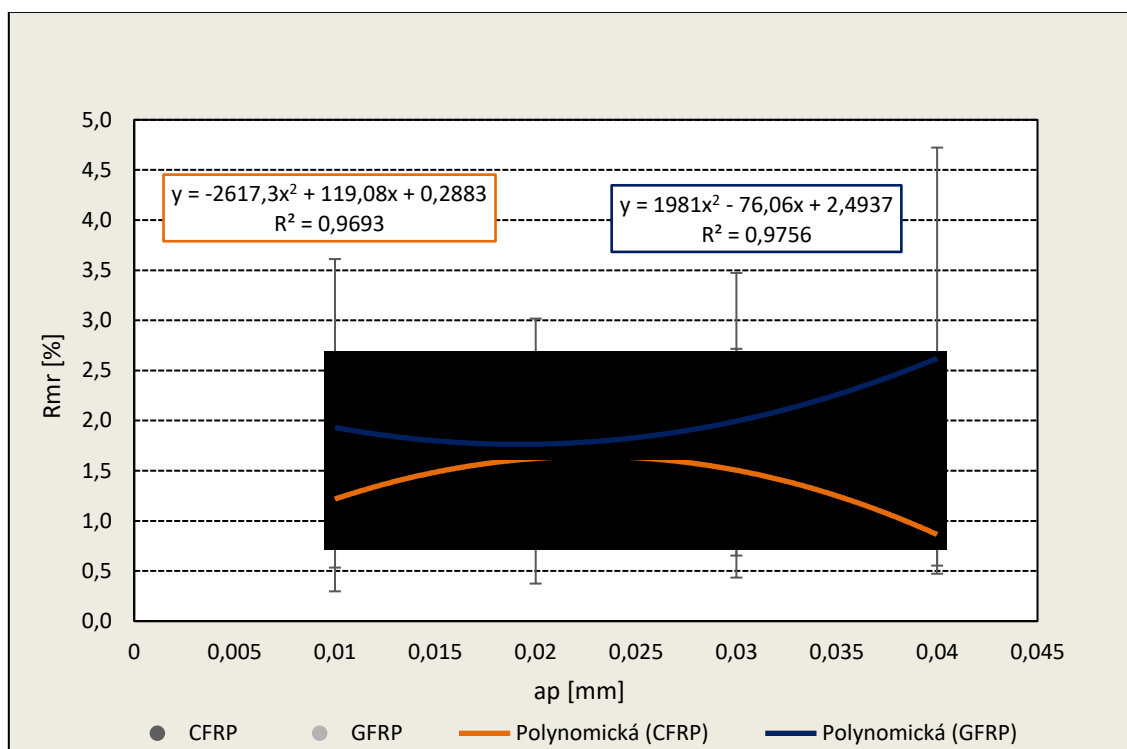
Graf 13. Závislosť priemernej aritmetickej odchýlky posudzovaného profilu (R_a) od úberu materiálu (a_p) pri použití kotúča z KNB



Graf 14. Závislosť výšky nerovnosti posudzovaného profilu (R_z) od úberu materiálu (a_p) pri použití kotúča z KNB



Graf 15. Závislosť strednej vzdialenosti rýh posudzovaného profilu (R_{Sm}) od úberu materiálu (a_p) pri použití kotúča z KNB



Graf 16. Závislosť materiálového podielu drsnosti posudzovaného profilu (R_{mr}) od úberu materiálu (a_p) pri použití kotúča z KNB

Zhodnotenie

Proces úberu sa opakoval pri zmene nástroja. Brúsny kotúč z korundu bol nahradený kotúčom z KNB. Ostatné podmienky procesu zostali nezmenené.

Priebehy priemernej aritmetickej odchýlky R_a kompozitov CFRP a GFRP popisuje Graf 13. Z krivky závislosti je možné odčítať doteraz najnižšie hodnoty drsnosti povrchu u kompozitu so sklenenými vláknami. Z doterajších meraní je možné zhodnotiť, že pri technologických podmienkach úberu $a_p = 0,01$ mm posuvovej rýchlosti $v_f = 23 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a brúsneho kotúča z KNB dosahuje vzorka najlepšie povrchové vlastnosti, porovnateľné so vzorkou uhlíkového kompozitu. Rovnako je to aj v prípade uhlíkového kompozitu, kde možno sledovať že so znižujúcim sa úberom sa zvyšuje kvalita skúmaného povrchu.

Zo závislosti výšky nerovnosti posudzovaného profilu R_z od úberu materiálu a_p možno vidieť opäť najpriaznivejšie hodnoty drsnosti pri nízkych úberoch materiálu pri kompozite GFRP (Graf 14.). Rovnako aj kompozit s uhlíkovými vláknami dosahuje pri nižších úberoch lepšie povrchové vlastnosti a tým aj menšie hodnoty R_z .

Závislost' strednej vzdialenosti rýh posudzovaného profilu RS_m od úberu materiálu a_p (Graf 15.) popisuje rastúci trend hodnôt u oboch vzoriek so zväčšujúcou hĺbkou úberu.

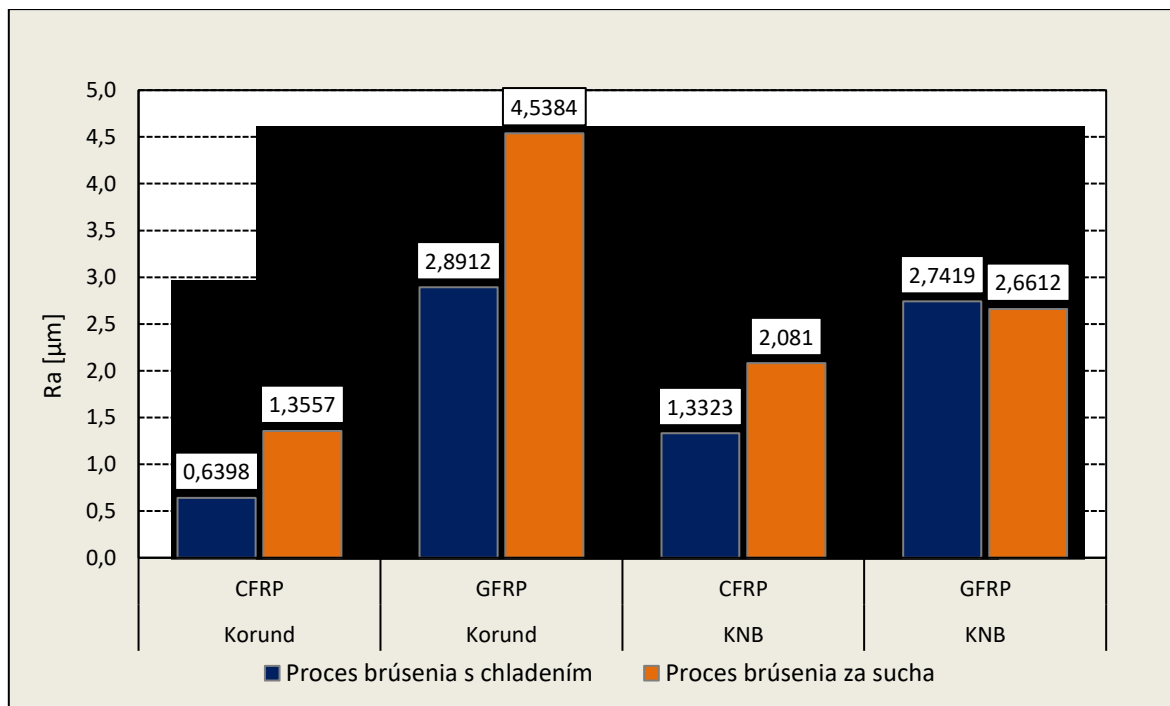
7.3 Vplyv použitia chladiacej kvapaliny na drsnosť povrchu

Pri nasledujúcom meraní sa proces brúsenia kompozitov opakoval s maximálnymi hodnotami oboch konštánt, rýchlosť posuvu v_f bola $23 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a hĺbka úberu a_p bola zvolená $0,04 \text{ mm}$. Zmeneným parametrom bolo chladenie a vplyv chladiacej kvapaliny na výslednú kvalitu povrchu oboch vzoriek. Použité boli obidva brúsne kotúče z predošlých procesov. Ďalšie dôležité parametre sú uvedené v kapitolách 7.3.1.

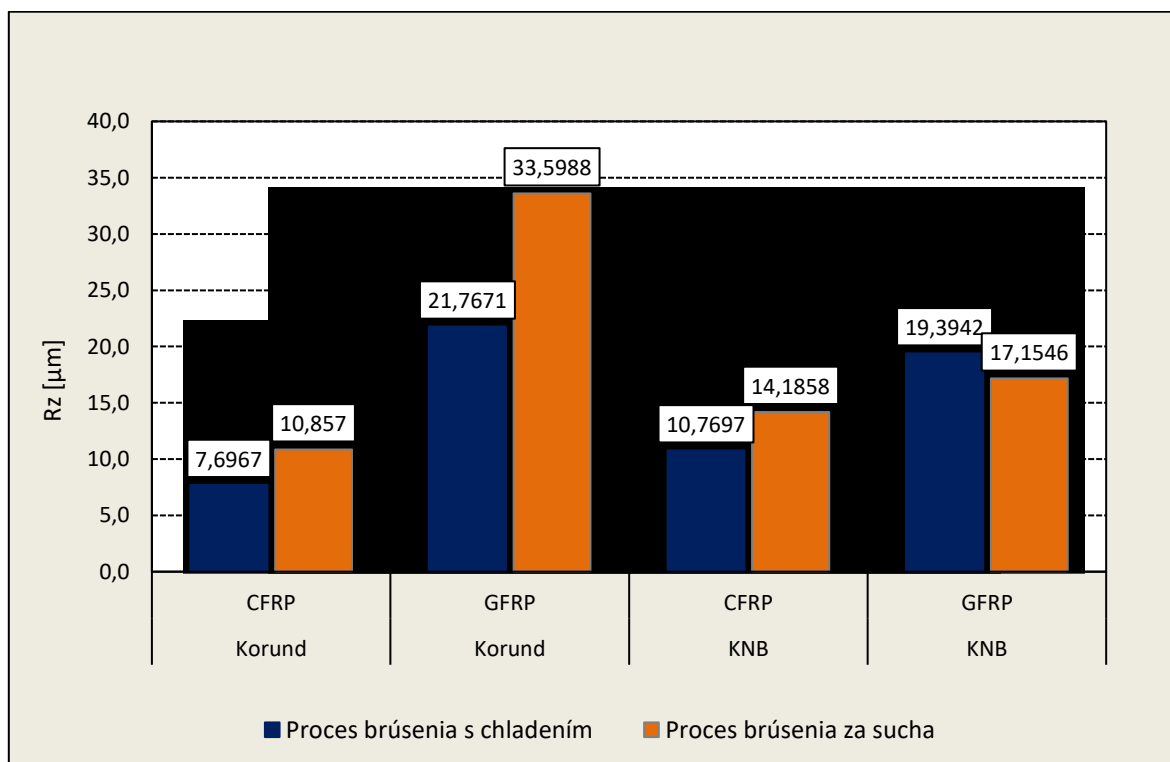
7.3.1 Technologické parametre procesu brúsenia pri použití chladiacej kvapaliny

Zvolenou chladiacou kvapalinou bola kvapalina Microtrend 217M. Proces brúsenia prebiehal pri nasledujúcich podmienkach.

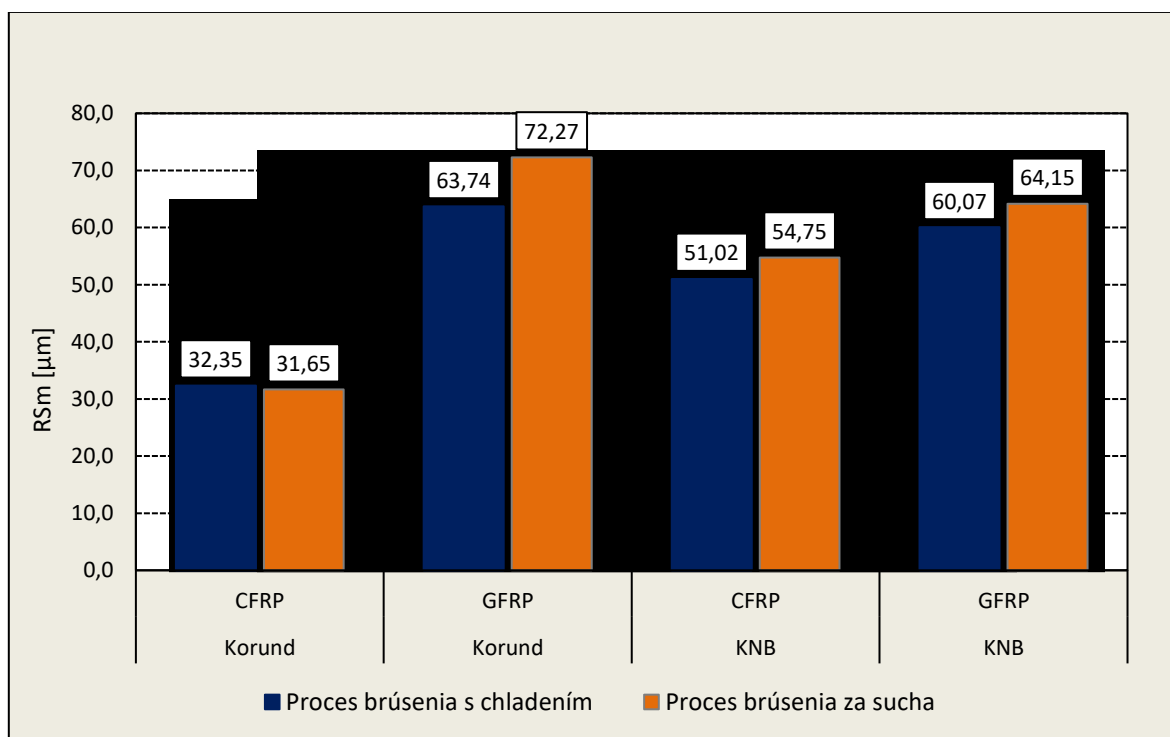
Materiál	- CFRP - GFRP
Rýchlosť posuvu	$v_f = 23 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$
Hĺbka úberu	$a_p = 0,04 \text{ mm}$
Otáčky	$n = 2550 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$
Rezná rýchlosť	$v_c = 33,38 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Proces brúsenia prebiehal	- s chladením
Brúsny kotúč	- kotúč z KNB - keramický kotúč
Vyhodnocovanie	- kolmo na smer brúsenia



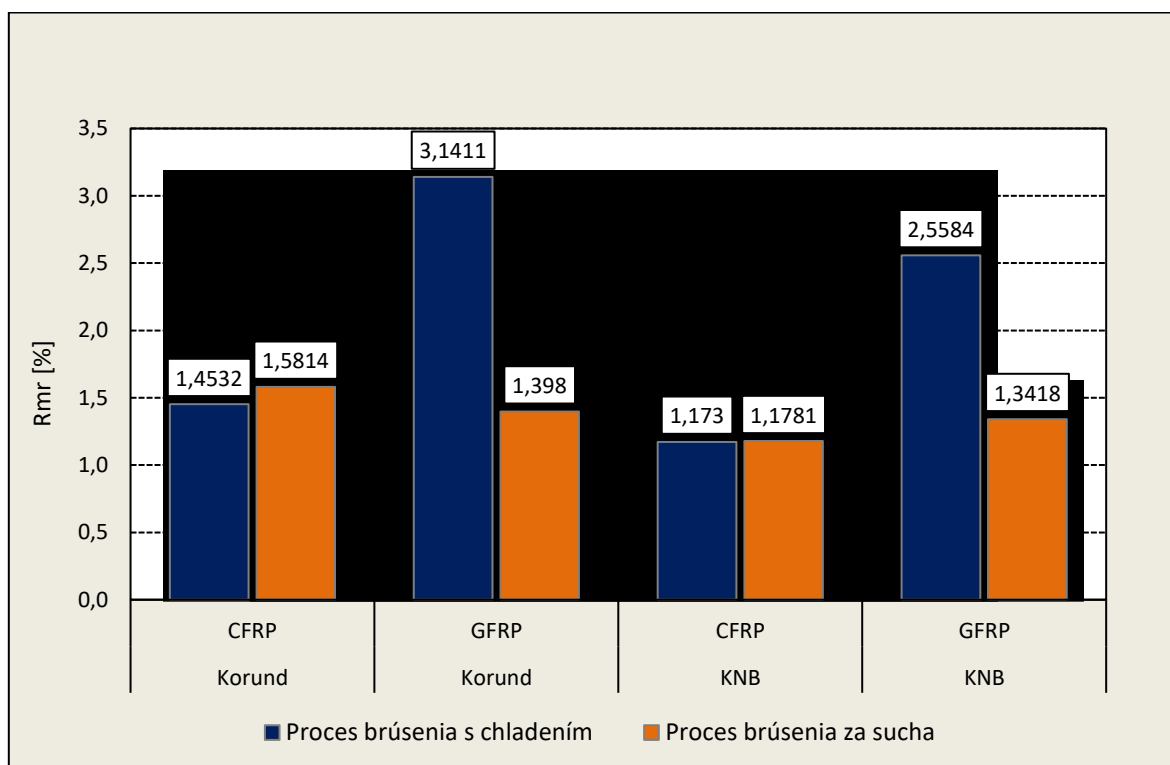
Graf 17. Závislosť priemernej aritmetickej odchýlky posudzovaného profilu (R_a) od typu vzorky a vplyvu chladenia



Graf 18. Závislosť výšky nerovnosti posudzovaného profilu (R_z) od typu vzorky a vplyvu chladenia



Graf 19. Závislosť strednej vzdialenosti rýh posudzovaného profilu (R_{Sm}) od typu vzorky a vplyvu chladenia



Graf 20. Závislosť materiálového podielu drsnosti posudzovaného profilu (R_{mr}) od typu vzorky a vplyvu chladenia

Zhodnotenie

Grafický popis závislosti (Graf 17.) poukazuje na rozdielne hodnoty priemernej aritmetickej odchýlky pri použití chladiacej kvapaliny pri procese brúsenia. Z experimentu možno potvrdiť priaznivý vplyv chladiacej kvapaliny pri brúsení na povrchové vlastnosti kompozitov. Pri použití keramického brúsneho kotúča sa použitím chladiacej kvapaliny Microtrend 217M zlepšili povrchové vlastnosti pri uhlíkovom kompozite o 53% a pri kompozite so sklenými vláknami zlepšenie bolo o 36%.

Pri použití kotúča z kubického nitridu bóru nastalo pri brúsení uhlíkového kompozitu s použitím chladiacej kvapaliny zlepšenie povrchových vlastností o 36%, ale pri brúsení kompozitu zo sklenými vláknami vplyvom chladiacej kvapaliny nastalo mierne zníženie kvality, čo bolo pravdepodobne spôsobené pórovitosťou a veľkým úberom povrchovej vrstvy.

Pre závislosť výšky nerovnosti posudzovaného profilu Rz od použitia chladiacej kvapaliny (Graf 18.) možno predpovedať rovnaké správanie hodnôt ako pri predošlej závislosti (Graf 17.)

Posledné dve grafické závislosti popisujú strednú šírku prvku profilu RSm (Graf 19.) a množstvo materiálového podielu (Graf 20.) od použitia chladiacej kvapaliny pri procese brúsenia. Pre výškové parametre drsnosti profilu Ra , Rz a pre dĺžkový parameter drsnosti profilu RSm je priaznivejšia menšia hodnota, pre parameter materiálového podielu drsnosti profilu Rmr je lepšia väčšia hodnota.

Z uvedených grafických vyhotovení je možné stanoviť pre oba kompozity priaznivý vplyv chladiacej kvapaliny pri voľbe kotúča z kryštalického korundu. Profilogramy priebehov sa nachádzajú v Prílohe IV.

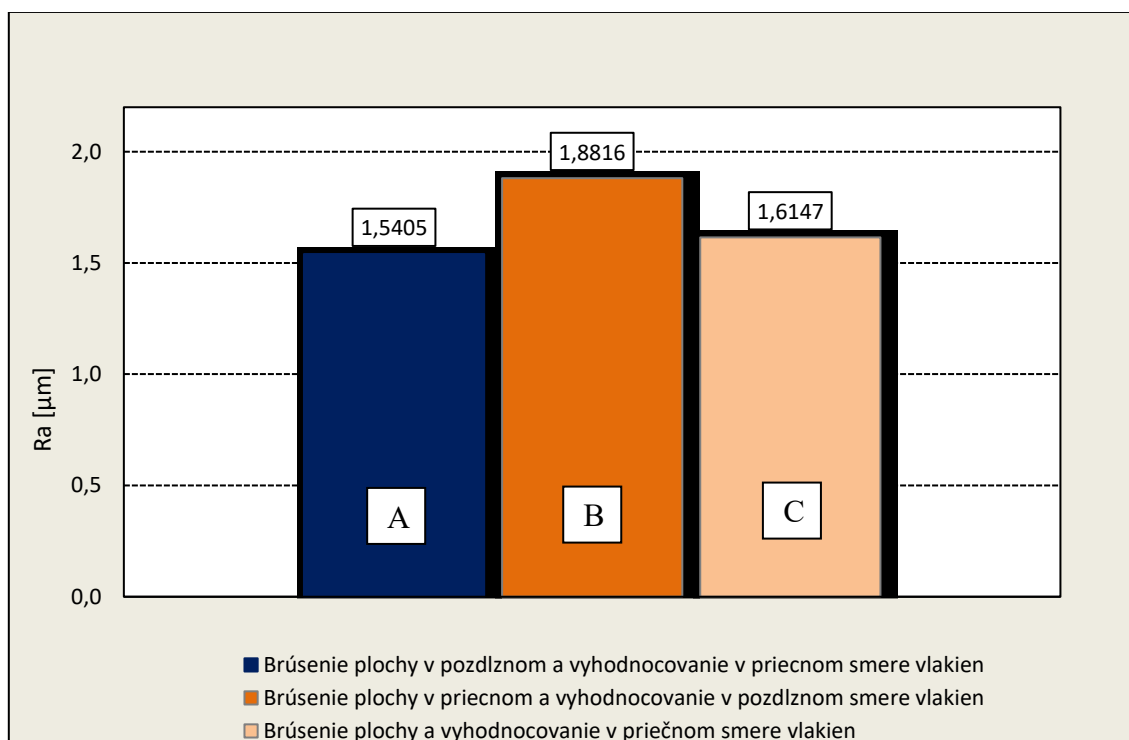
7.4 Vplyv orientácie vlákien na vyhodnocovanú drsnosť povrchu

V nasledujúcom procese brúsenia sa sledoval vplyv smeru orientácie vlákien na smer vyhodnocovania povrchu u oboch vzoriek. Použitý bol keramický brúsny kotúč

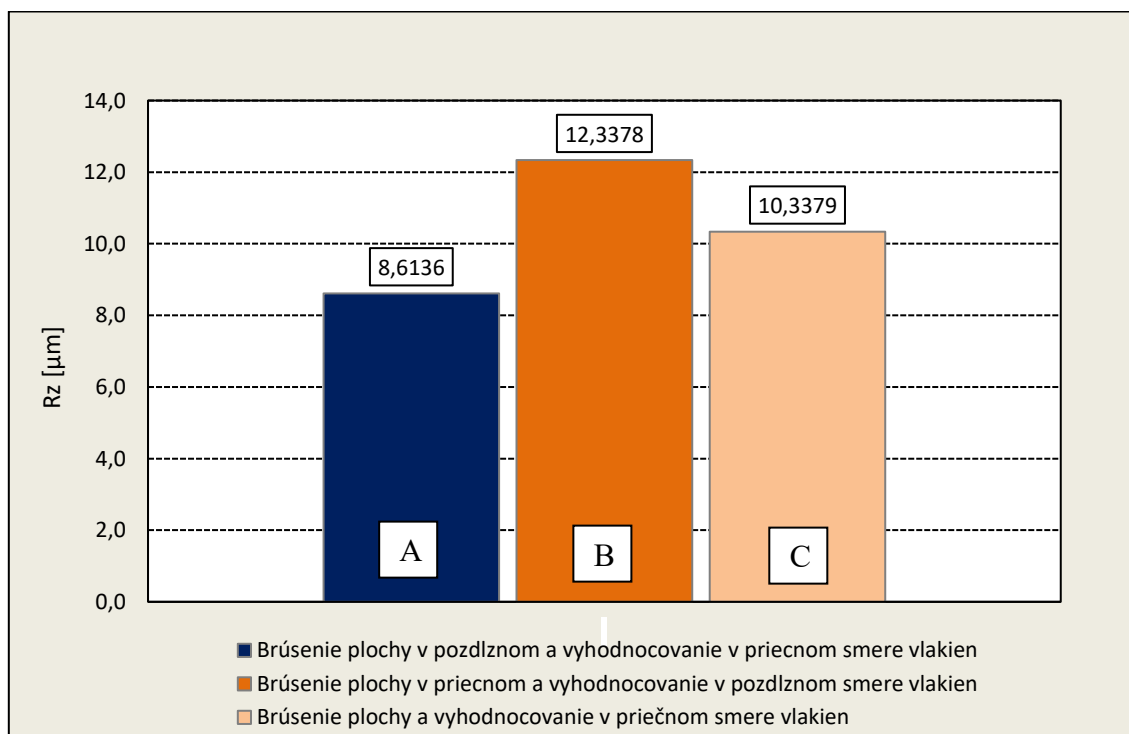
7.4.1 Technologické parametre pri procese brúsenia

Zvolenou chladiacou kvapalinou bola kvapalina Microtrend 217M. Proces brúsenia prebiehal pri nasledujúcich technologických podmienkach.

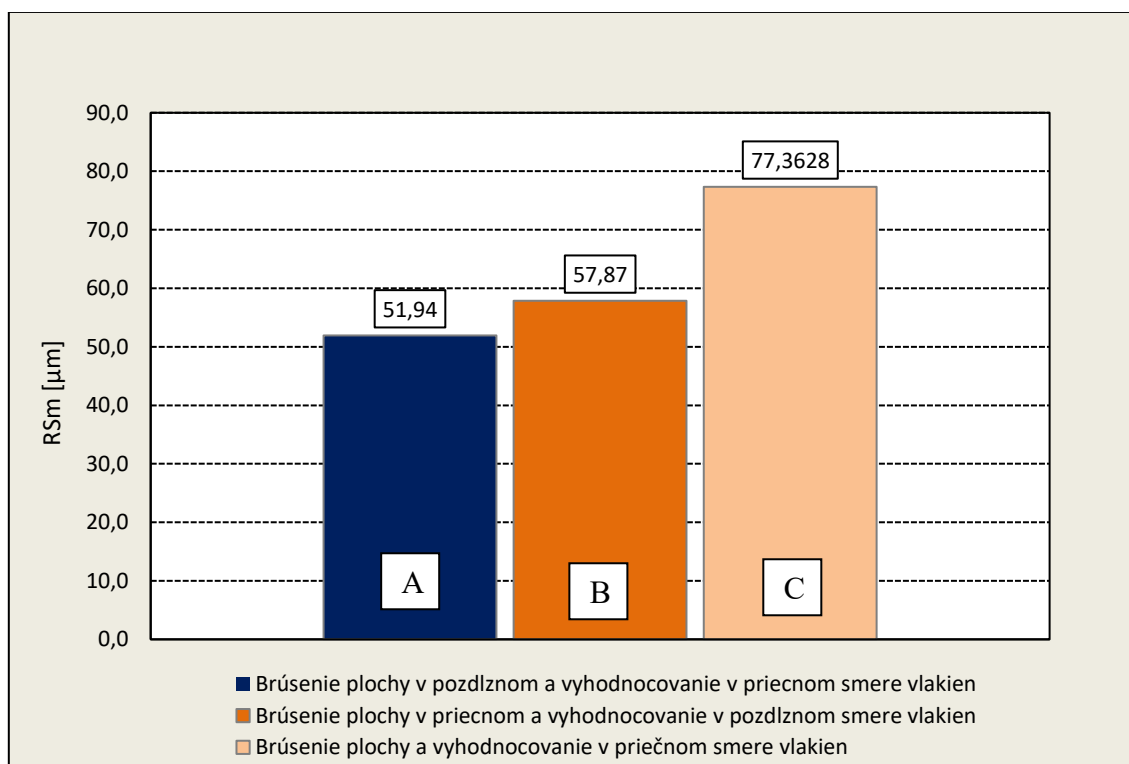
Materiál	- GFRP
Rýchlosť posuvu	$v_f = 23 \text{ m.min}^{-1}$
Hĺbka úberu	$a_p = 0,04 \text{ mm}$
Otáčky	$n = 2550 \text{ ot.min}^{-1}$
Rezná rýchlosť	$v_c = 33,38 \text{ m.s}^{-1}$
Proces brúsenia prebiehal	- za sucha
Brúsny kotúč	- keramický kotúč
Smer brúsenia	- v pozdĺžnom smere vlákien - v priečnom smere vlákien
Vyhodnocovanie	- v priečnom smere vlákien - v pozdĺžnom smere vlákien



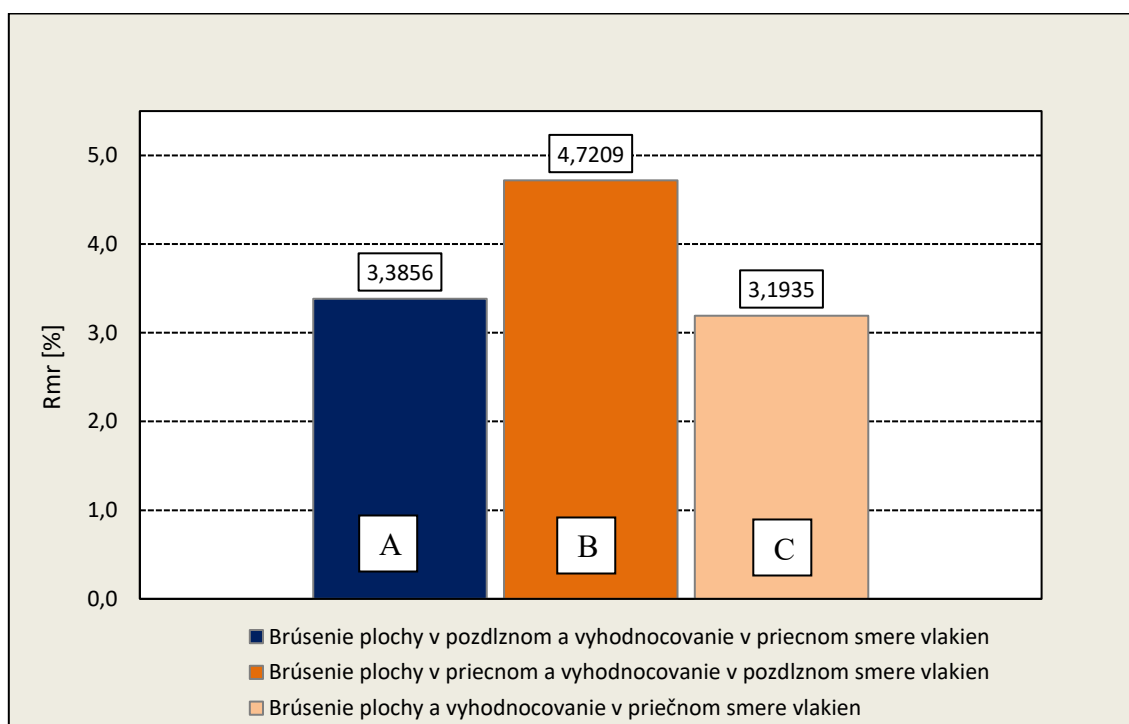
Graf 21. Závislost priemernej aritmetickej odchýlky posudzovaného profilu (R_a) od smeru brúsenia plochy a smeru vyhodnocovania drsnosti



Graf 22. Závislost výšky nerovnosti posudzovaného profilu (R_z) od smeru brúsenia plochy a smeru vyhodnocovania drsnosti



Graf 23. Závislosť strednej vzdialenosti rýh posudzovaného profilu (R_{Sm}) od smeru brúsenia plochy a smeru vyhodnocovania drsnosti



Graf 24. Závislosť materiálového podielu drsnosti posudzovaného profilu (R_{mr}) od smeru brúsenia plochy a smeru vyhodnocovania drsnosti

Zhodnotenie

Pre experiment zistenia závislosti orientácie vlákien na kvalitu povrchu bol zvolený len jeden zástupca a to kompozit so sklenenými vláknami.

Z grafickej závislosti (Graf 21.) je zrejmé, že najlepšie povrchové vlastnosti je možné získať po brúsení v smere orientácie vlákien, kedy nedôjde k intenzívnemu priečnemu porušeniu vlákien a vylamovaniu. Pri priečnom brúsení (C), t.j brúsení v smere kolmom na smer orientácie vlákien bolo meranie uskutočnené v smere brúsenia. Hodnota Aritmetickej odchýlky je porovnateľná s procesom (A), ale tu však mohlo dôjsť k skresleniu v dôsledku rovnakej stopy brúsenia a vyhodnocovania.

Výškový parameter Rz (Graf 22.) dosahuje najvyššiu hodnotu pri brúsení v smere priečnom na smer orientácie vlákien rovnako ako to bolo v prípade priemernej aritmetickej odchýlky Ra . Aj pri výškovej nerovnosti profilu je najnižšia hodnota, keď proces brúsenia prebieha v smere orientácie a vyhodnocovanie v protismere orientácie vlákien.

Pri percentuálnom vyjadrení parametra RSm (Graf 23.) má najnižšie hodnoty proces brúsenia v smere orientácie vlákien v porovnaní s variáciou (B) ide o 11% zlepšenie a s (C) až o 32%.

Pre parameter materiálového podielu Rmr (Graf 24.), má najvyššie hodnoty proces (B) 4,7% proces brúsenia (A) dosahuje hodnotu 3,3% a proces (C) 3,1%. Profilogramy priebehov sa nachádzajú v Prílohe IV.

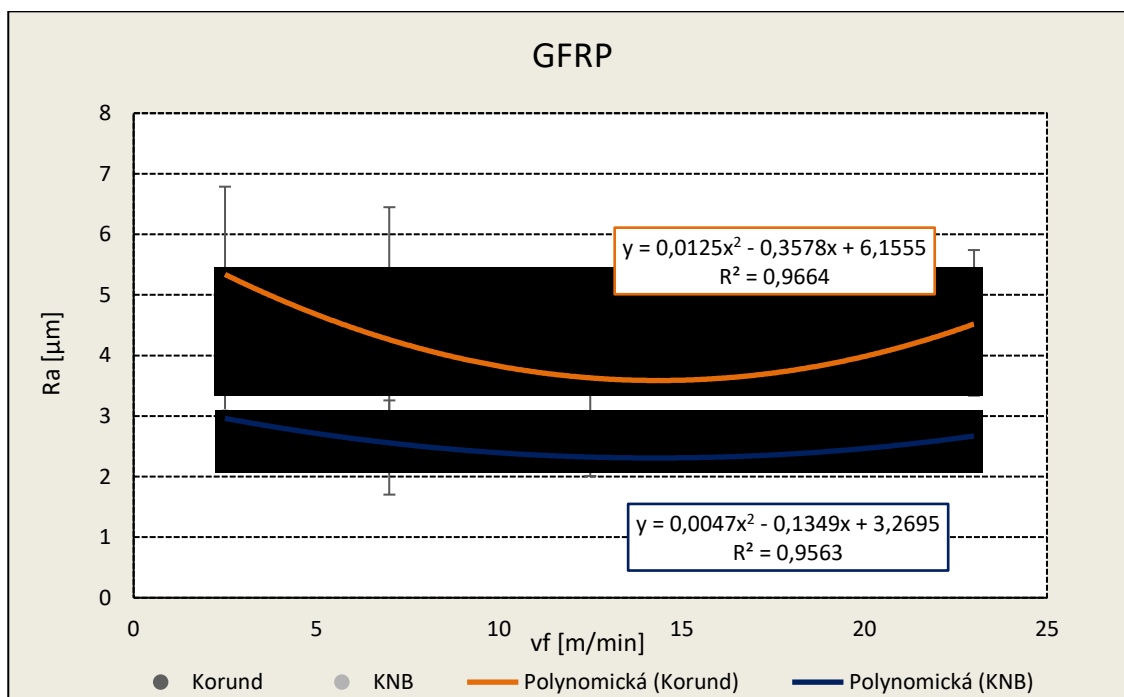
7.5 Vplyv typu brusného kotúča na vyhodnocovanú drsnosť povrchu

V následných grafických vyhotovení je možné vzájomne sledovať vplyv typu brúsneho kotúča na vyhodnocovanú drsnosť povrchu u jednotlivých vzoriek. Vyhodnocovaným parametrom bola tentokrát len priemerná aritmetická odchýlka Ra . Ostatné dôležité parametre sú uvedené v začiatku kapitoly 7.5.1.

7.5.1 Technologické parametre procesu brúsenia pri konštantnom úbere a_p pre kompozit z GFRP

Pre porovnanie kvality povrchu kompozitu GFRP vplyvom typu brúsneho kotúča sa porovnali vzájomne krivky z grafu 1. a grafu 5. kapitoly 7.1.1 a 7.1.2. Proces brúsenia prebiehal pri stanovených technologických podmienkach.

Materiál	- GFRP
Hĺbka úberu	$a_p = 0,04 \text{ mm}$
Rýchlosť posuvu	$v_{f1} = 2,5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ $v_{f2} = 7 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ $v_{f3} = 12,5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ $v_{f4} = 23 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$
Otáčky	$n = 2550 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$
Rezná rýchlosť	$v_c = 33,38 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Proces brúsenia prebiehal	- za sucha
Brúsny kotúč	- keramický kotúč - Kotúč z KNB
Vyhodnocovanie	- kolmo na smer brúsenia



Graf 25. Závislosť priemernej aritmetickej odchýlky posudzovaného profilu (R_a) od rýchlosti posuvu pre materiál z GFRP a použiti dvoch rozdielnych brúsnych kotúčov

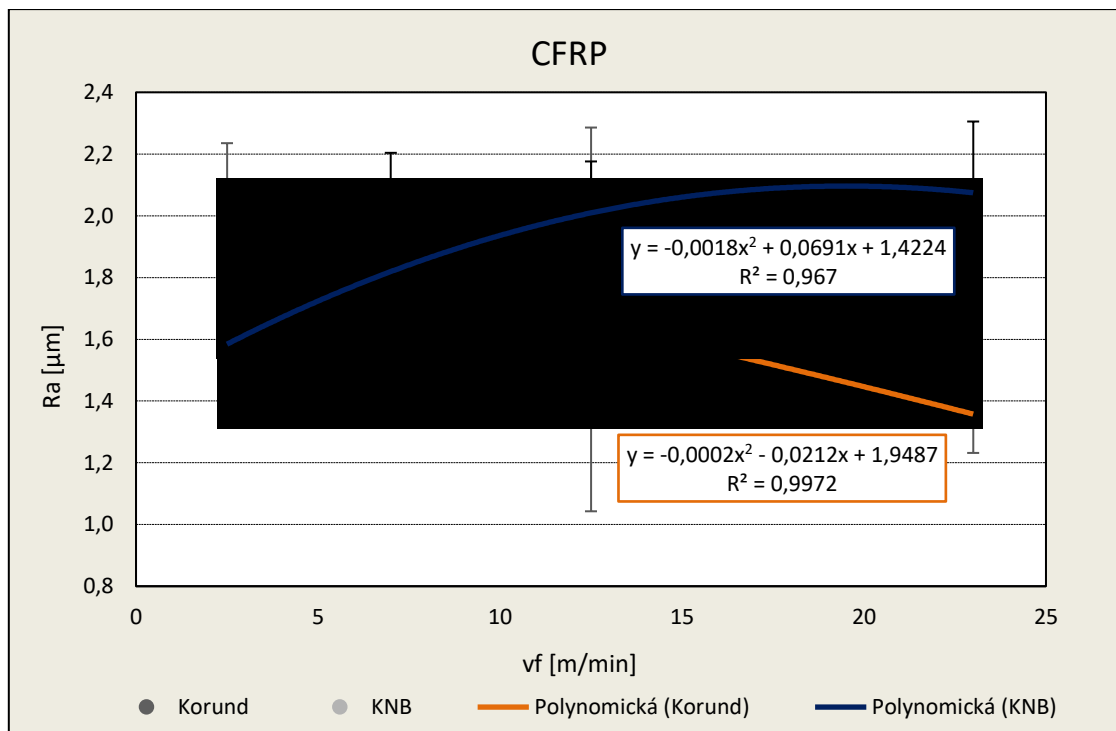
Zhodnotenie

Zo zobrazených priebehov hodnôt profilov drsnosti Ra kompozitu so sklenenými vláknami pri použití oboch brúsnych kotúčov (Graf 25.) možno sledovať rozdielnu kvalitu obrobeneých plôch. Kotúč z kubického nitridu bóru zanecháva povrch s lepšími povrchovými vlastnosťami a nižšími hodnotami parametra Ra . Rovnako pri kotúči z KNB možno sledovať menší rozptyl nameraných dát a tým aj menšiu smerodajnú odchýlku parametra.. Výsledok môže byť ovplyvnený aj stupňom čistoty oboch vzoriek po procese brúsenia. Kompozit je pórovitý materiál, prítomnosť pórov je značne ovplyvnené technológiou zhotovenia, ale póry vznikajú aj vylamovaním kúskov epoxidu zrnami brúsneho kotúča. Optimálne hodnoty parametra Ra kompozit dosahuje teda pri voľbe kotúča z KNB a rýchlosti posuvu $v_{f3} = 12,5 \text{ m.min}^{-1}$

7.5.2 Technologické parametre procesu brúsenia pri konštantnom úbere a_p pre kompozit z CFRP

Pre vzájomnú závislosť parametra Ra a rýchlosti posuvu, pre uhlíkový kompozit sa použili opäť vyhodnotenia z grafov 1. a 5. z kapitol 7.1.1 a 7.1.2. Proces brúsenia prebiehal pri stanovených technologických podmienkach.

Materiál	- CFRP
Hĺbka úberu	$a_p = 0,04 \text{ mm}$
Rýchlosť posuvu	$v_{f1} = 2,5 \text{ m.min}^{-1}$ $v_{f2} = 7 \text{ m.min}^{-1}$ $v_{f3} = 12,5 \text{ m.min}^{-1}$ $v_{f4} = 23 \text{ m.min}^{-1}$
Otáčky	$n = 2550 \text{ ot.min}^{-1}$
Rezná rýchlosť	$v_c = 33,38 \text{ m.s}^{-1}$
Proces brúsenia prebiehal	- za sucha
Brúsny kotúč	- keramický kotúč - Kotúč z KNB
Vyhodnocovanie	- kolmo na smer brúsenia



Graf 26. Závislosť priemernej aritmetickej odchýlky posudzovaného profilu (R_a) od rýchlosti posuvu pre materiál z CFRP a použiti dvoch rozdielnych brúsnych kotúčov

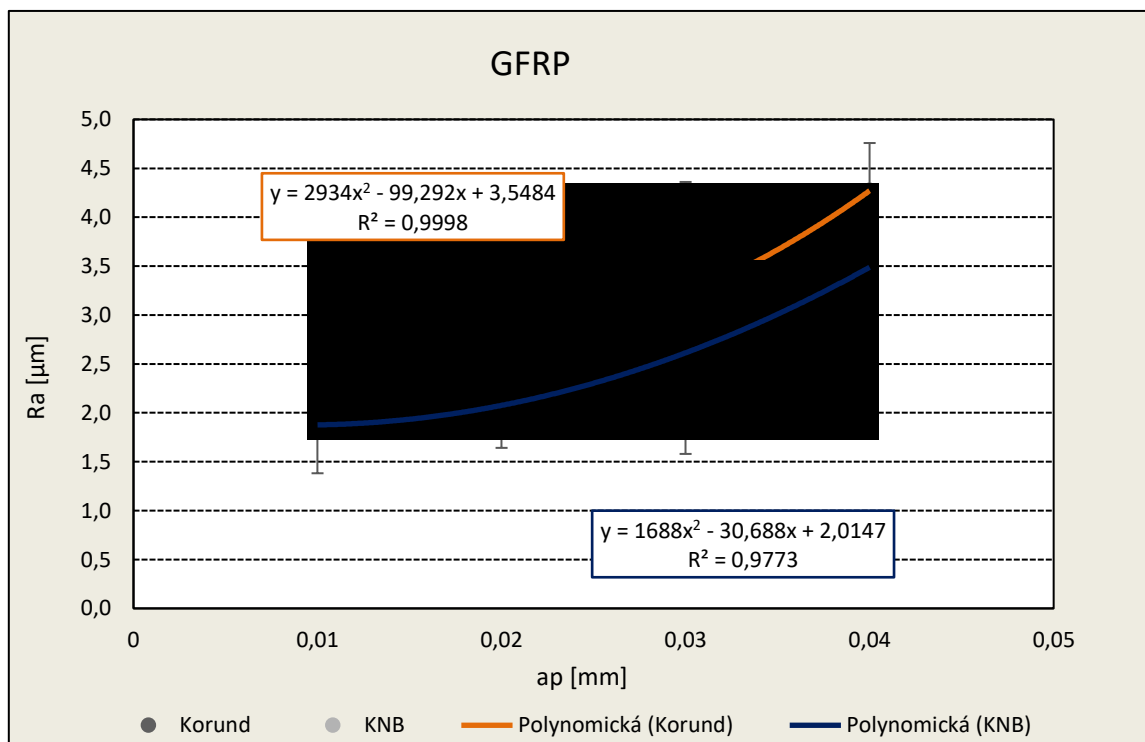
Zhodnotenie

Pre kompozit z uhlíkovými vláknami má závislosť typu brúsneho kotúča v závislosti od rýchlosti posuvu v_f rozdielne hodnoty pri nižších a vyšších rýchlostiach. Ak hovoríme o nižších posuvových rýchlostiach je pre kompozit CFRP vhodnejší brúsny kotúč z KNB. Naopak, v súvislosti s vyššími posuvovými rýchlosťami je pre tento kompozit vhodnejší kotúč z kryštalického korundu, kedy jeho hodnoty sa pohybujú priemerne okolo hodnoty $1,356\mu\text{m}$. Jedná sa o najnižšiu priemernú aritmetickú odchýlku profilu pri brúsení kompozitu za sucha v tomto experimente oboch kompozitných vzoriek. S použitím chladiacej kvapaliny, ako bolo uvedené v predošlej stati je možné drsnosť povrchu ešte znížiť.

7.5.3 Technologické parametre procesu brúsenia pri konštantnej v_f pre kompozit z GFRP

Pre porovnanie vzájomnej závislosti drsnosti povrchu kompozitu GFRP od typu brúsneho kotúča pre konštantnú rýchlosť posuvu, boli použité vyhodnotenia z grafov 7. a 13. z kapitol 7.2.1 a 7.2.2. Proces brúsenia prebiehal pri stanovených technologických podmienkach.

Materiál	- GFRP
Rýchlosť posuvu	$v_f = 23 \text{ m.min}^{-1}$
Hĺbka úberu	$a_{p1} = 0,04 \text{ mm}$ $a_{p2} = 0,03 \text{ mm}$ $a_{p3} = 0,02 \text{ mm}$ $a_{p4} = 0,01 \text{ mm}$
Otáčky	$n = 2550 \text{ ot.min}^{-1}$
Rezná rýchlosť	$v_c = 33,38 \text{ m.s}^{-1}$
Proces brúsenia prebiehal	- za sucha
Brúsny kotúč	- keramický kotúč - kotúč z KNB
Vyhodnocovanie	- kolmo na smer brúsenia



Graf 27. Závislosť priemernej aritmetickej odchýlky posudzovaného profilu (R_a) od hĺbky úberu pre materiál z GFRP a použiti dvoch rozdielnych brúsnych kotúčov

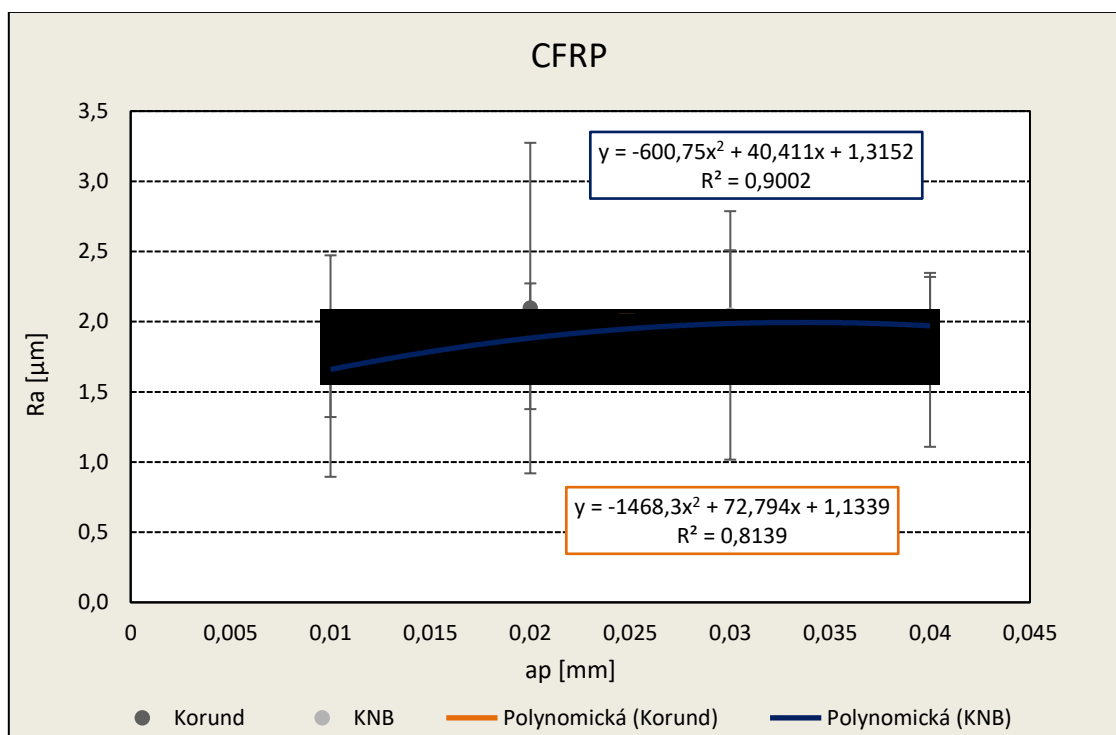
Zhodnotenie

V kapitole 7.2 bola vykonaná analýza vplyvu úberu materiálu na výsledné povrchové vlastnosti kompozitných vzoriek. Kompozit so sklenenými vláknami dosahuje najlepšiu vlastnosť povrchu pri posuvovej rýchlosti v_{f3} a úbere a_{p4} . Závislosť priemernej aritmetickej odchýlky posudzovaného profilu od hĺbky úberu pre materiál z GFRP pri použití dvoch rozdielnych brúsnych kotúčov je zobrazený v Grafe 27. Podľa porovnanej závislosti je zrejmé, že brúsny kotúč z KNB bude zanechávať menšie odchýlky výškového parametra Ra ako brusný kotúč z korundu.

7.5.4 Technologické parametre procesu brúsenia pri konštantnej v_f pre kompozit z CFRP

Pre porovnanie vzájomnej závislosti drsnosti povrchu kompozitu CFRP od typu brúsneho kotúča pre konštantnú rýchlosť posuvu, boli použité opäť vyhodnotenia z grafov 7. a 13. z kapitol 7.2.1 a 7.2.2. Proces brúsenia prebiehal pri stanovených technologických podmienkach.

Materiál	- CFRP
Rýchlosť posuvu	$v_f = 23 \text{ m.min}^{-1}$
Hĺbka úberu	$a_{p1} = 0,04 \text{ mm}$ $a_{p2} = 0,03 \text{ mm}$ $a_{p3} = 0,02 \text{ mm}$ $a_{p4} = 0,01 \text{ mm}$
Otáčky	$n = 2550 \text{ ot.min}^{-1}$
Rezná rýchlosť	$v_c = 33,38 \text{ m.s}^{-1}$
Proces brúsenia prebiehal	- za sucha
Brúsny kotúč	- keramický kotúč - kotúč z KNB
Vyhodnocovanie	- kolmo na smer brúsenia



Graf 28. Závislosť priemernej aritmetickej odchýlky posudzovaného profilu (Ra) od hĺbky úberu pre materiál z CFRP a použiti dvoch rozdielnych brúsnych kotúčov

Zhodnotenie

Závislosť v Grafe 28. popisuje vzťah medzi parametrom Ra a hĺbkou úberu a_p pri výbere brúsneho kotúča pre kompozit z CFRP. Krivky hodnôt vykazujú podobný charakter. Pri väčšom úbere materiálu je v miernej prevahe použitie brúsneho kotúča z korundu, pri nižších úberoch je vhodnejší brúsny kotúč z KNB.

7.6 Štruktúra povrchu vzoriek

Úplný profil je charakterizovaný ako digitálna forma profilu zosnímaného relatívne k referenčnému profilu, vo forme vertikálnych a horizontálnych, navzájom si odpovedajúcich súradníc. Je charakterizovaný vertikálnym a horizontálnym číslicovým krokom. Základný profil (.):

- je základom pre hodnotenie parametrov základného profilu,
- Získa sa potlačením krátkovlnných zložiek profilu povrchu filtra λs .
- Snímané povrchy nasledujúcich profilov boli namerané a vyhotovené a na drsnomeri Mitutoyo SJ-410.

7.6.1 Technologické parametre procesu brúsenia s chladením pre vyhodnotenie profilu P vzorku z CFRP

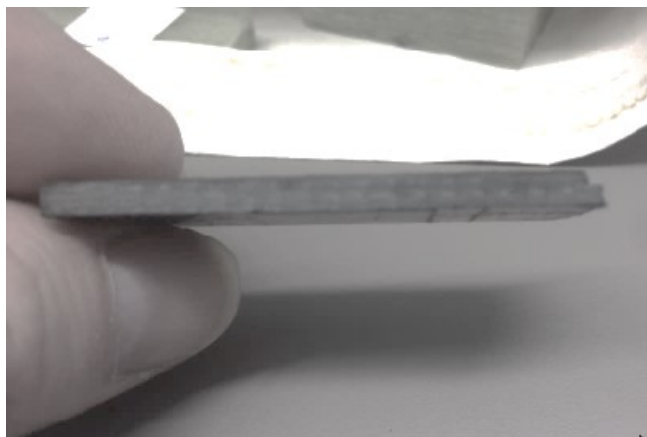
Profilogram uhlíkového kompozitu bol vyhotovený drsnumberom SURFTEST serie SJ410. Proces brúsenia prebehol s použitím chladiacej kvapaliny za daných technologických podmienok uvedených v Tab. 11.

Tab. 11. Primárny profil P materiálového vzorku z CFRP s chladením

Materiál	CFRP	Rezná rýchlosť	$v_c = 33,38 \text{ m.s}^{-1}$
Rýchlosť posuvu	$v_f = 23 \text{ m.min}^{-1}$	Proces brúsenia prebiehal	s chladením
Hĺbka úberu	$a_p = 0,04 \text{ mm}$	Brúsny kotúč	kotúč z KNB
Otáčky	$n = 2550 \text{ ot.min}^{-1}$	Vyhodnocovanie	kolmo na smer brúsenia

<p>Podmienky/Merani</p> <p>Rychl. -N 0.5mm/s Rychl. -Zpet 2.0mm/s Rozsah AUTO Nimo rozs. ESC Komp. reneh Vyp Auto-Start Vyp Auto-Zpet Vyp Zatazeni Vyp Pojezd Zap Vysl. kalib. Vyp Vyber dateku 12AAB403</p>	<p>Podn. vyhodn.</p> <p>Norma ISO1997 Profil P Filtr GAUSS Libo. delka 20.00mm ks 8um Pre/Post Vyp SmazetVin. Vyp Tol. vyhodno. StredHod Komp. Prof. Vyp StredniPr. Cely</p>	<p>Vysledky</p> <p>Pa 7.139 um Pq 7.917 um Pz 34.440 um Pp 15.468 um Pv 18.972 um Psk 0.093 um Pku 1.648 um PSm 2163.6 um [Zr:10.0%]</p>
--	---	--

--	--



Obr. 49. Stopy nerovností zanechané po brúsení brúsnyim kotúčom z KNB

Zo vzťahu posuvovej rýchlosti o stanovení rezných podmienok, pri daných otáčkach

$$n = 2550 \text{ min}^{-1}$$

$$v_f = f \cdot n, [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (18)$$

$$f = \frac{v_f}{n} = \frac{23}{2550} = 9 \text{ mm} \quad (19)$$

kde,

f – posuv na otáčku [mm]

n – otáčky [min^{-1}]

Znázornenie profilu po procese brúsenia odpovedajú skutočnosti že kotúč z KNB zanechával pravidelnú opakujúcu sa stopu na povrchu brúsených vzorkov vplyvom nesprávneho vyváženia.

7.6.2 Technologické parametre procesu brúsenia bez chladenia pre vyhodnotenie profilu P vzorku z CFRP

Profilogram uhlíkového kompozitu bol vyhotovený drsnomerom SURFTEST serie SJ410. Proces brúsenia prebehol bez chladenia za daných technologických podmienok uvedených v Tab. 12.

Tab. 12. Primárny profil P materiálového vzorku z CFRP bez chladenia

Materiál	CFRP	Rezná rýchlosť	$v_c = 33,38 \text{ m.s}^{-1}$
Rýchlosť posuvu	$v_f = 23 \text{ m.min}^{-1}$	Proces brúsenia prebiehal	bez chladenia
Hĺbka úberu	$a_p = 0,04 \text{ mm}$	Brúsny kotúč	kotúč z KNB
Otáčky	$n = 2550 \text{ ot.min}^{-1}$	Vyhodnocovanie	kolmo na smer brúsenia

PodmienkyMereni Rychl. -M 0.5mm/s Rychl. -Zpet 2.0mm/s Rozsah AUTO Mimo rozs. ESC Komp. ramen Vyp Auto-Start Vyp Auto-Zpet Vyp Zatazeni Vyp Pojezd Zap Vysl. kalib. Vyp Vyber doteku 1ZAAB403	Podm. vyhodn. Norma ISO1997 Profil P Filtr GAUSS Libo. delka 20.00mm λs 8um Pre/Post Vyp SmazatVin. Vyp Tol. vyhodno. StredHod Komp.Prof. Vyp StredniPr. Cely	Vysledky Pa 8.132 μm Pq 9.002 μm Pz 36.569 μm Pp 19.125 μm Pv 17.444 μm Psk 0.092 μm Pku 1.632 μm PSm 2638.7 μm [Zr:10.0%]
--	---	---

7.6.3 Technologické parametre procesu brúsenia s chladením pre vyhodnotenie profilu P vzorku z GFRP

Profilogram kompozitu so sklenenými vláknami bol vyhotovený drsnomerom SURFTEST serie SJ410. Proces brúsenia prebehol s použitím chladiacej kvapaliny za daných technologických podmienok uvedených v Tab. 13.

Tab. 13. Primárny profil P materiálového vzorku z GFRP s chladením

Materiál	GFRP	Rezná rýchlosť	$v_c = 33,38 \text{ m.s}^{-1}$
Rýchlosť posuvu	$v_f = 23 \text{ m.min}^{-1}$	Proces brúsenia prebiehal	s chladením
Hĺbka úberu	$a_p = 0,04 \text{ mm}$	Brúsny kotúč	kotúč z KNB
Otáčky	$n = 2550 \text{ ot.min}^{-1}$	Vyhodnocovanie	kolmo na smer brúsenia

PodmienkyMereni Rychl. -M 0.5mm/s Rychl. -Zbet 2.0mm/s Rozsah AUTO Mimo rozs. ESC Komp. ramen Vyp Auto-Start Vyp Auto-Zpet Vyp Zatazeni Vyp Pojezd Zap Vysl. kalib. Vyp Vyber doteku 12AA6403	Podm. vyhodn. Norma ISO1997 Profil P Filtr GAUSS Libo. delka 20.00mm As 8um Pre/Post Vyp SmazatVIn. Vyp Tol. vyhodno. StredHod Komp. Prof. Vyp StredniPr. Cely	Vysledky Pa 7.377 um Pq 8.709 um Pz 63.026 um Pp 18.862 um Pv 44.163 um Psk -0.748 um PKu 4.186 um PSm 1977.9 um [Zt:10.0%]
---	---	---

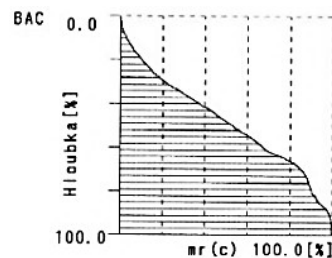
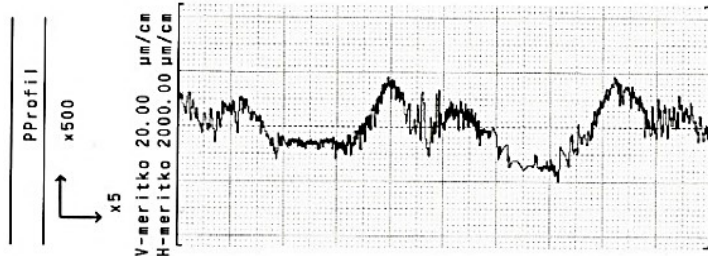
7.6.4 Technologické parametre procesu brúsenia bez chladienia pre vyhodnotenie profilu P vzorku z GFRP

Profilogram kompozitu so sklenenými vláknami bol vyhotovený drsnomerom SURFTEST serie SJ410. Proces brúsenia prebehol bez použitia chladiacej kvapaliny za daných technologických podmienok uvedených v Tab. 14.

Tab. 14. Primárny profil P materiálového vzorku z GFRP bez chladenia

Materiál	GFRP	Rezná rýchlosť	$v_c = 33,38 \text{ m.s}^{-1}$
Rýchlosť posuvu	$v_f = 23 \text{ m.min}^{-1}$	Proces brúsenia prebiehal	bez chladenia
Hĺbka úberu	$a_p = 0,04 \text{ mm}$	Brúsny kotúč	kotúč z KNB
Otáčky	$n = 2550 \text{ ot.min}^{-1}$	Vyhodnocovanie	kolmo na smer brúsenia

PodminkyMereni Rychl. -M 0.5mm/s Rychl. -Zpet 2.0mm/s Rozsah AUTO Mlco rozs. ESC Komp.ramen Vyp Auto-Start Vyp Auto-Zpet Vyp Zatazeni Vyp Pojezd Zap Vysl.kalib. Vyp Vyber doteku 12AAB403		A Podm. vyhodn. Norma ISO1997 Profil P Filtr GAUSS Libo.delka 20.00mm λs 8um Pre/Post Vyp SmazatVn. Vyp Tol.vyhodno. SredHod Komp.Prof. Vyp StredniPr. Cely	
Vysledky Pa 6.837 um Pq 8.232 um Pz 38.705 um Pp 18.705 um Pv 20.001 um Psk -0.058 um Pku 2.313 um PSm 943.8 um [Zt:10.0%]			



ZÁVER

Cieľom tejto diplomovej práce bolo získať základné poznatky o kvalite povrchu kompozitných dielov po procese obrábania. Proces brúsenia a merania prebehol univerzitnom laboratóriu technologickej fakulty.

Skúmané boli materiálové vzorky kompozitu uhlíkovými vláknami (IMP503Z) a kompozitu so sklenenými vláknami SMC (UP GF25). Brúsilo sa s dvoma brúsnymi kotúčmi. Keramický kotúč AG 92/99 80I 8V 85 a brúsny kotúč z KNB - B126 K100 B-VII. Pri brúsení sa postupne obmieňali technologické parametre procesu: rýchlosť posuvu, hĺbka úberu, vplyv chladiacej kvapaliny, smeru brúsenia na smer orientácie vlákien. Vyhodnocovali sa výškové parametre Ra , Rz , RSm a materiálový podiel Rmr . Použité zariadenie na meranie drsnosti bol drsnomer značky Mitutoyo SURFTEST SJ-410. Drsnomer mal vlastnú tlačiareň z ktorého ukážky jednotlivých meraní sa nachádzajú v Prílohe III tohto dokumentu.

Z výsledkov merania je možné všeobecne vyjadriť, že v pri rastúcej rýchlosti posuvu sa kvalita povrchu kompozitu s uhlíkovými vláknami v prípade kotúča z mikrokryštalického korundu zlepšovala, kým pri kotúči z KNB sa mierne zhoršovala. Pri zmene hĺbky úberu, u uhlíkového kompozitu sa priebeh drsnosti povrchu v prípade brúsneho kotúča z korundu výrazne nemenil, kým pri brúsnom kotúči z KNB sa vlastnosti sa zo zväčšujúcou hĺbkou úberu mierne zhoršovali. Pri použití chladiacej kvapaliny u uhlíkového kompozitu sa kvalita ešte podstatne zvýšila pri použití kotúča z korundu približne o 53%, pri kotúči z KNB približne o 36%. Test vplyvu orientácie vlákien na kvalitu povrchu u vzorky s uhlíkovými vláknami neprebehol.

Pri kompozite so sklenenými vláknami najlepšiu kvalitu povrchu, z hľadiska posuvovej rýchlosti dosahovala $v_{f3} = 12,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ Platilo to pre oba použité brúsne kotúče. V súvislosti s úberom materiálu a_p , najlepšie vlastnosti boli získane pri minimálnych úberoch a_{p3} , a_{p4} . Použitie chladiacej kvapaliny s cieľom dosiahnutia lepších povrchových vlastností, pôsobilo aj v prípade sklolaminátu priaznivo. Zlepšenie nastalo o približne 36%. Test vplyvu smeru brúsenia na smer orientácie vlákien ukázal že pri kompozite so sklenenými vláknami sa najvyššia kvalita povrchu dosahuje, keď brúsenie prebieha v smere orientácie vlákien.

Vyber vhodného brúsneho kotúča pri procese brúsenia u oboch vzoriek sa niektorých prípadoch líšil. Pri materiáli z CFRP sa pri vyšších posuvových rýchlostiach javí ako vhodnejší kotúč z korundu, čo následne potvrdili aj test s prídavným chladením kedy hodnoty parametra Ra dosahovali nižšie hodnoty, ako to bolo pri použití kotúča z KNB. Pri sklolamináte sa v súvislosti s dosahovaním lepších povrchových vlastností merania zhodujú jedným brusnom kotúči v celom rozsahu experimentu. Nižšie hodnoty parametra Ra dosahoval kotúč z KNB.

Posledné grafické vyhodnotenie v stati 7.6 sa zaoberá analýzou povrchových vlastností základného profilu oboch vzoriek. Pri brúsení s brúsnym kotúčom z KNB sa na povrchu vzoriek vytvárali stopy Obr.42. Prvé domnienky viedli k nečistote prilepenej na obvode brúsneho kotúča. Vytvorenie profilogramu P -profilu a jednoduchého výpočtu viedli k zisteniu že stopa vznikla nedostatočným vyvážením brúsneho kotúča. Pravidelnosť a vzdialenosť stôp sa rovnajú veľkosti posuvu pri procese brúsenia.

V grafe 13, je možné sledovať, že pri úprave technologických podmienok procesu brúsenia môže kompozit so sklenenými vláknami vykazovať veľmi podobné, alebo lepšie povrchové vlastnosti ako kompozit s uhlíkovými vláknami. Tento poznatok umožňuje optimalizovať výrobný proces brúsenia a znížiť výrobné náklady s cieľom dosiahnutia lepších povrchových vlastností. Sklolaminát je materiál cenovo dostupnejší a tak tento výsledok je možnou otázkou pre ďalšie rozborov a merania v oblasti výskumu kompozitov.

ZOZNAM POUŽITÉJ LITERATÚRY

- [1] MICHNA, Š.: *Technologie a zpracování kovových materiálů*. Adin s.r.o., Prešov, 2010. 326 s. ISBN 978-808-9244-386.
- [2] KORINEK, Z. *Technologie kompozitů*. Dostupné na internete: : [cit. 2017-04-20].
Web: <http://mujweb.cz/zkorinek/technologie.pdf>
- [3] HRIVŇÁK, I.: *Úžitkové vlastnosti a volba materiálu*. Vydavateľstvo STU, 1999, Bratislava. 186 s. ISBN 80-227-1162-4.
- [4] GELETA, V. BACHRATÝ, M.: *Technológia obrábania*. FX s.r.o., 2008, Bratislava. 167 s. ISBN 978-80-89313-43-3.
- [5] GELETA, V.: *Machining technology*. Bratislava: STU v Bratislave, 2010. 165 s. ISBN 978-80-227-3335-9.
- [6] KOČMAN, K.: *Technologické procesy obrábění*. První. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o, 2011, Brno. 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [7] JANÁČ, A. -BÁTORA, B. -BARÁNEK, I. -LIPA, Z.: *Technológia obrábania*. STU v Bratislave, 2004, ISBN 80-227-2031-3
- [8] DRIENSKY, D. - TOMAIDES, J. - FÚRIK, P. - LEHMANNOVÁ, T.: *Strojové obrábanie 1*. Bratislava, Alfa 1984, BKM 063-143-88
- [9] BUDA, J. – SOUČEK, J. – VASILKO, K. *Teória obrábania*. Alfa, 1988, Bratislava. 352 s.
- [10] ČERNÝ, F. - MARŠÁLEK, J. - TRMAL, J. *Brusky a broušení*. 1. vyd. Státní nakladatelství technické literatury, 1970, Praha. 263 s.
- [11] VASILKO, K. - BOKUČAVA, G.: *Brúsenie kovových materiálov*. Alfa, 1988, Bratislava. ISBN 63-465-84
- [12] VELIŠEK, K.: *Obrábacie stroje*. SVŠT v Bratislave, Strojnícka fakulta, 2004, SVŠT v Bratislave. ISBN 80-229-0010-X
- [13] LIPA, Z. - BEZNÁK, M. - KAPUSTOVÁ, M. - MARONEK, M. - PECHÁČEK, F. - ŠKÁRKA, B.: *Priemyselné technológie a výrobné zariadenia*. STU v Bratislave, 2003, ISBN 80-227-1907-2
- [14] KOČMAN, K. - PROKOP, J.: *Technologie obrábění*. Akademické nakladatelství CERM Brno, s.r.o., 2001. ISBN 80-214-1996-2

- [15] ZONGOR, J.: *Technológia obrábania a montáže*. ALFA, Bratislava, 1989. 255 s.
ISBN 80-050-0207-6
- [16] BUMBÁLEK, B. – ODVODY, V. – OŠŤÁDAL, B. *Drsnost povrchu*. 1. vyd. SNTL
– Na kladatelství technické literatury, Praha, 1989. 340 s.
- [17] SKOČOVSKÝ, P. - BOKÚVKA, O. - KONEČNÁ, R. – TILLOVÁ, E. *Náuka o materiáli pre odbory strojnícke*. Žilinská univerzita, Žilina, 2016. 349 s. ISBN 80-8070-593-3
- [18] *Typy tkanin*: HAVEL Composites [online], 2014 [cit. 2017-02-20]. Web :
<<http://www.havel-composites.com/clanky/0-/74-Description-basica-ygeneral-de-los-materiales-usados-al-producir-composites.html>>.
- [19] *Historie a použití kompozitních materiálů u lodí a letadel* [online] [cit.2017-04-20]
Web:<<http://www.volny.cz/zkorinek/historie.pdf>>.
- [20] LITOMISKÝ, L. *Kompozity* [online] [cit. 2017-04-20]. Web: < <http://www.litomisky.cz/mat/c.htm>>.
- [21] BEZECNY, J. *Kompozity*. Studijné materialy pre študentov. AIS Fakulta výrobných technológií Tn UAD. [cit. 2017-04-20]. Web: <<http://www.fpt.tnuni.sk/index.htm>>.
- [22] EHRENSTEIN GOTTFRIED, W. *Polymerní kompozitní materiály*. SCIENTIA v Prahe, 2009. 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6
- [23] PANCL, O. - SUCHÁNEK, J. *Výroba pohledových dílů z polymerů vyztužených uhlíkovými vlákny* [online], 2010 [cit.2017-04-20]. Web: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vyroba-pohledovych-dilu-zpolymeru-vyztuzenych-uhlikovymi-vlakny.html>
- [24] BABJAK, Š. *Základy navrhovania výrobkov pre automobilový priemysel*. [elektronický zdroj (CD-ROM), učebný text], Technická univerzita v Košiciach, Košice 2010, ISBN 978-80553-0564-6.
- [26] *Studium integrity broušeného povrchu* [online], 2010 [cit. 2017-04-22]. Web:
<<http://web.tuke.sk/fvtpo/casopis/pdf08/2-str-11-13.pdf>>.
- [27] FIALA, J. - KRAUS, I. *Povrchy a rozhraní*. Praha: ČVTU, 2009. ISBN 978-80-01-04248-9

- [28] JURENA, Pavel. *Snímání a hodnocení jakosti broušeného povrchu kontaktním a bezkontaktním způsobem*. Diplomová práce UTB-FT. Zlín , 2011, 157 s.
- [29] URDIAMANT s.r.o. - *Brousicí kotouče z diamantu a kubického nitridu boru* [online], 2007 [cit.2017-04-22]. Web: <<http://www.urdiamant.cz/wpimages/other/doc2/BK.pdf>>.
- [30] MITUTOYO Česko s.r.o. - *Přesnost je naší profesí* [online], 2009 [cit. 2017-04-23]. MYTUTOYO. Web: <<http://www.seo-rozcestnik.cz/mitutoyo-cesko-s-r-o-presnost-je-nasi-profesi/mitutoyo-czech-cz>>.
- [31] MASLOV, J. -KLUŇA, J. *Teorie broušení kovů*. 1.st ed. Praha: SNTL, 1979. 246p.
- [32] ÖLVECKÝ, M - *05-brusenie(2)* [online], 2006 [cit.2017-04-24]. Web: < <http://strojarstvo.depi.sk/predmety/maturity/stt/05-brusenie.doc> >.

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

v_T	Požadovaná trvanlivosť nástroja	[min]
F	Rezná sila	[N]
F_C	Hlavná (tangenciálna) sila	[N]
F_p	Prísuvová (radiálna) sila	[N]
F_f	Osová sila	[N]
P_S	Skutočný výkon na hriadeli stroja	[W]
v_k	Obvodová rýchlosť kotúča	[m.min ⁻¹]
k_b	Špecifický rezný odpor pri brúsení	[MPa]
a_z	Stredná hodnota hĺbky odoberanej vrstvy	[mm]
b	Šírka reznej časti zrna	[mm]
z	Počet súčasne zaberajúcich zrn	[-]
D_{max}	Maximálny priemer brúsneho kotúča	[mm]
n_s	Frekvencia otáčania brúsneho kotúča	[ot.mm ⁻¹]
v_c	Rezná rýchlosť	[m.s ⁻¹]
Q_w	Objemový úber	[mm ³ min ⁻¹]
v_o	Obvodová rýchlosť	[m.min ⁻¹]
h	Prísuv	[mm]
v_{ks}	Pozdĺžny posuv	[mm.min ⁻¹]
v_{ob}	Obvodová rýchlosť obrobku	[m.min ⁻¹]
D_{ob}	Priemer obrobku	[mm]
n_{ob}	Počet otáčok obrobku	[ot.mm ⁻¹]
a_p	Hĺbka odoberanej vrstvy materiálu	[mm]
f_n	Relatívny posuv brúsneho kotúča za jednu otáčku obrobku	[mm]

D	Priemer brúsneho kotúča	[mm]
Q	Teplo vzniknuté pri brúsení	[J·s ⁻¹]
Q_c	Celkové množstvo tepla	[J]
Q_t	Množstvo tepla odvedeného trieskou	[J]
Q_n	Množstvo tepla odvedeného nástrojom	[J]
Q_o	Množstvo tepla odvedeného obrobkom	[J]
Q_p	Množstvo tepla odvedeného prostredím	[J]
Al_2O_3	Oxid hlinitý	[-]
Fe_2O_3	Oxid železitý	[-]
V_a	Objemový podiel zložky A	[%]
V_b	Objemový podiel zložky B	[%]
E_a	Modul pružnosti zložky A	[Pa]
E_b	Modul pružnosti zložky B	[Pa]
E_s	Sériový modul pružnosti	[Pa]
E_p	Paralelný modul pružnosti	[Pa]
VBM	Vacuum bag molding	[-]
PTFE	Polytetrafluóretylén	[-]
1D	Jednorozmerný	[-]
2D	Dvojrozmerný	[-]
3D	Trojrozmerný	[-]
PC	Polykarbonát	[-]
PS	Polystyrén	[-]
PE	Polyetylén	[-]
PP	Polypropylén	[-]

PA	Polyamid	[-]
EP	Epoxidové živice	[-]
R_m	Medza pevnosti	[MPa]
E	Modul pružnosti	[Pa]
ρ	Hustota	[g.cm ⁻³]
σ	Merná elektrická vodivost'	[S.m ⁻¹]
P	(Parameter štruktúry) - parameter vypočítaný zo základného profilu	[-]
R	(Parameter drsnosti) - parameter vypočítaný z profilu drsnosti	[-]
W	(Parameter vlnitosti) - parameter vypočítaný z profilu vlnitosti	[-]
L_t	Snímaná dĺžka	[μm]
L_n	Vyhodnocovaná dĺžka	[μm]
L_r	Základná dĺžka	[μm]
m	Stredná čiara profilu	[-]
R_a	Stredná aritmetická odchýlka profilu	[μm]
R_z	Výška nerovností	[μm]
R_m	Maximálna výška nerovností profilu	[μm]
RS_m	Aritmetický priemer širok Xs prvkov profilu v rozsahu základnej dĺžky	[μm]
Rmr	Pomer dĺžky nosnej plochy k celkovej dĺžke profilu	[%]
y_{pmax}	Maximálne prehĺbenie profilu	[μm]
y_{vmax}	Maximálny výstupok profilu	[μm]
ML_n	Dĺžka nosnej plochy	[μm]
ln	Celková dĺžka profilu	[μm]
b_0, b_1	Výberový regresný koeficient	[-]

x_i	Hodnota nezávislej premennej	[-]
v_f	Posuvová rýchlosť	[m.min ⁻¹]
KC	Rázová húževnatosť	[J.cm ⁻²]
α	Tepelná rozťažnosť	[K ⁻¹]
d	Priemer obrobku	[mm]
H	Šírka brúsneho kotúča	[mm]
L	Dĺžka brúsenej plochy	[mm]
n_k	Počet otáčok kotúča	[min ⁻¹]
CFRP	Carbon fiber reinforced polymer	[-]
GFRP	Glass fiber reinforced polymer	[-]
K	Koncentrácia brusiva	[g.cm ⁻³]
λ_c	Veľkosť základnej dĺžky	[mm]
f	Posuv na otáčku	[mm]
n	Počet otáčok	[min ⁻¹]

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1. Ashbyho diagram	11
Obr. 2. Nepravidelný úber.materiálu [8]	16
Obr. 3. Povrch brúseného kotúča [8]	16
Obr. 4. Pohyb pri brúsení: a) brúsenie valcových plôch, b)rovinne brúsenie	17
Obr. 5. Zložky reznej sily [15]	18
Obr. 6. Princíp metódy.na prerušenie procesu brúsenia.....	21
Obr. 7. Vzorka.vzniknutá vytrhnutím z.obrobku [11].....	22
Obr. 8. Základné spôsoby brúsenia	23
Obr. 9. Rovinné brúsenie obvodové [14]	24
Obr. 10. Rovinné brúsenie čelné [14]	24
Obr. 11. Tvary brúsnych kotúčov [12].....	26
Obr. 12. Zloženie brúsneho kotúča [10].....	26
Obr. 13. Skúšanie brúsneho kotúča poklepom.....	30
Obr. 14. Upnutie brúsnych kotúčov	30
Obr. 15. Statické vyvažovanie	31
Obr. 16. Charakteristické vlastnosti kompozitov [17]	34
Obr. 17. Typy tkania [18].....	36
Obr. 18. Rozdelenie kompozitných materiálov.....	37
Obr. 19. Rozdelenie kompozitov podľa geometrie výstuže	39
Obr. 20. Sklenené vlákno	41
Obr. 21. Uhlíkové vlákno.....	42
Obr. 22. Aramidové vlákno.....	43
Obr. 23. Schematické znázornenie a príklad kompozitného materiálu.....	47
Obr. 24. Schéma ručného laminovania	48
Obr. 25. Schéma usporiadania vrstiev pri VBM	49
Obr. 26. Schéma výrobu kompozitu pomocou technológie striekania	49
Obr. 27. Schéma autoklávu [25]	50
Obr. 28. Štruktúra povrchu.....	51
Obr. 29. Drsnosť povrchu	51
Obr. 30. Vlnitosť povrchu	51
Obr. 31. Základné parametre drsnosti	52
Obr. 32. Základné parametre drsnosti povrchu	53

Obr. 33. Priemerná šírka prvkov profilu RSm [28].....	54
Obr. 34. Materiálový podiel profilu Rmr	55
Obr. 35. Jednotlivé vzorky drsnosti povrchu a vzorkovnice.....	56
Obr. 36. Dotyková metóda snímania profilu.....	57
Obr. 37. Dotykový merací prístroj SURFTEST SJ410.....	57
Obr. 38. Optická schéma mikroskopu pre svetelný rez [27].....	58
Obr. 39. Vyhodnocované vzorky CFRP a GFRP	63
Obr. 40. Brúsenie vzorky CFRP	64
Obr. 41. Použitý dotyk 12AAB403- Mitutoyo SJ-400 5 μ m.....	64
Obr. 42. Meracie zariadenie SURFTEST SJ410.....	65
Obr. 43. Rovinná brúska BRH 20.03 F	67
Obr. 44. Keramický kotúč AG 92/99 80I 8V 85.....	69
Obr. 45. Brúsny kotúč z KNB - B126 K100 B-VII	69
Obr. 46. Príklad značenia brúsnych kotúčov Urdiamant 29.....	70
Obr. 47. Rozmery brúsneho kotúča [29].....	70
Obr. 48. Použitá chladiaca kvapalina Microtrend 217M	73
Obr. 49. Stopy nerovností zanechané po brúsení brúsnyim kotúčom z KNB.....	103
Obr. 50. Skúška ťahom uhlíkového kompozitu	131
Obr. 51. Nameraná závislosť pre prepreg IMP 600g/m ² , orientácia výstuže 0°	132
Obr. 52. Skúška ohybom uhlíkového kompozitu.....	133
Obr. 53. Závislosť pre tkaninový IMP Prepreg 600g / m ² , orientácia výstuže 90°	134

ZOZNAM GRAFOV

Graf 1. Závislost' priemernej aritmetickej odchýlky posudzovaného profilu (R_a) od rýchlosti posuvu pri použití keramickom kotúči	75
Graf 2. Závislost' výšky nerovnosti posudzovaného profilu (R_z) od rýchlosti posuvu (vf) pri použití keramickom kotúči.....	75
Graf 3. Závislost' strednej vzdialenosti rýh posudzovaného profilu (R_{Sm}) od rýchlosti posuvu (vf) pri použití keramickom kotúči	76
Graf 4. Závislost' materiálového podielu drsnosti posudzovaného profilu (R_{mr}) od rýchlosti posuvu (vf) pri použití keramickom kotúči	76
Graf 5. Závislost' priemernej aritmetickej odchýlky posudzovaného profilu (R_a) od rýchlosti posuvu (vf) pri použití kotúči z KNB.....	78
Graf 6. Závislost' výšky nerovnosti posudzovaného profilu (R_z) od rýchlosti posuvu (vf) pri použití kotúči z KNB.....	79
Graf 7. Závislost' strednej vzdialenosti rýh posudzovaného profilu (R_{Sm}) od rýchlosti posuvu (vf) pri použití kotúči z KNB	79
Graf 8. Závislost' materiálového podielu drsnosti posudzovaného profilu (R_{mr}) od rýchlosti posuvu (vf)) pri použití kotúči z KNB.....	80
Graf 9. Závislost' priemernej aritmetickej odchýlky posudzovaného profilu (R_a) od úberu materiálu (ap) pri použití keramického kotúča.....	82
Graf 10. Závislost' výšky nerovnosti posudzovaného profilu (R_z) od úberu materiálu (ap) pri použití keramického kotúča	82
Graf 11. Závislost' strednej vzdialenosti rýh posudzovaného profilu (R_{Sm}) od úberu materiálu (ap) pri použití keramického kotúča	83
Graf 12. Závislost' materiálového podielu drsnosti posudzovaného profilu (R_{mr}) od úberu materiálu (ap) pri použití keramického kotúča.....	83
Graf 13. Závislost' priemernej aritmetickej odchýlky posudzovaného profilu (R_a) od úberu materiálu (ap) pri použití kotúča z KNB	85
Graf 14. Závislost' výšky nerovnosti posudzovaného profilu (R_z) od úberu materiálu (ap) pri použití kotúča z KNB	86
Graf 15. Závislost' strednej vzdialenosti rýh posudzovaného profilu (R_{Sm}) od úberu materiálu (ap) pri použití kotúča z KNB	86
Graf 16. Závislost' materiálového podielu drsnosti posudzovaného profilu (R_{mr}) od úberu materiálu (ap) pri použití kotúča z KNB	87

Graf 17. Závislost' priemernej aritmetickej odchýlky posudzovaného profilu (R_a) od typu vzorky a vplyvu chladenia	89
Graf 18. Závislost' výšky nerovnosti posudzovaného profilu (R_z) od typu vzorky a vplyvu chladenia	89
Graf 19. Závislost' strednej vzdialenosti rýh posudzovaného profilu (R_{Sm}) od typu vzorky a vplyvu chladenia	90
Graf 20. Závislost' materiálového podielu drsnosti posudzovaného profilu (R_{mr}) od typu vzorky a vplyvu chladenia	90
Graf 21. Závislost' priemernej aritmetickej odchýlky posudzovaného profilu (R_a) od smeru brúsenia plochy a smeru vyhodnocovania drsnosti	93
Graf 22. Závislost' výšky nerovnosti posudzovaného profilu (R_z) od smeru brúsenia plochy a smeru vyhodnocovania drsnosti	93
Graf 23. Závislost' strednej vzdialenosti rýh posudzovaného profilu (R_{Sm}) od smeru brúsenia plochy a smeru vyhodnocovania drsnosti	94
Graf 24. Závislost' materiálového podielu drsnosti posudzovaného profilu (R_{mr}) od smeru brúsenia plochy a smeru vyhodnocovania drsnosti	94
Graf 25. Závislost' priemernej aritmetickej odchýlky posudzovaného profilu (R_a) od rýchlosti posuvu pre materiál z GFRP a použítí dvoch rozdielnych brúsnych kotúčov	96
Graf 26. Závislost' priemernej aritmetickej odchýlky posudzovaného profilu (R_a) od rýchlosti posuvu pre materiál z CFRP a použítí dvoch rozdielnych brúsnych kotúčov	98
Graf 27. Závislost' priemernej aritmetickej odchýlky posudzovaného profilu (R_a) od hĺbky úberu pre materiál z GFRP a použítí dvoch rozdielnych brúsnych kotúčov	99
Graf 28. Závislost' priemernej aritmetickej odchýlky posudzovaného profilu (R_a) od hĺbky úberu pre materiál z CFRP a použítí dvoch rozdielnych brúsnych kotúčov	101

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1. Príklad označenia brúsneho nástroja.....	29
Tab. 2. Pevnosť niektorých vlákien a whiskerov	38
Tab. 3. Typ spevnenia	41
Tab. 4. Spotreba technických uhlíkových vlákien v tonách [22].....	43
Tab. 5. Mechanické vlastnosti aramidových vlákien [22]	44
Tab. 6. Technické parametre experimentu	62
Tab. 7. Materiál C-IMP503Z (CFRP)	65
Tab. 8. Kompozit so sklenenými vláknami (GFRP)	66
Tab. 9. Parametre rovinatej brúsky BRH 20.03 F	68
Tab. 10. Technické parametre SURFTEST SJ-410	72
Tab. 11. Primárny profil P materiálového vzorku z CFRP s chladením.....	102
Tab. 12. Primárny profil P materiálového vzorku z CFRP bez chladenia	104
Tab. 13. Primárny profil P materiálového vzorku z GFRP s chladením.....	105
Tab. 14. Primárny profil P materiálového vzorku z GFRP bez chladenia	106
Tab. 15. Technická špecifikácia skúšobného stroja ZWICK 1456.....	130
Tab. 16. Dosiachnuté výsledky pre modul pružnosti E a medzu pevnosti σ_M	132
Tab. 17. Dosiachnuté výsledky pre modul pružnosti E a medza pevnosti σ_{fM}	133
Tab. 18. Profilogram povrchu pre kompozit GFRP zo state 7.1.1	135
Tab. 19. Profilogram povrchu pre kompozit CFRP zo state 7.1.1	135
Tab. 20. Profilogram povrchu pre kompozit GFRP zo state 7.1.2.....	136
Tab. 21. Profilogram povrchu pre kompozit CFRP zo state 7.1.2.....	136
Tab. 22. Profilogram povrchu pre kompozit GFRP zo state 7.3.1	137
Tab. 23. Profilogram povrchu pre kompozit CFRP zo state 7.3.1	137
Tab. 24. Profilogram povrchu pre kompozit GFRP zo state 7.3.1	138
Tab. 25. Profilogram povrchu pre kompozit CFRP zo state 7.3.1	138
Tab. 26. Profilogram povrchu pre kompozit GFRP zo state 7.4.1	139
Tab. 27. Profilogram povrchu pre kompozit GFRP zo state 7.4.1	140
Tab. 28. Profilogram povrchu pre kompozit GFRP zo state 7.4.1	141

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha I: Materiálový list imp 503z	122
Príloha II: Microtrend 217M.....	128
Príloha III : Experimentálne skúšky materiálového vzorku.....	130
Príloha IV: Profilogram.....	135

PRÍLOHA I: MATERIÁLOVÝ LIST IMP 503Z



N° 223933

Via Tiepolo, 19 20022 CASTANO PRIMO (MI) Tel. +39 0331 880564 www.impregnatex.it

MATRIX PRODUCT DATA

IMP503Z

ST-130213-rev7-09/01/2015

DESCRIPTION

Modified epoxy resin IMP503Z is suitable for prepregging of carbon/glass and aramid fabrics. IMP503Z with his high transparency is suitable for "carbon look" composite part where high cosmetical requirements are needed. IMP503Z can be used with carbon or metallic mould with the standard technologies: Hot Press, Wrapping, Autoclave and Vacuum Bag.

BENEFITS AND FEATURES

- Field of applications: automotive, sporting goods, marine, industrial
- Different curing cycles are possible
- Good mechanical properties
- UV resistance improved

RESIN PROPERTIES

TYPE		TOUGHENED
Cured resin density	gr/cm ³	1,15 ÷ 1,25
Gel Time at 125 °C (257 °F)	minuti	6'-9'
Gel Time at 110 °C (221 °F)	minuti	20 ÷ 26
TACK		MEDIUM/HIGH
Resin VOC on prepreg	%	< 1
Tg fully cured (Tan Delta DMA)	°C (°F)	120 (248)
Shelf life at room temperature (23 °C)	weeks	5
Shelf Life (-18°C approx)	years	1

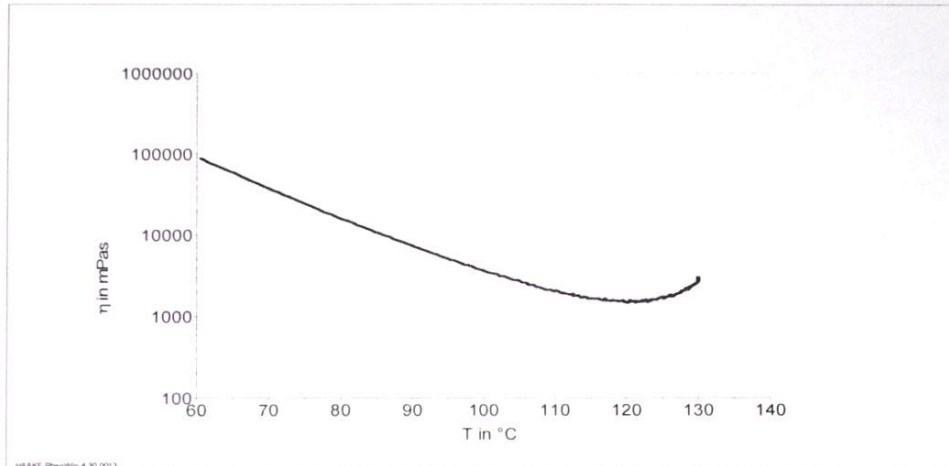
MATRIX PRODUCT DATA

IMP503Z

ST-130213-rev7-09/01/2015

VISCOSITY VS TEMPERATURE BEHAVIOUR

The plot under depicted below is performed with cone-plate rehometer starting from 60°C until viscosity kick off. Parameters: frequency 0.2 Hz and heating rate 3 °C/ min.



CURING CYCLES SUGGESTED

TEMPERATURES	TIME	Tg (TanDelta DMA, °C)
110	2h	120-125
125	1h	120-125

MATRIX PRODUCT DATA

IMP503Z

ST-130213-rev7-09/01/2015

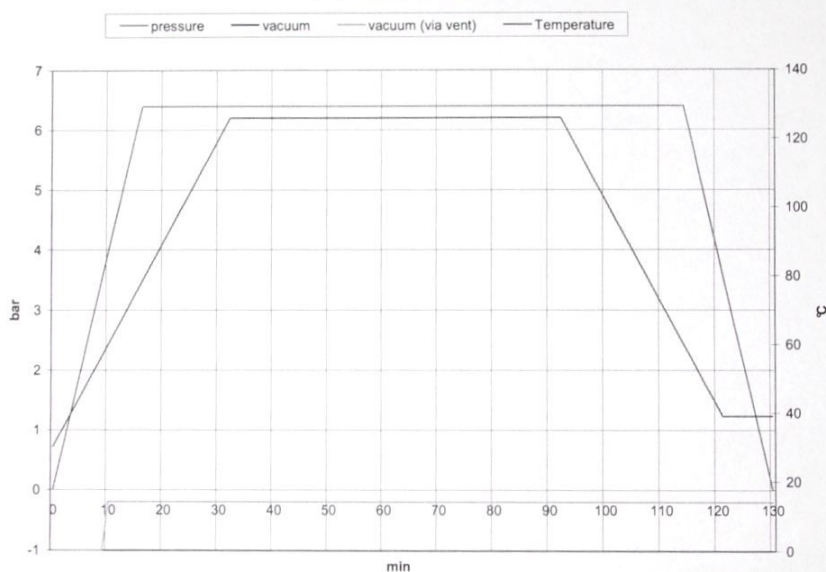
PROCESS DESCRIPTIONS

Autoclave:

125°C cycle

1. After making the bag put it in the autoclave and apply -0.9 + -1.0 bar vacuum
2. Heat to 125°C at 1-3 min/°C rate
3. Apply the pressure, with quick increment slope, in order to reach the maximum possible value (ex. 4-7 bar) before 80°C. Reached the process pressure is possible reduce the vacuum value to -0.2 bar (via vent). This option depend on the evaluations of the autoclave driver.
4. When 125°C temperature is reached dwell it and the pressure for 1h
5. Cool to 60°C under pressure, then release the pressure
6. At room temperature get the part out of the autoclave

AUTOCLAVE CYCLE



Hot Press:

125°C cycle:

1. Put the prepreg material into the mould at room temperature and close the mould at 1Bar pressure
2. Heat to 125°C a 1-3°C/min (3-5°C/min for small part if possible)
3. When 100-110°C is reached apply 2-3 Bar or over if the flow can be controlled
4. When 125°C temperature is reached dwell it and the pressure for 1h
5. Cool to 40-50°C under pressure and pull the part out

IMP503 Z is a reactive epoxy formulation, too high heat up rate and/or too high temperature dwell can give out of control temperature inside the stack lay up when thick laminate are processed (thickness over 1 cm)

These autoclave and hot press cycle are only suggestions based on Impregnatex Compositi experiences and are not absolute way to process properly the material. Different equipments may need different curing cycle conditions.

MATRIX PRODUCT DATA

IMP503Z

ST-130213-rev7-09/01/2015

TYPICAL MECHANICAL PROPERTIES

The mechanical data below were performed on laminate cured by hot press technology at 125°C curing cycle (see above).

FABRIC	Flexural Strength ASTM D790 [Mpa]	Flexural Modulus ASTMD790 [GPa]	G1c mod. ASTM D5528 [J/m ²]	ILSS ASTM 2344 [N/mm ²]	Volume of fibre [%]
GG630T	730	57	800	56	64
GG428T	800	52	-	64	59
GG204T-V (1)	800	54	-	64	59
GG205T	810	55	750	68	58
GG245T	800	54	760	65	56
GG380T	800	55	730	64	62
GG90P	655	52	-	70	65
GG204P	810	53	-	66	59
CX400	938	56	-	54	62 (provini ricavati in direzione +45°)
GG800T	822	60	-	52	64
GG285T4	805	51	-	61	65
VV290T	630	27	-	57	64.8
VV380	710	23	-	64	60

MATRIX PRODUCT DATA

IMP503Z

ST-130213-rev7-09/01/2015

FABRIC	Flexural Strength ASTM D790 [Mpa]	Flexural Modulus ASTM D790 [GPa]	G1c mod. ASTM D5528 [J/m ²]	ILSS ASTM 2344 [N/mm ²]	Volume of fibre [%]
VV580T	760	30	1160	60	56
VV700	750	25	-	56	64
KK300	440	21	-	44	56
GV330UD	1150	115	700	73	66
GV335UD	650	250	-	62	54

The values are to be understood as the average of the experimental values observed.

- (1) is also available as stabilized WF1, for exposed areas where high aesthetic of textile construction must be maintained during the process.

These mechanical data were obtained by hot press technology. With different curing cycle technology these data can be different.

MATRIX PRODUCT DATA**IMP503Z**

ST-130213-rev7-09/01/2015

PREPREG STORAGE LIFE

This prepreg should be stored as received in a cool dry place or in a refrigerator. Storage life at different temperatures:

- 12 Months at -18 °C
- 5 weeks at +23 °C

After removal from refrigerator storage, prepreg should be allowed to reach room temperature before opening the polythene bag to prevent water condensation.

PRECAUTIONS FOR USE

To handle properly the prepreg product observe the established precautions.

Operators working with this prepreg should wear clean and impervious gloves to reduce the possibility of skin contact and to prevent the prepreg contamination
Safety data sheet is available for this product.

NOTE

The above mentioned technical informations are based on our actual knowhow and accurate, reproducible laboratories tests but due to the product complexity and its further processing, is not possible guarantee these.
Impregnatex Compositi will reserve to made further modification to this paperwork

PRÍLOHA II: MICROTREND 217M

Microtrend 217M

Mikroemulzní řezná kapalina

Popis

Microtrend 217 M je zcela biostabilní s vodou mísitelná koncentrovaná řezná kapalina, která tvoří po smíchání s vodou stabilní, průsvitnou do hněda zbarvenou mikroemulzi.

Microtrend 217 M obsahuje velký podíl ropného oleje, který zvyšuje řeznou účinnost a mazání obráběcího nástroje.

Složení Microtrendu 217 M, mikroemulzní řezná kapalina s dlouhou provozní životností, vyhovuje platným bezpečnostním a zdravotním předpisům a doporučením výrobců obráběcích zařízení.

Microtrend 217 M neobsahuje formaldehydy ani fenoly.

Použití

Microtrend 217 M je vhodný pro většinu obráběcích operací středně tažných ocelí, neželezných kovů a litin. V závislosti na koncentraci může být Microtrend 217 M použit i pro náročnější obrábění nebo běžné broušení.

Zřetřovací poměry se mění podle způsobu použití a podle náročnosti provozních podmínek. Jsou navrženy následující hodnoty:

Železné a neželezné kovy

Soustružení, vrtání, vnitřní soustružení	4-6%
Vystružování, řezání závitů, včetně řezání vnitřních závitů	7-10%
Broušení	2-4%
Litina	5-7%

Příprava emulze - k zajištění uspokojivých výsledků při práci s Microtrendem 217 M, především při výměně znečištěné kapaliny, je doporučováno vyčištění a sterilizace jímky a potrubí pomocí BP Systém Cleaner. Systém je pak třeba řádně vypláchnout, aby se zabránilo problémům s pěněním.

Emulze se připravuje přidáváním koncentráту do čisté vody za mírného míchání. Nejlepších výsledků se dosáhne při použití míchacího zařízení.

Ověřování koncentrace Microtrendu 217 M je možno provádět rychle a snadno použitím refraktometru a korelací naměřených hodnot s hodnotami v příslušném grafu vyjadřujícím vztah mezi koncentrací a indexem lomu.

Hlavní výhody

- výborná stabilita emulze v různých druzích vody
- obsahuje biostabilní přísady umožňující dlouhou provozní životnost kapaliny
- prodloužená antikorozní ochrana obráběných součástí i obráběcího zařízení
- nedochází k pění, které by narušovalo obráběcí operace
- snadná kontrola a údržba

- mnohoúčelová kapalina - široký rozsah aplikací i zpracovávaných materiálů
- kapalina zůstává během použití průsvitná, což umožňuje snadnou kontrolu součástí i nástroje
- snadná příprava v míchacím zařízení
- obsah ropného oleje větší než 40 hm%
- neobsahuje sekundární aminy, chlor, fosfor, zinek ani dusitany
- zanechává pouze snadno rozpustné úsady

Skladování

Všechny druhy balení by měly být skladovány v krytém prostoru. Tam, kde je nevyhnutelné skladovat sudy na prostoru, kdy může dojít k zachycení dešťové vody, mají být uloženy horizontálně, aby se tak zabránilo možnému

vniknutí vody a smazání označení sudů. Výrobky by neměly být skladovány při teplotách vyšších než 60°C, vystavovány přímým slunečním paprskům nebo mrazu.

Zdraví, bezpečnost a životní prostředí

Zdravotní, bezpečnostní a ekologické informace pro práci s výrobkem jsou obsaženy v bezpečnostních listech. Tam jsou uvedeny podrobnosti případných rizik, ochranných opatření a opatření první pomoci vedle ekologických účinků a pokynů pro likvidaci použitých výrobků.

Společnost BP ČR, s.r.o. nepřijímá odpovědnost, pokud je produkt používán jiným způsobem nebo pro jiné účely než je stanoveno. Před použitím výrobku k jinému než uvedenému účelu se poraďte s dodavatelem.

Typické vlastnosti

	Zkušební metoda	Jednotky	Koncentrát
Barva			hnědá
Hustota při 15°C	ISO 3675, ASTM D 1298	kg/m ³	985
Kinematická viskozita při 20°C	ISO 3105, ASTM D 445	mm ² /s	200
při 40°C			65
Obsah ropného oleje		%	42
Barva po zředění			průsvitně hnědá
pH (5% roztok)			9.1
Korozní zkouška dle Herberta (2% roztok)	IP 125		0/0-0
Korozní zkouška na filtračním papíře (2.5% roztok)	IP 287	%	žádná koroze
Refrakční poměr			1.0

Výše uvedené údaje jsou typickými údaji získanými při normálních výrobních tolerancích a nepředstavují specifikaci.

Uvedená data a informace je třeba považovat za aktuální k datu tisku. Žádné závazky nebo prohlášení vyjádřené výslovně či samozřejmě předpokládané nemohou být činěny na základě souboru přesných dat uvedených v této publikaci.

Je povinností uživatele používat výrobek bezpečně a v rozsahu deklarovaných vlastností v souladu s existujícími zákony a normami. Žádná pasáž uvedená v této publikaci nebude vykládána jako svolení, doporučení nebo autorizace opravňující k patentování myšlenek bez platné licence.

Prodávající nebude odpovědný za ztráty a škody vyplývající z nezodpovědného a nebezpečného zacházení, nerespektujícího instrukce uvedené v této informaci, které jsou společné i ropným výrobkům (toto zřeknutí se odpovědnosti nebude omezovat zákonná práva kupujícího, který využívá ropné výrobky).

BP ČR, s.r.o. 01.11.2002
Ohradní 1424/2b
140 00 Praha 4
Tel.: 296 770 555


PRÍLOHA III : EXPERIMENTÁLNE SKÚŠKY MATERIÁLOVÉHO VZORKU

Rýchlosť pri meraní modulu pružnosti $v = 1 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Skúšobná rýchlosť skúšky bola $v = 10 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. L_0 nastavená na extenzometri na 60mm.

Meracie experimenty prebehli v laboratórnych zariadenia FT UTB na univerzálnom skúšobnom stroji Zwick 1456. Na materiálových vzorkách postupne prebiehali skúšky pevnosti

- Skúška ťahom podľa normy ČSN EN ISO 527 – 4,5
- Skúška ohybom podľa normy ČSN EN ISO 14 125

Tab. 15. Technická špecifikácia skúšobného stroja ZWICK 1456

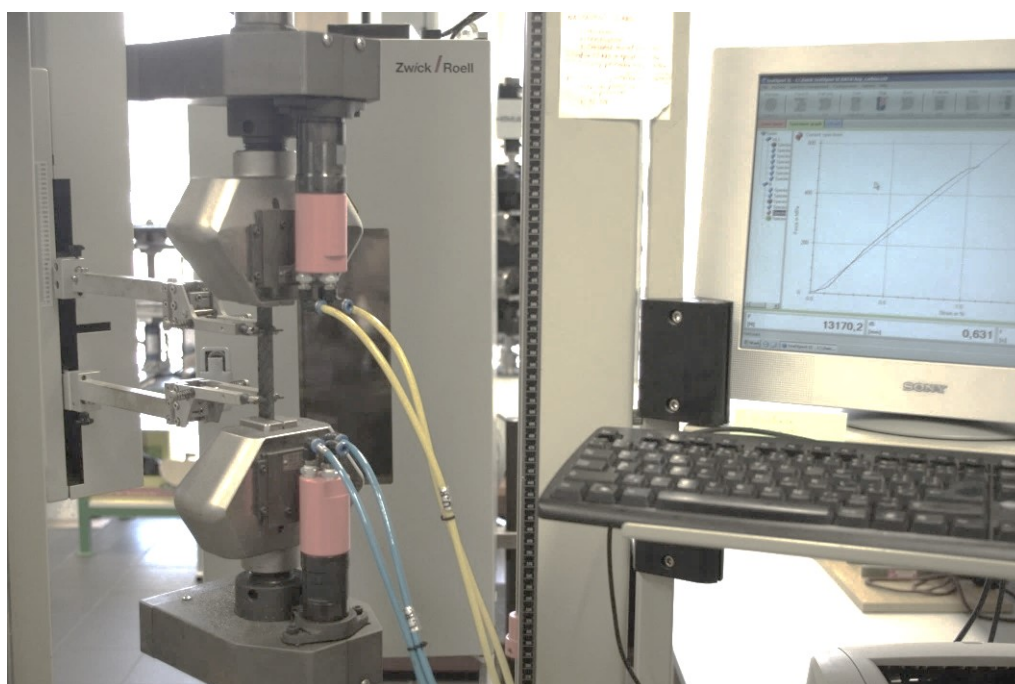
	Parameter	Hodnota	Jednotka
	Maximálna skúšobná sila	20	kN
	Strojová výška	1284	mm
	Celková výška	2012	mm
	Celková šírka	630	mm
	Šírka pracovného priestoru	420	mm
	Hmotnosť	150	kg

Skúška ťahom podľa normy ČSN EN ISO 527 – 4,5

Skúšobné teleso je pretáhané v smere hlavnej pozdĺžnej osi konštantnou rýchlosťou do jeho porušenia alebo do okamihu, keď napätie v ťahu alebo pretiahnutie dosiahnu vopred zvolenej hodnoty. V priebehu testu sa zaznamenáva sila a jej zodpovedajúce zväčšenie počiatkové meranej dĺžky. Vzorka sa do čelustí stroja upína tak, že jeho pozdĺžna os je zhodná s osou zaťažovania. Upínací systém musí v maximálnej miere zabraňovať vykĺz-

nutiu a nesmie spôsobiť predčasný lom skúšobných telies. prednostne sa používajú samo-
svorné typy čelústí. Po vyrovnaní predpätia sa nastaví a pripevní na počiatočné meranú
časť priet'ahomery, alebo sa priloží meradlo pomerného predĺženia.

Ťahová skúška bola vykonaná na univerzálnom skúšobnom stroji Zwick 1456, silomerná
hlava 20kN, pneumatické čeluste Shimadzu 50kN.



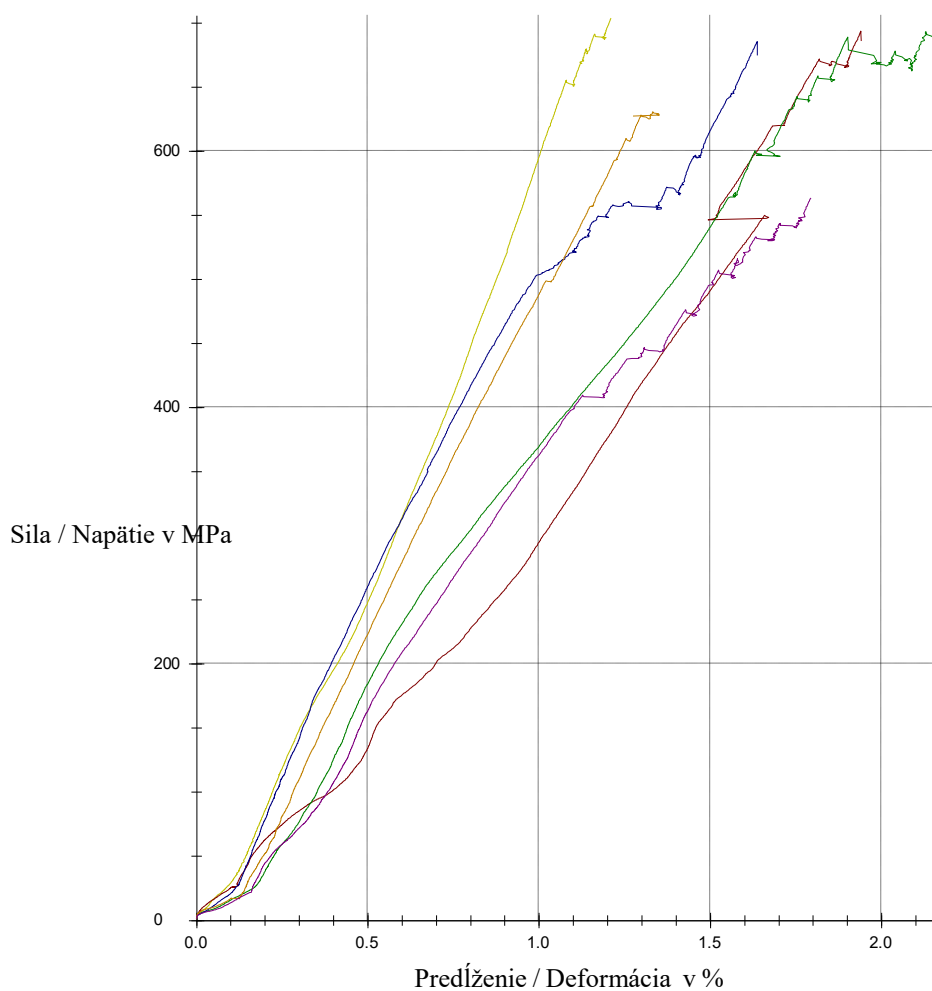
Obr. 50. Skúška ťahom uhlíkového kompozitu

Vyhodnotenie nameraných výsledkov získaných pri ťahovej skúške

Pre definovanie výsledkov prebiehalo celkovo 5 meraní. Hodnota x stanovuje ich pri-
emernú hodnotu. S predstavuje smerodajnú odchýlku a v , variačný koeficient

Tab. 16. Dosažené výsledky pre modul pružnosti E a medzu pevnosti σ_M

tk, IMP, L,T n = 5	E [MPa]	σ_M [MPa]	dL pri F_{max} [%]	Deformácia (nom.) pri F_{max} [mm]	W pri F_{max} [Nmm]
x	54800	656	1,6	5,5	8670,17
s	7910	59,1	0,4	0,4	2706,7
v	14,42	9,01	23,47	7,76	31,22

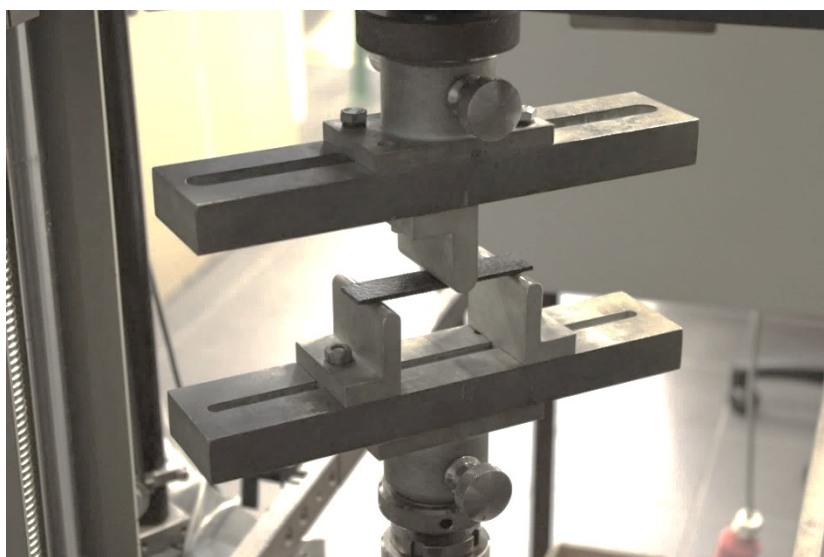


Obr. 51. Nameraná závislosť pre prepreg IMP 600g/m², orientácia výstuže 0°

Skúška ohybom podľa normy ČSN EN ISO 14 125

Skúšobné teleso, podopreté symetricky dvoma podporami ako nosník, je konštantnou rýchlosťou prehýbaniu trŕnom pôsobiacim uprostred rozpätia podpier tak dlho, kým sa nezlomí alebo kým deformácia nedosiahne vopred stanovené hodnoty. V priebehu skúšky je meraná pôsobiaci sila, pokiaľ možno automatickým záznamovým zariadením, poskytujúcim úplnú krivku závislosti sila v ohybe / priehyb.

Ohybová skúška bola vykonaná podobne ako ťahová skúška na univerzálnom skúšobnom stroji Zwick 1456.



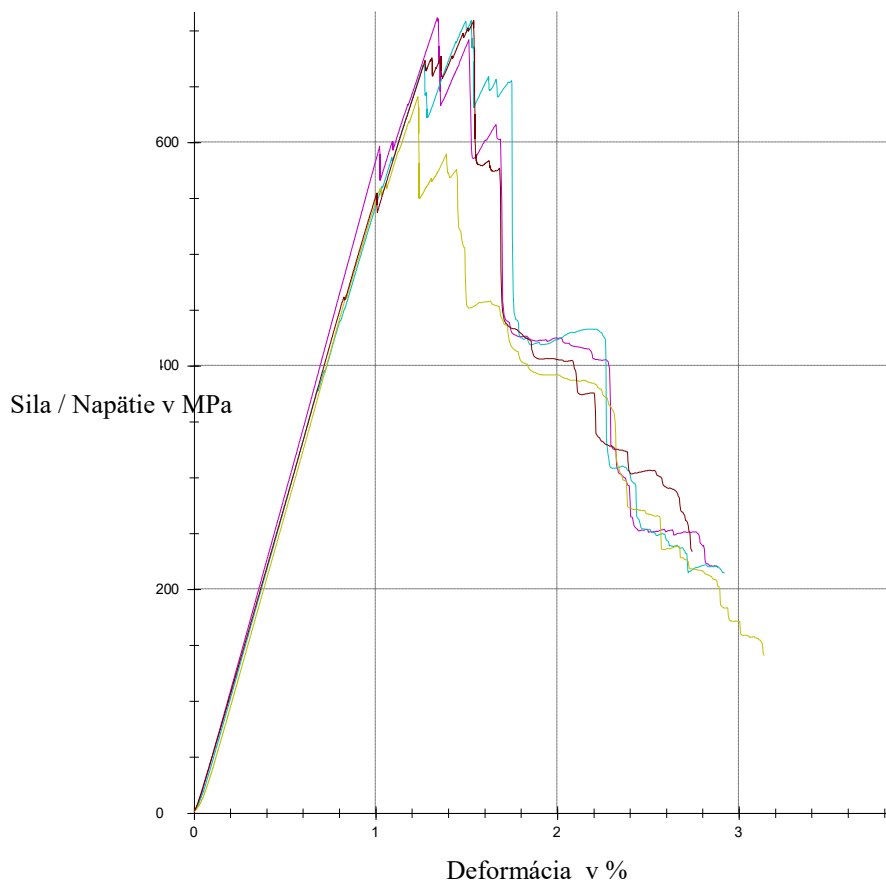
Obr. 52. Skúška ohybom uhlíkového kompozitu

Vyhodnotenie nameraných výsledkov získaných pri ohybovej skúške

Pre stanovenie výsledkov boli stanovené 4 merania. Hodnota x v Tab. 17 predstavuje ich priemernú hodnotu. S - smerodajnú odchýlku a premena v - variačný koeficient.

Tab. 17. Dosiahnuté výsledky pre modul pružnosti E a medza pevnosti σ_{fM}

Tk_IMP_L,T n = 4	E [MPa]	σ_{fM} [MPa]	dL pri F_{max} [%]	W pri F_{max} [Nmm]
x	56400	693	1,4	3130,43
s	1050	34,6	0,1	598,01
v	1,86	5	10,61	19,1



Obr. 53. Závislosť pre tkaninový IMP Prepreg 600g / m², orientácia výstuže 90°

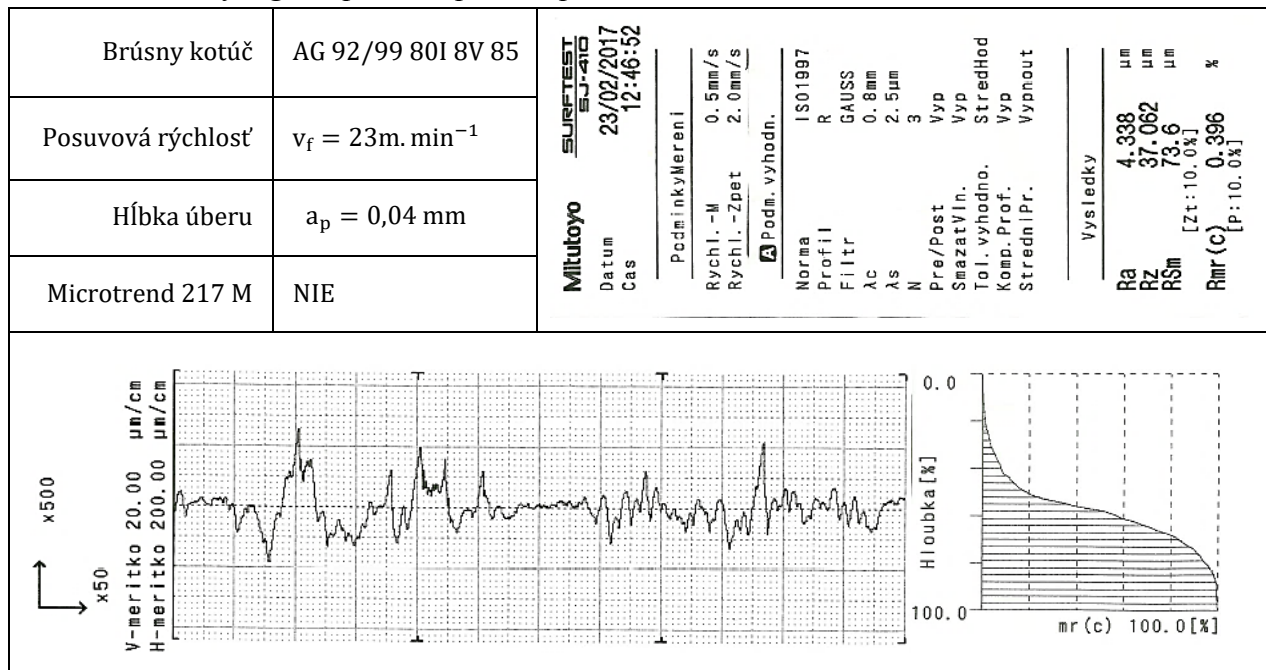
Údaj z materiálového listu tkaniny GG630T uvádza hodnotu pevnosti v ohybe $\sigma_{fM} = 730$ Mpa a modul pružnosti v ohybe $E = 57\,000$ MPa. Namerané hodnoty tieto údaje potvrdzujú.

Orientačné ceny materiálov a výpočet ceny za materiál pre navrhnuté vzorky

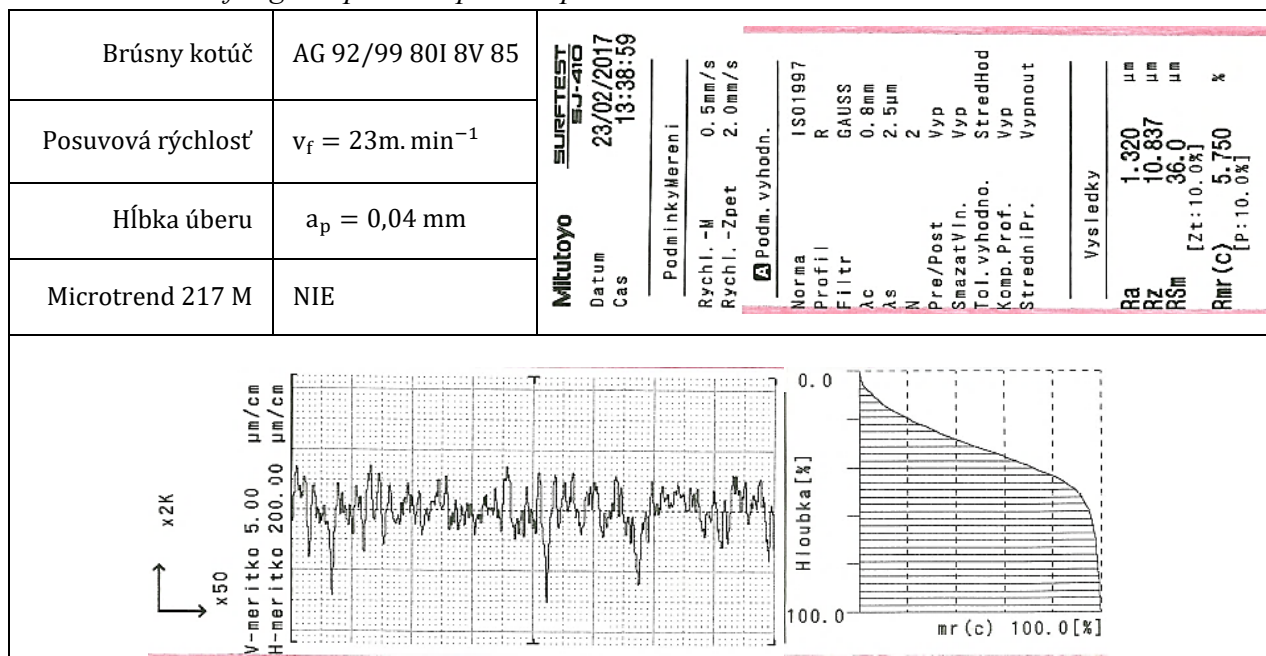
mat.C - UD carbon IMP503Z / GV 420U 37% - 1066,3 kč / m²

PRÍLOHA IV: PROFILOGRAM

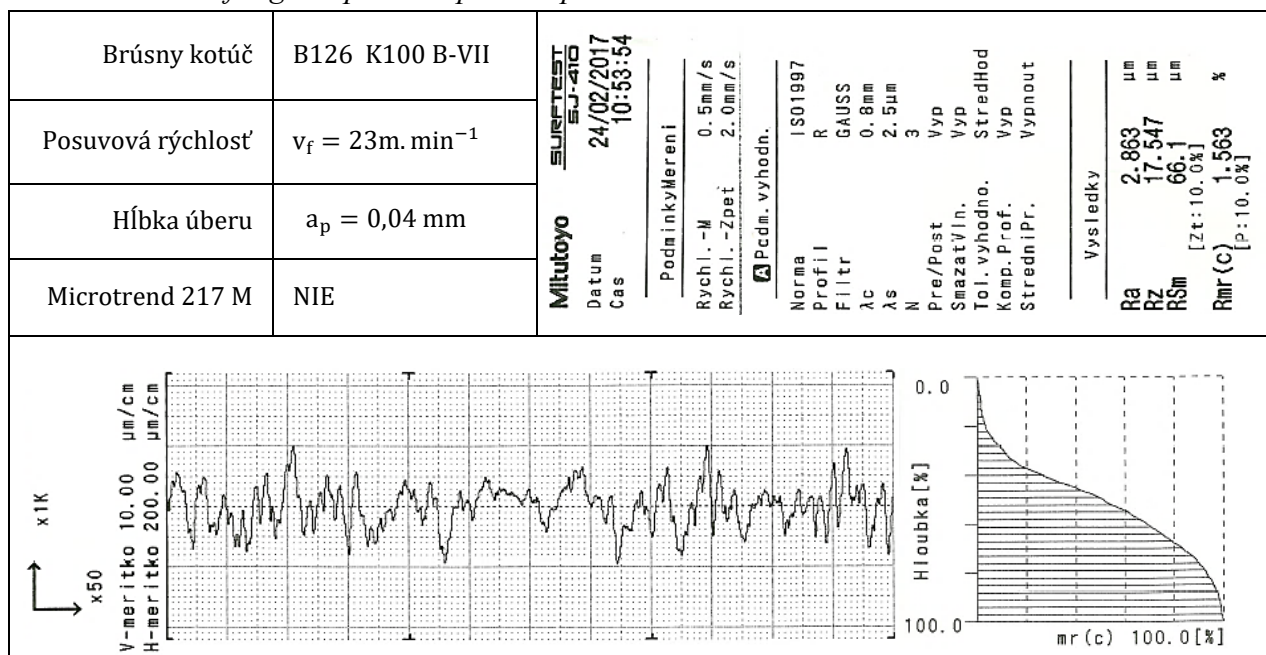
Tab. 18. Profilogram povrchu pre kompozit GFRP zo state 7.1.1



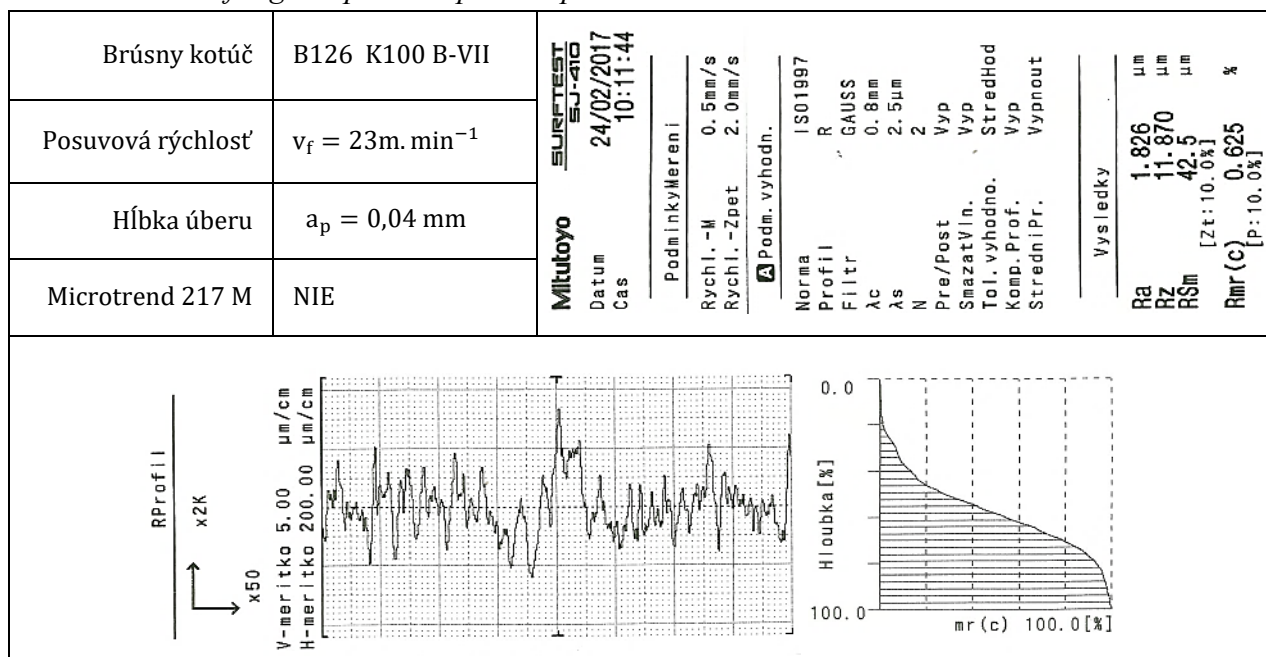
Tab. 19. Profilogram povrchu pre kompozit CFRP zo state 7.1.1



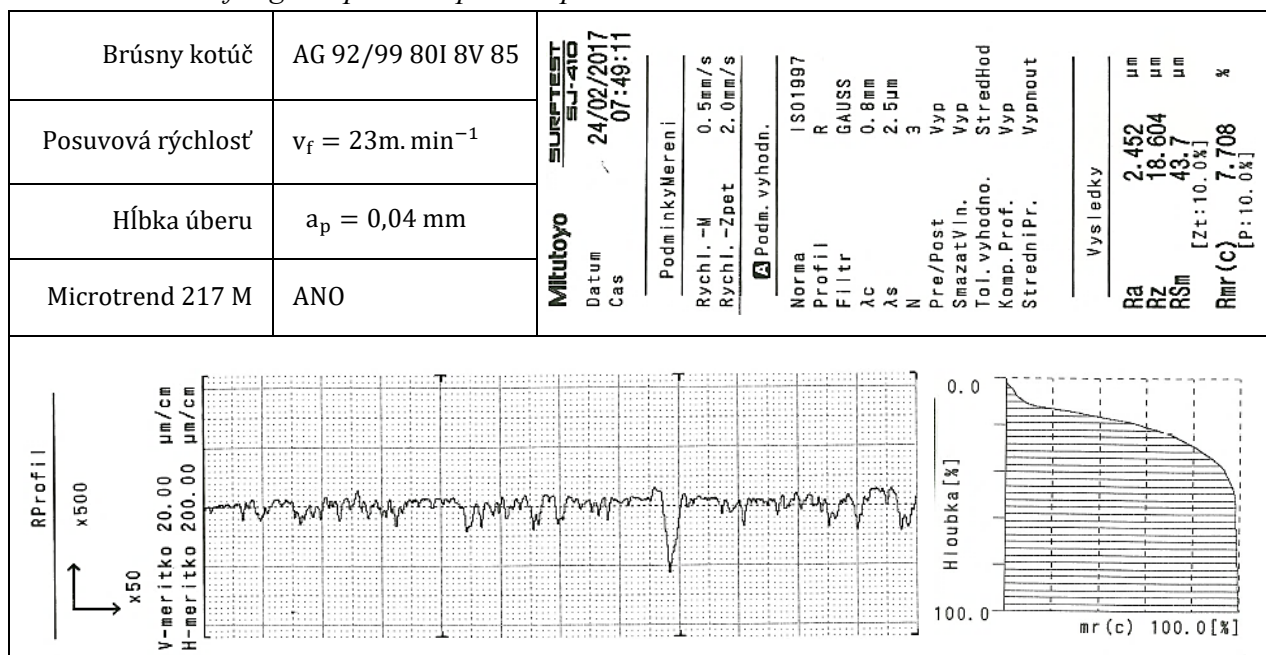
Tab. 20. Profilogram povrchu pre kompozit GFRP zo state 7.1.2



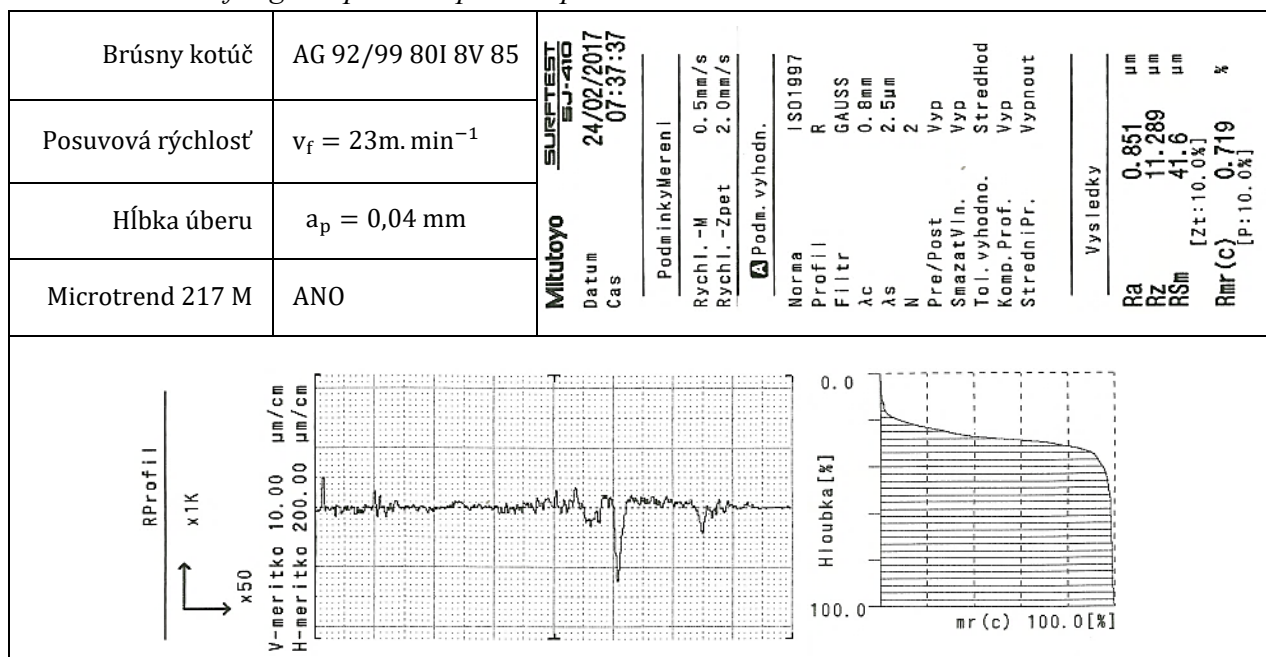
Tab. 21. Profilogram povrchu pre kompozit CFRP zo state 7.1.2



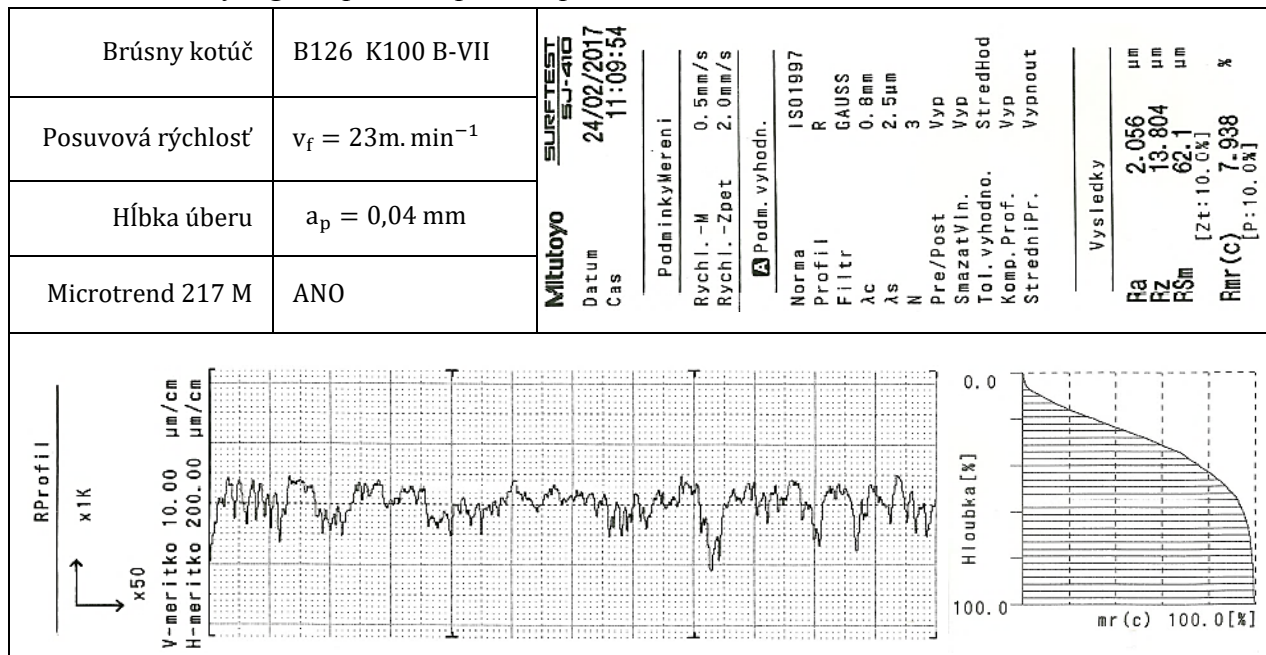
Tab. 22. Profilogram povrchu pre kompozit GFRP zo state 7.3.1



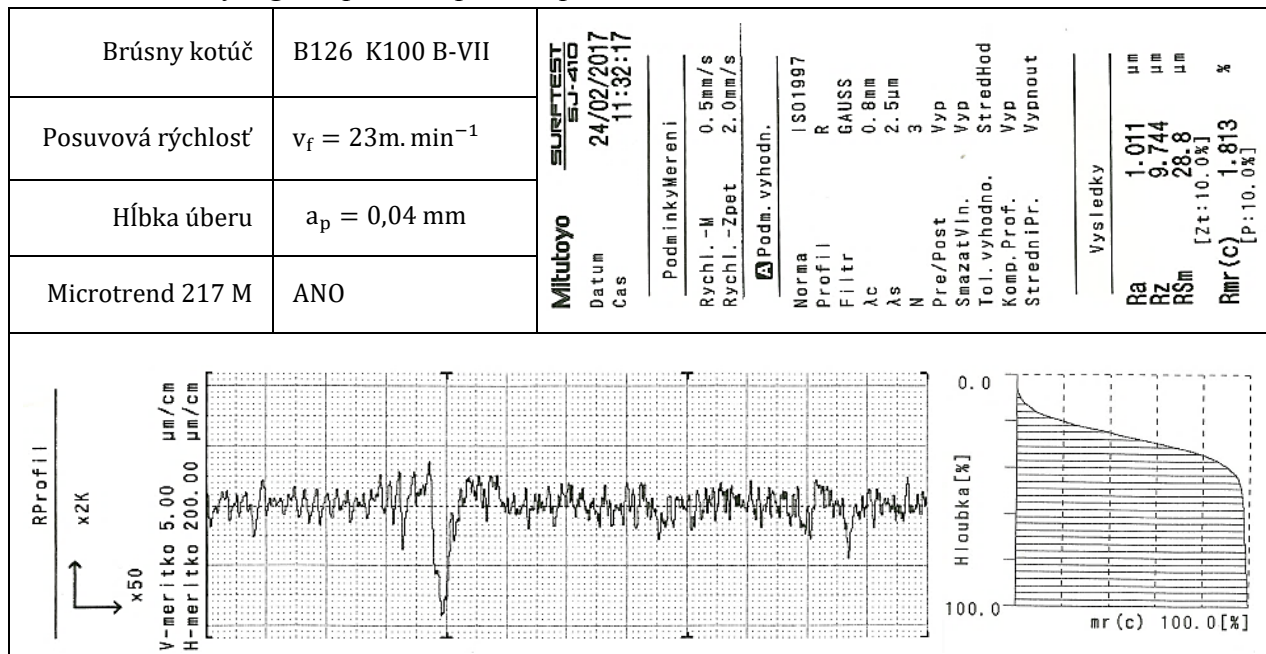
Tab. 23. Profilogram povrchu pre kompozit CFRP zo state 7.3.1



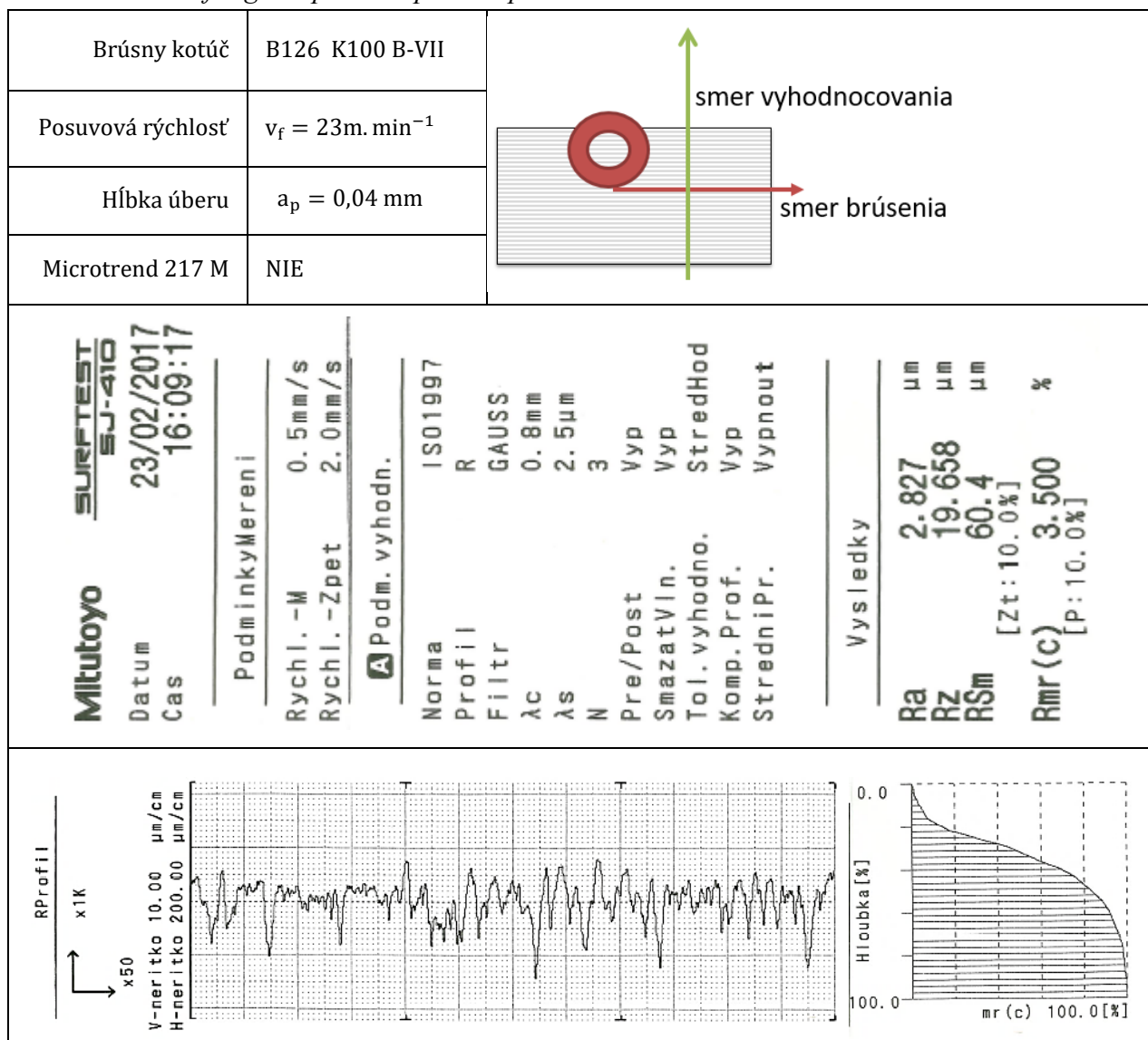
Tab. 24. Profilogram povrchu pre kompozit GFRP zo state 7.3.1



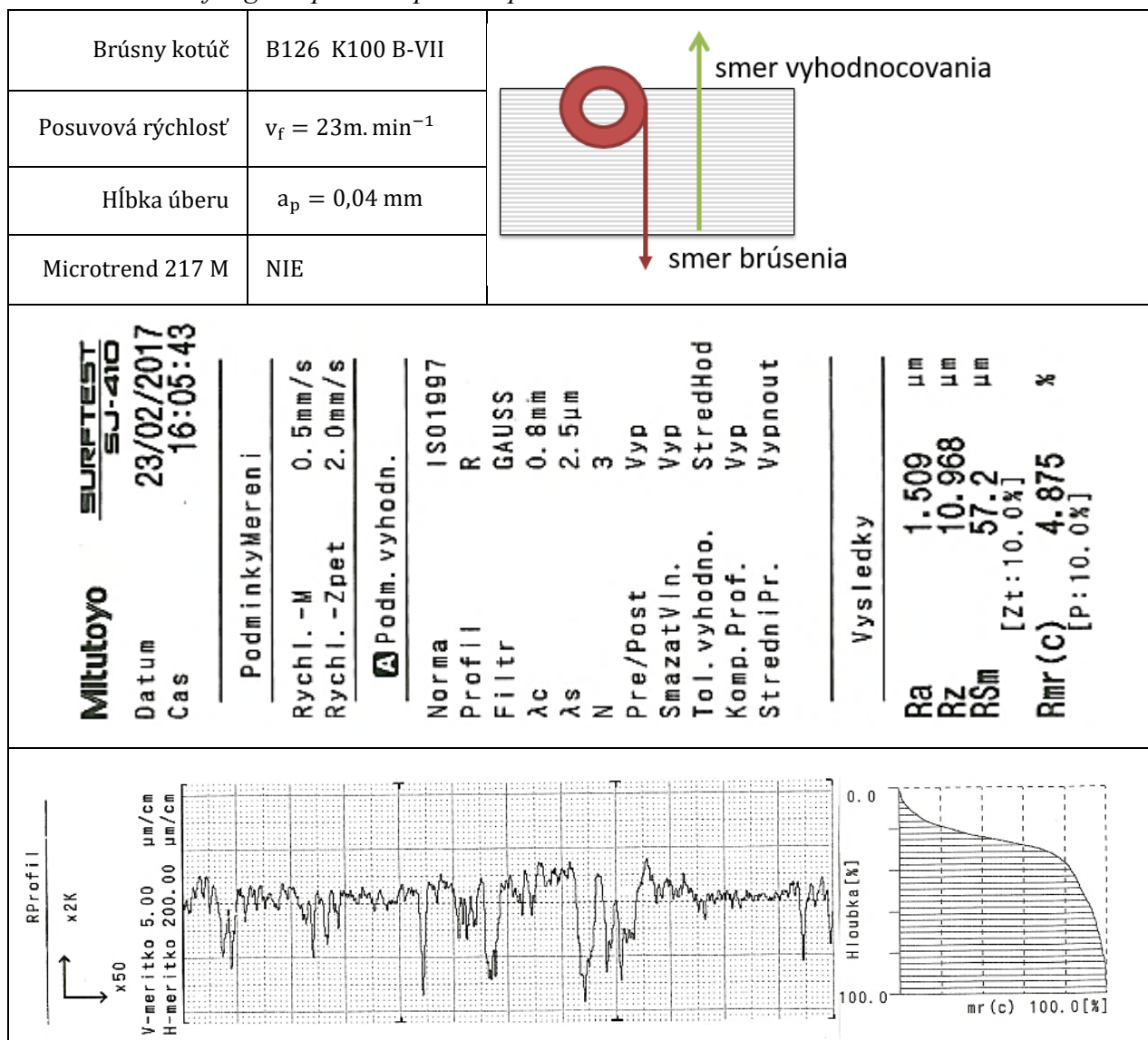
Tab. 25. Profilogram povrchu pre kompozit CFRP zo state 7.3.1



Tab. 26. Profilogram povrchu pre kompozit GFRP zo state 7.4.1



Tab. 27. Profilogram povrchu pre kompozit GFRP zo state 7.4.1



Tab. 28. Profilogram povrchu pre kompozit GFRP zo state 7.4.1

