



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

OBRÁBĚNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ ABRAZIVNÍM VODNÍM PAPERSEM

ABRASIVE WATERJET MACHINING OF COMPOSITE MATERIALS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Chromý

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Karel Osička, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Jakub Chromý
Studijní program:	Strojírenská technologie
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Karel Osíčka, Ph.D.
Akademický rok:	2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem

Obrábění kompozitních materiálů abrazivním vodním paprskem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rozbor jednotlivých kompozitních materiálů. Aplikace nekonvenční technologie abrazivního vodního paprsku při obrábění kompozitních materiálů.

Cíle diplomové práce:

Rozbor jednotlivých druhů kompozitních materiálů.

Možnosti obrábění kompozitních materiálů a dostupné technologie.

Aplikace nekonvenční technologie abrazivního vodního paprsku na konkrétní kompozitní materiál.

Provedení experimentu na vzorovém dílu z kompozitního materiálu.

Technicko-ekonomické vyhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

MAŇKOVÁ, I. Progresívne technológie. 1. vydanie. Košice: Viena, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.

BARCAL, J. Nekonvenční metody obrábění. Skriptum FSI ČVUT. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1989.

HÍREŠ, O., M. HATALA a S. HLOCH. Delenie kovových materiálů okružnou pilou, vodným proudem a plazmovým oblúkom, 1. vydání. Jiří Pustina: Ostrava - Poruba, 2007. 147 s. ISBN 978-80-8073-769-6.

KRAJNÝ, Z. Vodný lúč v praxi WJM. 1.vydanie, Bratislava: Ing. Michal Mračko, 1998. 214 s. ISBN 80-8057-091-4.

JONŠTA, Z. Technické materiály II, 1. vydání, Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2012. 126s.
ISBN 978-80-248-2574-8.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá kompozitními materiály a možnostmi, jak tyto materiály zpracovávat technologií obrábění. Práce je rozdělena na několik hlavních částí.

V první části je zpracována rešerše týkající se rozboru jednotlivých druhů kompozitních materiálů. Bude nahlédnuto na možnosti obrábění kompozitních materiálů a dostupné technologie k jejich obrobení. Další části budou zaměřené na aplikaci nekonvenční technologie abrazivního vodního paprsku na konkrétní kompozitní materiál s provedením experimentu na vzorovém dílu z kompozitního materiálu. V závěru práce dojde k technicko-ekonomickému vyhodnocení experimentu.

Klíčová slova

Vodní paprsek, obrábění, kompozitní materiály, nekonvenční technologie

ABSTRACT

This diploma thesis deals with composite materials and the possibilities of processing these materials by machining technologies. The work is divided into several main parts. The first part deals with the analysis of individual types of composite materials. The possibilities of machining composite materials and available technologies of their machining will be explored. Other parts will focus on the application of unconventional abrasive water jet technology to a specific composite material with an experiment on a sample part made of composite material. At the end of the work there will be a technical and economic evaluation of the experiment.

Key words

Water jet, machining, composite materials, unconventional technologies

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CHROMÝ, Jakub. *Obrábění kompozitních materiálů abrazivním vodním paprskem*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139920>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Karel Osička.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou/diplomovou práci na téma **Obrábění kompozitů abrazivním vodním paprskem** vypracoval(a) samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

V Brně, 18.5.2022

místo, datum

Bc. Jakub Chromý

PODĚKOVÁNÍ

Toto poděkování bych chtěl věnovat svému vedoucímu Ing. Karlovi Osičkovi, Ph.D. za cenné rady, vedení a ochotu při vypracování této diplomové práce. Panu Jaroslavu Mašovi ze společnosti AWAC spol. s.r.o. Brno. Firmě MSR Engines group a.s. za poskytnutí prostředků a informací k uskutečnění této diplomové práce. Rodině za podporu při psaní této závěrečné práce i po celou dobu studia.

OBSAH

ABSTRAKT.....	4
PROHLÁŠENÍ.....	8
PODĚKOVÁNÍ.....	9
1 ROZBOR JEDNOTLIVÝCH DRUHŮ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	10
1.1 Charakteristika kompozitních materiálů	10
1.1.1 Matrice.....	11
1.1.2 Zpevňující fáze	15
1.2 Strukturní uspořádání fází v komponentech.....	19
1.3 Teorie tvorby kompozitní soustavy.....	20
1.4 Výrobní technologie kompozitů.....	21
1.4.1 Výroba složených materiálů s matricí v tuhém stavu.....	22
1.4.2 Výroba složených materiálů s matricí v tuhém stavu.....	24
1.5 Klasifikace kompozitů.....	25
1.5.1 Částicové kompozity	26
1.5.2 Vláknové kompozity.....	28
1.6 Kompozity v každodenním životě.....	31
2 MOŽNOSTI OBRÁBĚNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ A DOSTUPNÉ TECHNOLOGIE.....	34
2.1 Soustružení	34
2.2 Frézování.....	35
2.3 Vrtání a vyvrtávání.....	36
2.4 Broušení.....	38
2.5 Dělení	38
2.6 Nástroje	38
2.7 Teplota.....	45
2.8 Tříska.....	46
2.9 Nekonvenční metody obrábění.....	47
2.10 Řezání laserem	47
2.11 Elektroerozivní obrábění	48
2.12 Řezání vodním paprskem	49
3 APLIKACE NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE ABRAZIVNÍHO PAPERU NA KONKRÉTNÍ KOMPOZITNÍ MATERIÁL	50
3.1 Stroj na řezání vodním paprskem	51
3.1.1 Vysokotlaká čerpadla	53
3.1.2 Akumulátor tlaku.....	54
3.1.3 Řezací hlava.....	55
3.1.4 Trysky.....	55
3.1.5 Pracovní kapalina	56
3.1.6 Abrazivum	56
3.2 Materiál padformátoru.....	57

3.3	Řezání padformátoru	59
3.4	Výsledná podoba motorového surfu.....	64
4	PROVEDENÍ EXPERIMENTU NA VZOROVÉM DÍLU Z KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU	67
4.1	Použitý kompozitní materiál.....	67
4.2	Zařízení.....	68
4.3	Výroba vzorků	69
4.3.1	Kontura vzorku	71
4.4	Kvalita a přesnost řezaných vzorků.....	72
4.4.1	Rozměrová přesnost	73
4.4.2	Kuželovitost.....	78
4.4.3	Drsnost povrchu.....	80
4.4.4	Vizuální kontrola	84
5	TECHNICKO EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ.....	86
6	DISKUZE	88
	ZÁVĚR.....	89
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	91
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	96
	SEZNAM PŘÍLOH	100

ÚVOD

Původně cesta k lepším materiálům znamenala hledání mezi existujícími materiály. Dnes na základě zkušeností a znalostí základních mechanismů působících v pevných materiálech začínáme konstruovat nové materiály. Tento vývoj začal, když se zjistilo, že je možno zlepšit některé vlastnosti existujících materiálů jistým ošetřením a pokračoval, když se začaly vyrábět nové materiály neexistující v přírodě např. cihly [3].

Přírodní evoluční vývoj dlouhý 3,5 miliardy let realizoval prakticky výlučně tvorbu materiálů na kompozitním principu, s čistými, bezdefektními a homogenními látkami se setkáváme jen ojediněle. Vývoj prokázal, že vytváření jednoho nebo několika materiálů se všemi dokonalými vlastnostmi současně je neekonomické, neboť většina z nich zůstává během služby materiálu nevyužita. Extrémně starým kompozitním materiálem jsou také malty a beton, které se dochovaly z římských dob. Američtí Indiáni, kteří dispergovali platinu do zlata a stříbra, protože neměli k dispozici dostatečně vysokou teplotu, aby mohli zpracovávat samotnou platinu, jsou jedni z prvních uživatelů kovových kompozitních materiálů [3].

Kompozitní materiály mají v současné době použití v různých oblastech vědy a techniky již své, mnohdy nezastupitelné místo, které je jim dáno právě schopností kombinovat požadované užitkové vlastnosti (mechanické, tepelné, korozní aj.) s konstrukční přizpůsobivostí přesně pro potřeby dané aplikace. Celá řada oborů, např. raketová a letecká technika, automobilový průmysl, chemický průmysl, elektrotechnika a další jsou dnes již v řadě aplikací na kompozitech závislé [2].

Historie řezání vodním paprskem má své kořeny již v poměrně daleké minulosti. Skutečný začátek aplikace řezání vodním paprskem sahá do 19. století, kdy kalifornští zlatokopové kolem roku 1870 používali tuto metodu k odstranění nánosů písku a vrstev kamení. Jednalo se pouze o nízkotlaké systémy. První komerční aplikace přišla na svět v roce 1971. Technologie řezání vodním paprskem postoupila v sedmdesátých letech, kdy Dr. Mohamed Hashish vytvořil techniku přidání abraziva k vodnímu proudu a tím bylo umožněno užití vodního paprsku i pro řezání materiálů s vyšší pevností a větší tloušťkou [4].

V současnosti jsou stroje pro tvarové řezání vodou vybaveny naklápěcím systémem řezné hlavy což umožňuje takzvaný 3D řez (řezání pod úhlem až 60°), ale hlavní výhodou naklápění je eliminace úkosu, který jinak vzniká při kolmém řezání. Díky tomu je dnes na strojích pro tvarové řezání vodním paprskem dosahováno téměř dokonale kolmého řezu [4].

1 ROZBOR JEDNOTLIVÝCH DRUHŮ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Slovo „kompozitní“ znamená „vytvořený, či skládající se ze dvou nebo více odlišných částí“. Materiál, který má dvě nebo více odlišných materiálových složek, nebo fází je podle toho tedy složeným materiálem. Avšak jen tehdy, když mají tyto složky rozdílné fyzikální vlastnosti, a tudíž i vlastnosti složeného materiálu jsou zřetelně odlišené od vlastností jeho složek, je takový materiál označován jako kompozit [2].

Vlastnosti kompozitů jsou ovlivňovány především vlastnostmi jejich materiálových složek, jejich distribucí a interakcí mezi nimi. Vlastnosti systému může určovat součet vlastností složek podle jejich objemového podílu nebo složky. Mohou na sebe vzájemně působit synergickým způsobem, takže zajišťují kompozitu vlastnosti, které nemohou být přičítány použitému součtu vlastností složek na základě jejich objemových podílů. Proto při popisu kompozitu jako materiálového systému je potřeba vedle specifikace materiálů složek a jejich vlastností specifikovat i geometrii vyztužení vzhledem k systému. Geometrie vyztužování může být popsána tvarem, velikostí a distribucí velikosti [2].

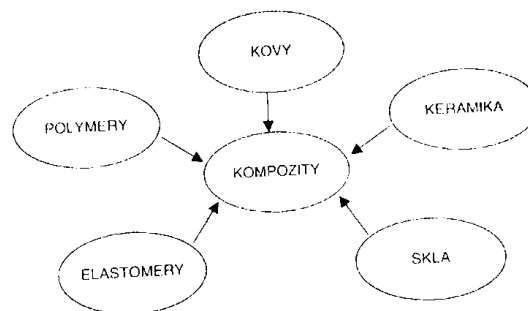
Většina dosud vyvinutých kompozitních materiálů je vyráběna pro zlepšení mechanických vlastností, jako je pevnost, tuhost, tažnost a vysokoteplotní odolnost. Kompozitní materiály však nejsou určené pouze pro extrémní mechanické namáhání. Může jít i o kombinaci mechanického a tepelného namáhání, korozní namáhání, o zajištění odolnosti vůči křehkému porušení, anebo odolnosti vůči únavě [1].

Kompozity nenahrazují dosud používané konstrukční materiály, ale rozšiřují oblast použití ve výrobě extrémně namáhaných částí strojů a zařízení, které není možné řešit klasickými materiály. Problémem zůstává vyšší cena kompozitních materiálů v porovnání s materiály klasickými. Z toho důvodu se omezuje jejich uplatnění více na specifické, jako na všeobecné použití. Předností těchto materiálů je velmi příznivý poměr pevnosti k měrné hmotnosti (tzv. specifická hmotnost), který předurčuje jejich využití v dynamicky namáhaných součástech v letectví, energetice, automobilovém průmyslu, textilních strojních apod. [1].

1.1 Charakteristika kompozitních materiálů

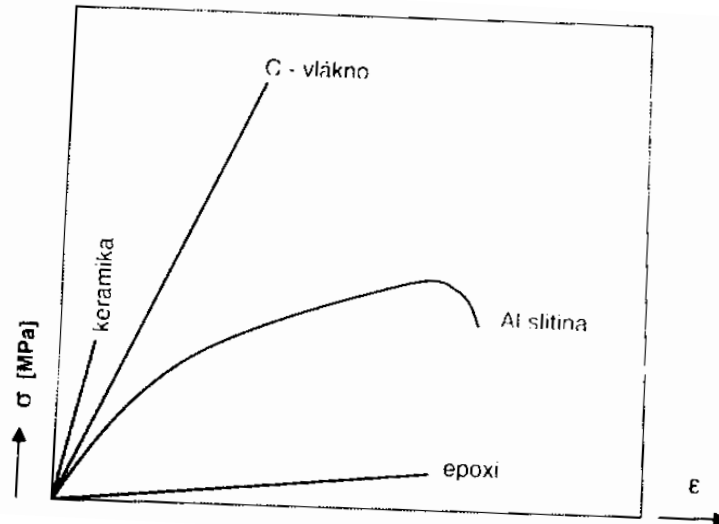
Kompozity (složené mat.) tvoří jedna nebo více nespojitých fází, uložených ve fázi spojitě. Diskontinuitní fáze je obvykle tvrdší a pevnější než spojitá fáze a nazývá se vyztužení, zatímco spojitá fáze se nazývá matrice [1].

Kompozitní materiály je možné do konečné kompozitní struktury kombinovat ze všech materiálových skupin-kovů, polymerů, keramiky, ev. jiných anorganických materiálů obr. 1 [2].



Obr. 1 Materiálové skupiny pro výrobu kompozitů [2].

Mezní poměrné prodloužení matrice při tahovém namáhání by mělo být větší než mezní prodloužení výztuže, aby plnila funkci pojiva ještě i při počínajícím porušování výztuže. Tento požadavek splňují pouze matrice kovové a polymerní. Keramické matrice mají mezní prodloužení při přetržení menší než výztuž. Chování jednotlivých matic v závislosti napětí (σ) poměrné prodloužení (ϵ) v porovnání s chováním výztuže (uhlíkové vlákno) znázorňuje obr. 2 [2].



Obr. 2 Křivkové napětí – poměrné prodloužení kovové, polymerní a keramické matrice v porovnání s uhlíkovým vláknem [2].

Má-li být výrobou dosaženo kompozitu vyšších mechanických parametrů, než má výchozí matriční složka, pak se musí jednak volit pevnější vyztužující fáze (vlákno) a za druhé musí být zabezpečena dobrá adhezní vazba mezi výztuží a maticí [2].

1.1.1 Matrice

Základní funkcí matrice je přenos vnějšího zatížení na zpevňující fázi. V porovnání se zpevňující fází má nižší pevnostní vlastnosti a větší plasticitu. Je požadována dobrá soudržnost matrice s materiálem zpevňující fáze (bez chemické reakce mezi maticí a zpevňující fází) a často také nízká hmotnost materiálu matrice. Odděluje jednotlivé částice zpevňující fáze a brání rozvoji křehkého porušení složitěho mat. Jako matrice mohou sloužit materiály – **kovové, polymerní, keramické a skleněné** [1].

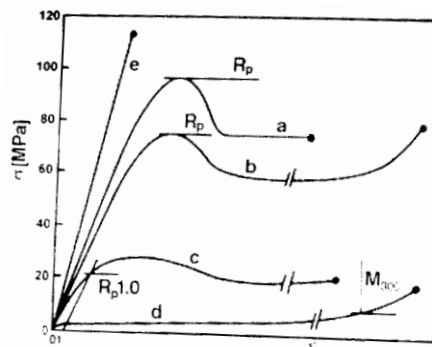
Kovové matrice – splňují podmínky dobré elektrické vodivosti, tepelné vodivosti, smykovou pevnost a tvárnost (zpomalují mechanismus rozvoje trhlin), odolnost opotřebení, vyšší tepelnou odolnost, možnost povlakování a spojování. Nejrozšířenější z kovových matic je hliník a jeho slitiny, titan a jeho slitiny a některé slitiny na bázi niklu. Vlastnosti některých kovových matic uvádí tab. 1 [1].

Tab. 1 Vlastnosti některých používaných kovových matic pro kompozity [2].

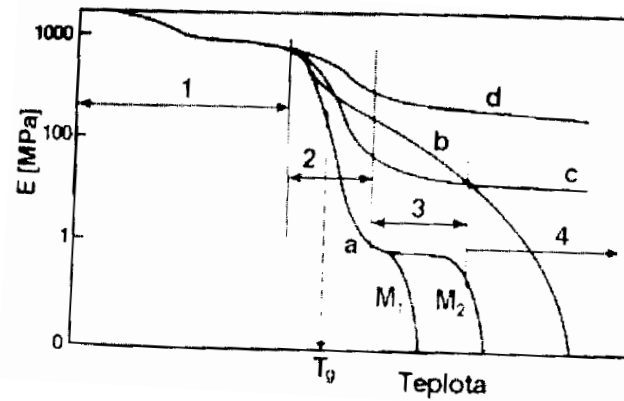
Matrice		Měrná hmotnost ρ (kg. m ³)	Pevnost v tahu R_m (Gpa)	Modul pružnosti v tahu E (Gpa)	Měrná pevnost (R_m/ρ)	Měrný modul pružnosti (E/ρ)	Tažnost A (%)
Na bázi	slitina						
Al	Al Cu 4 Mg	2770	0,49	70	0,177	25,3	15
	Al Zn 4 Mg1	2720	0,38	70	0,14	25,7	10
	Al Mg Si	2700	0,32	70	0,118	25,9	10
Mg	Mg Li 8	1500	0,22	40	0,146	26,6	16
	Mg Zn 6 Zr	1800	0,345	45	0,191	25	12
	Mg Al 3 Zn	1800	0,427	45	0,233	25	10
Ti	Ti Al 6 V 4	4430	0,91	112	0,2	25,3	13
	Ti V13 Cr 11 Al 13	4510	0,88	116	0,19	25,7	15
	Ti Mo 11 Zr 5 Sn 5	5060	1,37	105	0,27	20,7	11
Ni	Hastelloy X	8950	0,85	240	0,09	26,8	37
	Udimet	7950	1,52-2,33	220	0,18-	27,8	-
	Superslitiny	8300	1,5	192	0,29	23,1	16
					0,18		

Polymerní matrice – polymerní matrice se ve výrobě kompozitů používá nejčastěji. Podle vlastností a podle výrobního postupu se výrazně liší dle toho, je-li polymer termoplast nebo reaktoplast. Z termoplastů jsou nejčastější polyamidy (nylon), polyetylen, polypropylen a polykarbonát. Nejrozšířenější z polymerních matic jsou reaktoplasty. Nejčastější matrice jsou polyesterové, epoxidové a fenolické. Ve srovnání s kovy mají nízkou měrnou hmotnost, vysokou měrnou pevnost, jsou korozně odolné, nevyžadují povrchové úpravy, tlumí kmity, mají nízkou tepelnou a elektrickou vodivost [1].

Mechanické vlastnosti nutno zvažovat dle jednotlivých druhů polymerů (termoplasty, reaktoplasty, elastomery), viz obr. 3, charakterizující průběh závislosti napětí-deformace pro dané druhy polymerů. Dále závisí na typu struktury daného polymeru (amorfni, semikrystalická, zesíťovaná), avšak obecně jejich použití výrazně závisí na teplotě. Rozhodující o teplotním rozsahu konstrukčního použití polymerních materiálů je teplota skleného přechodu T_g , jak vyplývá z průběhu závislosti pružnosti E na teplotě dle obr. 4 [2].



Obr. 3 Charakteristické křivky napětí-deformace, a) termoplast s vysokou krystalinitou, b) termoplast s nízkou a střední krystalinitou, c) termoplast s amorfni strukturou, d) elastomer, e) reaktoplast [2].



Obr. 4 Závislost modulu pružnosti E na teplotě, a) lineární amorfní polymer s molekulovou hmotností $M_1 < M_2$, b) lineární semikrystalický polymer, c) síťovaný polymer s nízkou a d) s vysokou hustotou sítě, 1- skelná oblast, 2- přechodová oblast, 3- kaučukovitá oblast, 4- oblast viskozního tečení [2].

Některý typy používaných termoplastů pro matrice kompozitů a jejich mechanické charakteristiky uvádí tabulka 2.

Tab. 2 Některé termoplasty používané pro matrice kompozitů [2].

Termoplast		Měrná hmotnost ρ (kg. m ⁻³)	Pevnost v tahu R_m (Mpa)	Modul pružnosti v tahu E (Mpa)	Teplota tání T_m (°C)	Teplota skelného přechodu T_g (°C)	Vlastnosti
Název	Zkratka						
Polyamid 6	PA6	1130	70-85	1200-1400	220	40	Navlhavý
Polyamid 12	PA12	1020	45-60	1500-1800	175	20	Tepelná odolnost
Polyfenylensulfid	PPS	1340	48-86	3300-3400	240	80	Vyšší tepelná odolnost
Polymid	PI	1420	75-95	3200	-	265	Vysoká tepelná odolnost
Polykarbonát	PC	1200	56-72	2100-2400	220	114	Vyšší tepelná odolnost
Polystyren	PS	1050	36-65	2275-3275	-	90	-

Přehled reaktoplastů používaných pro matrice kompozitů uvádí tabulka 3.

Tab. 3 Reaktoplasty vhodné pro kompozitní matrice [2].

Reaktoplast		Měrná hmotnost ρ (kg. m ⁻³)	Pevnost v tahu Rm (Mpa)	Modul pružnosti v tahu E (Mpa)	Teplota skelného přechodu Tg (°C)	Vlastnosti
Název	Zkratka					
Epoxidová pryskyřice	EP	1120	-	-	150 (třífukční) 200 (čtyřfukční)	Velmi dobrá chemická odolnost, odolnost proti vodě, vytvrzování při zvýšené teplotě
Polymidová pryskyřice	PI	1420	80	3000	350	Největší tepelná odolnost, houževnatost
Vinylesterová pryskyřice	VE	-	-	-	90-120	Chemická odolnost
Fenolformaldehydová pryskyřice	PF	1127	40-60	3500-4200	100-170 (dle plniva)	Nehořlavá, křehká
Melaminoformaldehydová pryskyřice	MF	1500	45-65	7000-9000	100-130	Zdravotní nezávadnost

Elastomery se používají na výrobu pružných elementů, pneumatik apod. Příklad používaných elastomerů v kompozitech uvádí tabulka 4.

Tab. 4 Vlastnosti některých používaných elastomerů v kompozitech [2].

Elastomer		Měrná hmotnost ρ (kg. m ⁻³)	Pevnost v tahu Rm (Mpa)	Modul pružnosti v tahu E (Gpa)	Tažnost A (%)
Název	Zkratka				
Isopren	IR	910	20-35	0,002-0,1	400-900
Butadien	BR	1500	2-26	0,004-0,1	300-700
Chloropren	CR	940	15-25	0,01-0,2	300-700

Keramické a skleněné matrice

Keramika je anorganický nekovový materiál s heterogenní strukturou, tvořenou krystalickými látkami o různém složení a uspořádání. Keramické materiály mají obvykle dobrou chemickou odolnost, malou tepelnou vodivost, vysokou teplotu tání, vysokou tvrdost a pevnost v tlaku a odolnost vůči creepu za vysokých teplot. Elektricky jsou nevodivé. Hlavní nevýhodou je jejich značná křehkost, nesnadná obrobitelnost a velká citlivost na vnitřní defekty. Jsou

vhodné pro využití při vysokých teplotách. Sklo je amorfni látka, jež vznikla ztuhnutím taveniny bez krystalizace. Vlastnosti skla jsou velmi blízké keramice [2].

Charakteristiky vlastností keramiky a skel používaných pro matrice kompozitů uvádí tabulka 5 [2].

Tab. 5 Technická keramika a nekovová skla pro matrice kompozitů [2].

Druh matrice		Měrná hmotnost ρ (kg. m ⁻³)	Pevnost v tahu Rm (Mpa)	Modul pružnosti v tahu E (Gpa)	Lomová houževnatost KIC (Mpa.m ^{1/2})	Maximální teplota použití (°C)
Název	Chemická značka					
Oxid hlinitý	Al ₂ O ₃	3300-4000	200	350-420	3,5-5	1800
Nitrid křemíku	Si ₃ N ₄	2500-3300	100-900	160-300	4-6	1500
Karbid křemíku	SiC	2200-3200	500	280-400	2,5-5	2100
Grafit	C	2200	70-140	690	-	3650

1.1.2 Zpevňující fáze

Od vyztužujících fází se vyžaduje vysoká pevnost a modul pružnosti E (asi o řád vyšší než modul matrice) a malá deformace do lomu (1 až 2 %) při vysokém podílu pružné deformace. Vyztužující fáze přenáší převážnou část vnějšího zatížení. Mechanismus pevnostního chování kompozitu je závislý na tvaru, koncentraci a orientaci výztuže [2].

Tvar částic výztuže může být uvažován přibližně jako koule (práškové formy výztuže) nebo jako válec (vlákna). Jejich velikost a distribuce řídí texturu kompozitu a spolu s objemovým podílem určují také mezifázový povrch, který má důležitou úlohu při určování rozsahu vzájemného působení mezi vyztužením a matricí na zpevnění [2].

Koncentrace představuje objemovou část vyztužující fáze, udává se v objemovém nebo hmotnostním podílu. Je jedním z nejvýznamnějších parametrů, ovlivňující vlastnosti kompozitu [2].

Orientace vyztužující fáze ovlivňuje izotropii systému. Mají-li vyztužující částice tvar a rozměry ve všech směrech přibližně stejné (jsou rovnoosé, např. prášky), chová se kompozit v podstatě jako izotropní mat., jehož vlastnosti jsou nezávislé na směru. Systémy vyztužené spojitou válcovitou výztuží (vlákny) vykazují anizotropii vlastností [2].

Podle geometrického tvaru rozdělujeme vyztužující fáze na [2]:

- částicové,
- vláknové,
- skeletové.

Částicové (také partikulární) vyztužující fáze jsou prášky s částicemi různých tvarů (mohou být kulovité, jehlancovité, destičkovité, event. jiných tvarů) i velikostí. Jako částicová výtěž (plnivo) se používají většinou prášky anorganických sloučenin typu oxidů (MgO, ZnO, BeO, Al₂O₃, ZrO₂, ThO₂, CdO, CrO₂, aj.) karbidů (SiC, TiC, B₄C, Al₄C₃, aj.) nitridů (Si₃N₄, BN), boridů (ZrB₂, TiB₂), příp. křemičitanů (jílové materiály-kaolin, slída, kuličky skla aj.) [2].

Vláknové vyztužující fáze jsou vlákna kovová, polymerní, keramická, skleněná, bórová, uhlíková nebo vláknové monokrystaly (tzv. whiskery). Vlákna jsou pevnější než stejné kompaktní materiály. Pevnost vlákna závisí především na jeho průřezu. Se zmenšujícím průřezem pevnost vlákna roste (uplatňují se zpevňující procesy v závislosti na stupni deformace). Vlákna mají většinou kruhový průřez o průměru od 10 μm do 1 mm (příp. větší pro makrokompozity) [2].

Kovová vlákna se používají na vyztužování kovových matic. Avšak z hlediska měrné hmotnosti jsou méně vhodné. Pro vyztužování kovových matic a poměrně nízkém bodu tavení (lehké slitiny) se obvykle používají ocelová vlákna z uhlíkových ocelí. Jejich použití je však omezeno do teploty 300 °C. Pro vyšší teploty se s úspěchem používají např. vlákna z oceli typu maraging (martenzitická stárnoucí ocel). Pro zpevňování matic a žárupevných slitin se používá vláken ze žárupevných kovů, např. wolframových nebo molybdenových. Hlavní úlohu při přípravě kompozitu kov-kov hraje kompatibilita vlákna a matrice [2].

Některá kovová vlákna a jejich vlastnosti uvádí tabulka 6.

Tab. 6 Vlastnosti některých kovových vláken [2].

Druh vlákna	Měrná hmotnost ρ (g. cm ⁻³)	Pevnost v tahu Rm (Gpa)	Modul pružnosti v tahu E (Gpa)	Teplota tavení (°C)	Průměr vlákna (μm)
Cr	7,4	1-4	353-424	1800	-
Mo	10,2	2,41	358	2622	25
Ocel	7,8	2,8-4,14	200	1450	13
Be	1,83	1,27	200-315	1280	127
Al	2,66	0,6	73	660	-
Ti slitiny	4,51	0,55-2,2	118	1800	-
Ni	8,2	2,3	220	1370	-
W	19,1	3	348	3400	13

Polymerní vlákna jsou určena většinou pro polymerní matice. Nevýhodou všech polymerních vláken je citlivost k vyšším teplotám. Další nevýhodou je jejich špatná smáčitelnost, zvláště ve vztahu k pryskyřicím. Důvodem je malá povrchová energie vláken, vyžadují proto úpravu povrchu. Významné místo zaujímají vlákna z aromatických polyamidů (APA), aramidů na bázi polymetafenylenteraftalamidu (PPTA) známé jako Kevlar nebo Twaron, jiný typ je Nomex na bázi polymetafenylentereftalamidu (PMTA) nebo Zylon z polyparafenylenbenzobisoxazolu (PBO). Tkanina z APA vláken je používána na neprůstřelné vesty a pancíře lehkých bojových vozidel [2].

Dále je taky velmi rozšířeno použití vláken lineárního polyetyleny UHMW PE. Některá polymerní vlákna a jejich vlastnosti uvádí tabulka 7.

Tab. 7 Vlastnosti některých polymerních vláken [2].

Druh vlákna	Měrná hmotnost ρ (g. cm ⁻³)	Pevnost v tahu Rm (Gpa)	Modul pružnosti v tahu E (Gpa)
Polyamidy	-	-	
PA6	1,13	0,6	2,9-3,5
PA12	1,02	0,45	1,6
PA66	1,36	0,8	2,9
Kevlar (aramid PPTA)	1,44	3,45	68,6
Twaron (aramid PPTA)	1,45	3	125
PBT (polybenzothiazol)	1,5	3,25	250
PE - UHMW	0,93	-	5,7

Keramická vlákna se vyznačují poměrně nízkou měrnou hmotností, vysokou pevností a vysokým modulem pružnosti E. Patří k nim především vlákna borová, uhlíková dále vlákna vyráběná z různých karbidů, nitridů a oxidů [2].

Vlastnosti některých uváděných keramických vláken ukazuje tabulka 8.

Borová vlákna vysoká pevnost tenkých vláken boru je zajišťována vysokou jemnozrností borové vrstvy; v některých případech detekované snížení pevnosti bylo vyvoláno výskytem lokálních defektů struktury, jako je například výskyt hrubých krystalů, vměstků, trhlin, atp. Určitým nedostatkem tohoto typu tenkých vláken je poměrně vysoká citlivost na výskyt koncentrátoru napětí [1].

Tenká vlákna boru lze používat jako armující složku složených materiálů jak s kovovou, tak i polymerovou matricí. Složené materiály (s různými typy matrice-například hliníkových nebo hořčíkových slitin), zpevněné tenkými vlákny boru, se v současné době s úspěchem využívají v leteckém průmyslu, jako jsou například stabilizátory, odlehčené uzávěry, krytky atp. [1].

Uhlíková vlákna jsou obvykle vyráběna ve dvou variantách jako vysokomolekulová (o hodnotách E cca 300 až 700.10³ Mpa, Rm cca 2000 Mpa), nebo vysokopevná (o hodnotách E cca 250 až 300.10³ Mpa, Rm cca 3000 až 3500 Mpa),. První typ uhlíkových vláken odpovídá tzv. grafitizované formě a druhý typ pak odpovídá tzv. karbonizované formě. Mimořádnou předností uhlíkových vláken je, kromě vysokých hodnot meze pevnosti a modulu pružnosti, velmi nízká hodnota měrné hmotnosti ($\rho = 1,75-1,95$ g/cm³) v porovnání s například s tenkými vlákny kovu ($\rho = 2,4-3,1$ g/cm³). Ve svých důsledcích toto znamená, že u uhlíkových vláken (při uvažované úrovni Rm a E) je dosahováno nejvyšší úrovně tzv. měrné pevnosti a tzv. měrného modulu pružnosti (definované jako Rm/ ρ resp. Jako E/ ρ) [1].

Tab. 8 Vlastnosti některých kovových vláken [2].

Druh vlákna	Měrná hmotnost ρ (g. cm ⁻³)	Pevnost v tahu Rm (Gpa)	Modul pružnosti v tahu E (Gpa)	Teplota tavení (°C)
Borová	2,63	3,5	400	2300
Borsic	2,7	3,1	400	2300
Uhlíkové	1,9	3,7	350	3650
Grafitové	2,15	2,1	720	3650
SiC	3,3	3,3	420	2690
Al ₂ O ₃ (safír)	3,15	2,08	380	2050
ZrO ₂	4,84	2,07	344	2700
Si ₃ N ₄	3,1	4	310	-
MgO	3,4	-	210	2850
Mullit	3,2	-	140	1850

Skleněná vlákna se v převážné míře používají na vyztužování polymerních matic. Dosahují poměrně vysoké pevnosti, mají však relativně nízký modul pružnosti E, jsou křehká. Používají se většinou v podobě různých tkanin. Vyrábí se z různých typů sklovin, jejichž přehled a chemické složení ukazuje tabulka 9. Vlastnosti vláken uvádí tabulka 10. Pro kompozity se nejčastěji používají vlákna ze skloviny E nebo S [2].

Tab. 9 Složení skleněných vláken [2].

Druh skla	Složení hm%						Ostatní
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	B ₂ O ₃	Na ₂ O	
A-sklo	72	1	10	2	-	14	SO ₃
C-sklo	65	4	14	3	5,5	8	K ₂ O
E-sklo	54	14	19	2	10	1	K ₂ O, TiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , F ₂
M-sklo	54	-	13	9	-	-	BeO 8%, i O ₂ 8%
S-sklo	65	25	-	10	-	-	CeO ₂ , Li ₂ O, ZrO ₂

Tab. 10 Některé vlastnosti skleněných vláken [2].

Vlákno	Měrná hmotnost ρ (kg. m ⁻³)	Pevnost v tahu Rm (Gpa)	Modul pružnosti v tahu E (Gpa)
A-sklo	2500	3,2	70
C-sklo	2490	3,1	69
D-sklo	2160	2,4	52
E-sklo	2540	3,4	72
M-sklo	2890	3,4	110
S-sklo	2480	4,8	85
Křemenné	2200	7	73

Skeletové vyztužení je takové, ve kterém matriční a sekundární fáze vytváří skeletové útvary, jež jsou navzájem mechanicky proniknuté. Rozlišuje se matriční skelet a armující skelet. Technologickou metodou přípravy je infiltrace matričního skeletu kapalnou látkou (nízkotavitelným kovem nebo polymerem), která po ztuhnutí v pórech matričního skeletu vytváří armující skelet. Matriční skelet je práškové metalurgicky připravené pórovité těleso z kovu, keramicky nebo grafitu [2].

Whiskery svými vlastnostmi převyšují rámec ostatních vyztužujících fází. Jsou to monokrystaly o průměru okolo 1 μm a délky 3 až 4 mm. Mohou se vyrábět z řady látek za reakčních podmínek při vysokých teplotách a řízené rychlosti růstu vznikajících monokrystalů. Jejich vlastnosti závisí především na podmínkách růstu, dokonalosti povrchu a na průměru. Nejdůležitější vlastností whiskerů je jejich vysoký modul pružnosti E. Vyrábí se whiskery oxidu hliníku (safír- Al_2O_3), karbidu křemíku (SiC), grafitu, chloridu sodíku (NaCl), křemíku, cínu [2].

Vlastnosti některých whiskerů jsou v tabulce 11.

Tab. 11 Vlastnosti některých whiskerů [2].

Druh whiskerů	Měrná hmotnost ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Pevnost v tahu R_m (Gpa)	Modul pružnosti v tahu E (Gpa)
Keramické	-	-	-
Al_2O_3	4000	15	470
SiC	3200	21	840
BeO	3000	7	720
B_4C	2500	14	482
Si_3N_4	3100	19	380
Grafit	1600	-	700
Kovové	-	-	-
Cr	7400	9	240
Cu	8900	3	120
Ni	9000	4	213
Fe	7800	13	200

1.2 Strukturní uspořádání fází v komponentech

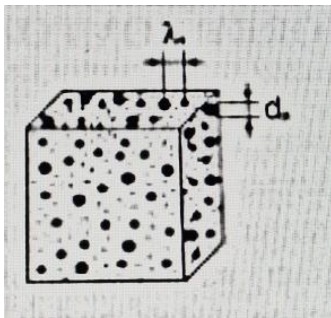
Struktura nebo také vnitřní stavba materiálů (látek) obecně představuje v širším slova smyslu charakter uspořádání strukturních jednotek v prostoru. Kompozity jako polyfázové soustavy, získávané míšením jednotlivých fází, jež jsou chemicky i fyzikálně různorodé, se svým vnitřním uspořádáním složek soustavy zcela odlišují od materiálů klasických (kovových, polymerních, keramických), jejichž struktura se tvoří z homogenní fáze (taveniny) prostorovým uspořádáním atomů, molekul nebo iontů. Strukturní charakteristiky kompozitního systému z pohledu mikrostrukturální dimenze jsou určovány strukturními charakteristikami jeho jednotlivých složek (matrice a výztuže) a jejich vzájemnou interakcí [2].

Kritériem strukturní charakteristiky kompozitu tedy je [2]:

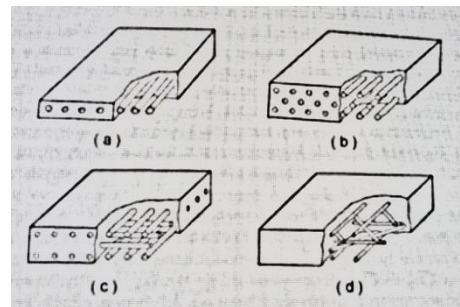
- materiál matrice a výztuže,
- morfologie výztuže a jejich uspořádání v objemu matrice.

Při popisu struktury kompozitů se vychází z těchto aspektů, přičemž určující charakteristikou nejběžněji bývá morfologie výztuže a jejich uspořádání v matrici. Podle tohoto hlediska jsou pak rozlišovány následující typy struktur kompozitů [2]:

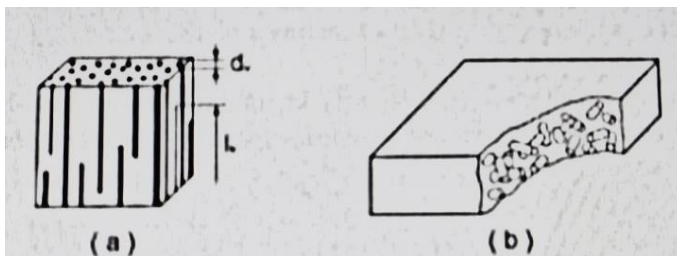
- částicová (obr. 5),
- vláknová (obr. 6) – s dlouhými vlákny (A), s krátkými vlákny (B) a také hybridní, tj. vícevrstvé kompozity sestávající z vrstev různých vláken,
- skeletová (obr. 7) pórovitý skelet matrice zaplněný infiltrovanou fází výztuže.



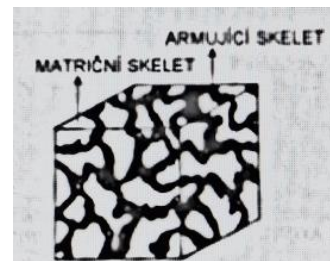
Obr. 5 Struktura částicová
 λ_s -mezičásticová vzdálenost,
 d_s -velikost částice [2].



Obr. 6 A Struktura vláknová s dlouhými vlákny jednovrstvová a vícevrstvová s orientací vláken jednosměrně průběžných (a, b) nebo s orientací ortogonální (c) nebo víceosou (d) [2].



Obr. 6 B Struktura vláknová s krátkými vlákny s jednosměrnou orientací vláken (a) a s nahodilou orientací vláken (b), d_v -průměr vlákna, l_v -délka vlákna [2].



Obr. 7 Struktura skeletová [2].

1.3 Teorie tvorby kompozitní soustavy

Zatímco při tvorbě slitin kovů se uplatňují kovové vazby, v polymerních materiálech kovalentní vazby a v keramických soustavách iontové nebo iontově-kovalentní vazby, tak tvorba kompozitních materiálů je založena na vzájemném synergickém působení povrchů zúčastněných složek (fází) na jejich rozhraní. Kritériem spojení jsou energetické stavy povrchů spojovaných složek, podmiňující vzájemnou přilnavost (adhezi). Pevnost spojení je funkcí řady faktorů fyzikální a chemické povahy [2].

Prvořadým předpokladem vytvoření stabilního spojení je smáčení výztuže maticí. Ke smáčení může dojít fyzikální nebo chemickou sorpcí nebo také chemickou reakcí matrice s povrchem výztuže, která je však nežádoucí, protože vede jednak k narušení výztuže a jednak ke vzniku křehkých fází, oslabující pevnost, adhezních vazeb. Smáčecí vlastnosti, kromě uvedeného, dále závisí na vzájemné afinitě složek, která je funkcí poměru hodnot jejich povrchových energií. Nejsnadněji se připravují kompozity s maticí v kapalném stavu [2].

Má-li být kompozit dokonale kompaktní, musí matrice danou výztuž dobře smáčet. Toho se dosáhne, bude-li energie volného povrchu výztuže vysoká a povrchová energie matrice co nejmenší [2].

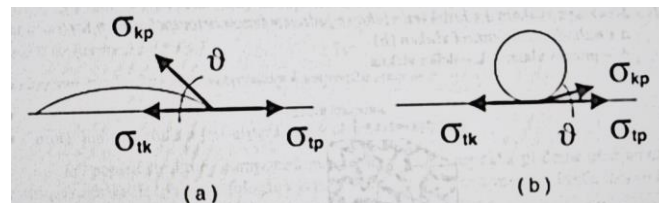
V praxi se smáčivost definuje tzv. kontaktním úhlem ϑ (úhel smáčení), který zaujme styk mezi kapkou kapaliny a plynu (vzduchu) s povrchem tuhé fáze (obr. 8). Je dán vztahem (1.1) [2]:

$$\cos\vartheta = \frac{\sigma_{tp} - \sigma_{tk}}{\sigma_{kp}} \quad (1.1)$$

Kde:

σ_{tp} je povrchová energie na rozhraní tuhé a plynné fáze,
 σ_{tk} je povrchová energie na rozhraní tuhé a kapalně fáze,
 σ_{kp} je povrchová energie na rozhraní kapaliny a plynu.

Podmínky dobré smáčivosti splňuje malý kontaktní úhel, tj. blíží-li se jeho hodnota $\cos \vartheta$ jedné obr. 8 a, v opačném případě se jedná o špatnou smáčivost obr. 8 b [2].



Obr. 8 Povrchová energie mezi kapalinou a tuhou fází (mezi kapalnou maticí a tuhou výztuží) [2].

1.4 Výrobní technologie kompozitů

Při výrobě kompozitních dílů je zapotřebí zaručit především tyto podmínky [1]:

- rovnoměrnost uložení zpevňujících fází v objemu,
- u vláknových možnost uložení jednotlivé vrstvy s libovolnou orientací vláken,
- dobré spojení zpevňující fáze s maticí,
- možnost změny objemového množství zpevňujících fází,
- možnost tepelného zpracování po výrobě,
- jednoduchost a hospodárnost výroby.

Volbu vhodné technologie ovlivňuje řada činitelů, např. druh zpevňujících fází (vlákna, částice) a matrice, způsob použití kompozitu, přípustnost anizotropie pro dané zatížení apod. Všeobecně lze složené materiály vyrábět dvěma základními postupy, které se dělí na několik rozdílných technologií [1]:

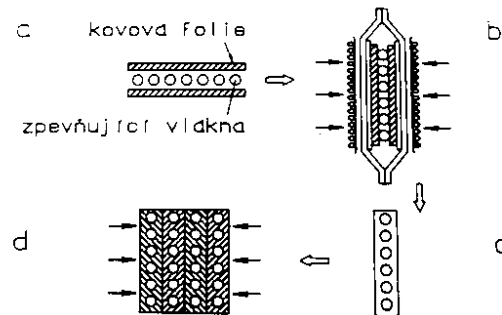
Výroba složených materiálů s maticí v tuhém stavu,

Výroba složených materiálů s maticí v tekutém stavu.

1.4.1 Výroba složených materiálů s matricí v tuhém stavu

a) Lisování za tepla

Postup výroby jednovrstvových a vícevrstevových materiálů znázorňuje obr. 9. Mezi dvě kovové folie se rovnoměrně uloží zpevňující vlákna (obr. 9a) a vloží mezi vyhřívané lisovací desky (obr. 9b). Tlakem za působení teploty se obě složky (matrice-vlákno) difúzně spojí a vznikne jednovrstvový složený materiál (obr. 9c). Lisování probíhá ve vakuu nebo v ochranné atmosféře. Slisováním několika těchto polotvarů vznikne vícevrstevový složený materiál (obr. 9d) [1].

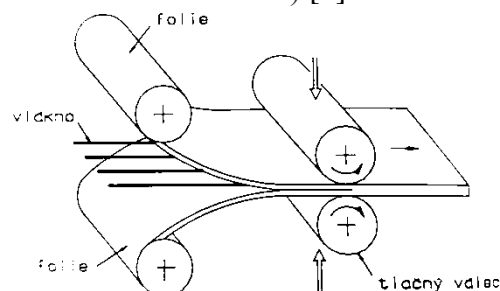


Obr. 9 Schéma výroby jednovrstvového a vícevrstevového materiálu lisováním za tepla [1].

Tato technologie je vhodná pro výrobu složených materiálů typu slitina Al-borsicové vlákno, slitina Ti-borsicové vlákno, slitina Ti-SiC vlákno aj. [1].

b) Válcování za tepla (obr. 10)

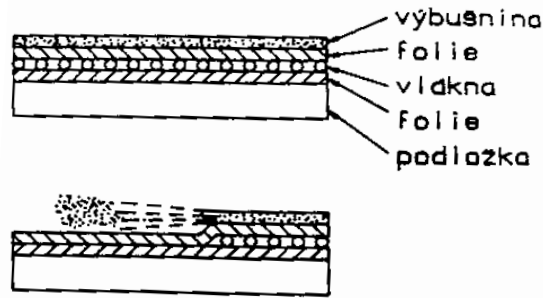
V porovnání s lisováním za tepla probíhá proces spojení vlákna a matrice při větší plastické deformaci matrice a kratší době. Např. složený materiál typu slitina hliníku-ocelové vlákno se válcuje při teplotě 400 až 420°C s rychlostí posuvu výrobku 0,15 m.s⁻¹. Válcováním při teplotě 980°C se vyrábí složené materiály typu slitina Ti-B vlákno, nebo žárupevné materiály ocel – W vlákno (válcování 1000 až 1200°C) [1]



Obr. 10 Schéma výroby složeného materiálu válcováním za tepla [1].

c) Explosivní tvářeni

Používá se v případech, kdy je potřeba dosáhnout vysokého tlaku a rychlosti deformace (20 až 4000 m.s⁻¹). Tím se zkrátí proces spojování na zlomky sekundy a zabrání se vzniku chemické reakce na povrchu vlákna. Schéma výroby znázorňuje obr. 11 [1].

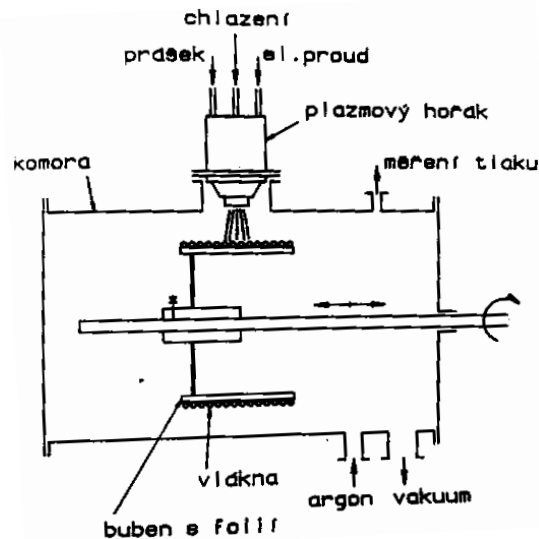


Obr. 11 Výroba složených materiálů výbuchem [1].

d) Plazmový nástřik

Zpevňující vlákna se navinou na buben ovinutý fólií z kovové matrice. Buben se umístí do stříkací komory s ochrannou atmosférou (argon) (obr. 12). Otáčením bubnu a posuvem plazmového hořáku se nástřiká na fólii s vláknou vrstva materiálu jako je fólie (může být i odlišný). Stříkaný kov musí obalit vlákna a spojit se s fólií a upevnit vlákna na fólii.

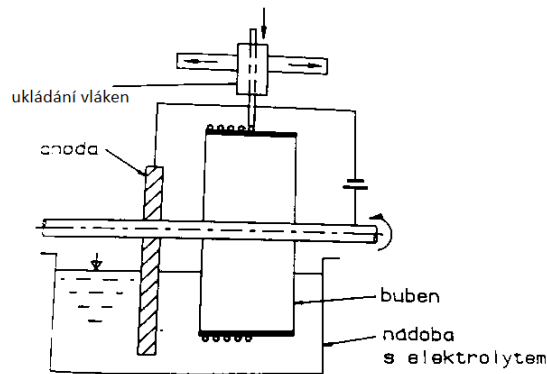
Výhodou této technologie jednoduché, a přitom dokonalé uložení vláken a malé tepelné ovlivnění vláken a tím i jejich vlastností. Nevýhodou je pórovitost stříkané vrstvy, kterou lze však odstranit následujícím lisováním za tepla [1].



Obr. 12 Schéma výroby složeného materiálu plazmovým nástřikem [1].

e) Elektrolytické nanášení matrice

Při této technologii se fólie navinutá na buben ponoří do elektrolytu a tvoří katodu (obr. 13). Anodou je nanášený kov. Otáčením bubnu se navijí na fólii zpevňující vlákno a současně probíhá elektrolytické nanášení kovové vrstvy, která tvoří matrici. Výhodou tohoto způsobu je nízká teplota pochodu, dokonalé přilnutí povlaku na vlákna a fólii. Nelze však nanášet slitiny kovů. Používá se při výrobě složených materiálů typu Ni-B vlákno, Ni-C vlákno, Cu-ocelové vlákno, Cu-W vlákno [1].



Obr. 13 Výroba složeného materiálu elektrolytickým nanášením matrice [1].

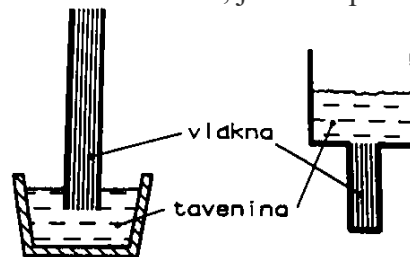
1.4.2 Výroba složených materiálů s matricí v tekutém stavu

Při tomto způsobu je základní podmínkou schopnost smáčení vyztužující fáze matricí. Dosažení lepší smáčivosti je možné povrchovou úpravou vyztužující fáze (vláken), která zároveň může omezovat vznik křehkých intermetalických fází na rozhraní. Protože ve srovnání s předcházejícími postupy jsou teploty při výrobě složeného mat. vyšší, je také vyšší nebezpečí tvorby intermetalických fází [1].

Výhodou těchto výrobních postupů je možnost výroby tvarově složitých součástí, naproti tomu je nevýhodou anizotropie vlastností složeného materiál., způsobené možností ukládání vláken pouze v jednom směru. Pro tento způsob výroby složených mat. se nejčastěji používá následujících technologických postupů [1].

a) Infiltrace vláken tekutou matricí

Postup je založen na využití kapilár (obr. 14). Vlákná (vyztužující fáze) jsou uložena do svazku a tekutý kov proniká, při dobré smáčivosti obou složek, úzkými kapilárami podél vláken. Aby se zabránilo oxidaci tekutého kovu, je nutné pracovat ve vakuu [1].



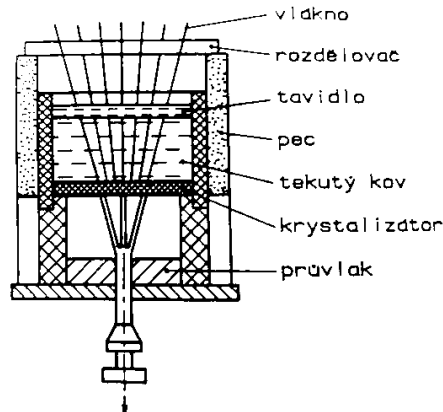
Obr. 14 Schéma výroby složeného materiálu infilrací a) zdola b) shora [1].

b) Nanášení tekutého kovu

Při tomto způsobu procházejí zpevňující vlákna lázní s tekutým kovem. Na povrchu vláken ulpí tavenina, která ztuhne v tenkou vrstvu kovu. Následujícím lisováním za tepla se z takto obalených vláken vyrobí složený materiál. Tato technologie se uplatňuje při výrobě složených materiálů s hliníkovou matricí a vlákny uhlíkovými, ocelovými, SiC, případně s měděnou matricí a vlákny wolframovými [1].

c) Kontinuální lití

Princip tohoto způsobu znázorňuje obr. 15. Zpevňující vlákna procházejí postupně rozdělovačem, tenkou vrstvou tavidla a tekutým kovem matrice do krystalizátoru, kde se vlákna spojí v jednotlivé svazky a končený profil se získá tažením přes průvlak. Technologie kontinuálního lití umožňuje plynulou výrobu profilů různého tvaru (tyče, trubky, nosníky tvaru I, T, U aj.) s tloušťkou stěny obvykle 1-2 mm. Touto technologií se vyrábí např. složité materiály typu Al slitina-B vlákno, Al slitina Ni-W vlákno, z nichž se vyrábí lopatky plynových turbín [1].



Obr. 15 Schéma výroby složeného materiálu kontinuálním litím [1].

d) Zalévání zpevňujících vláken

Podobá se předcházející technologii, není však kontinuální. Jako matrice se často používá eutektická slitina Al-Si a vyztužující vlákno uhlíkové (popř. uhlíkové s vrstvou SiC pro zlepšení smáčivosti v matrici). Tato technologie je vhodná také pro přípravu žárupevných složených materiálů např. slitina Ni-W vlákno, z nichž se vyrábí lopatky plynových turbín [1].

1.5 Klasifikace kompozitů

Kompozity je možné členit podle mnoha různých hledisek, např. [2]:

a) podle povahy matrice

- kompozity s kovovou matricí,
- kompozity s polymerní matricí,
- kompozity s keramickou matricí.

b) podle druhu zpevňující fáze

- kompozity s kovovou zpevňující fází,
- kompozity se skleněnou zpevňující fází,
- kompozity s keramickou zpevňující fází,
- kompozity s polymerní zpevňující fází,
- kompozity zpevněné vláknovými monokrystaly (whiskery).

c) podle geometrického tvaru zpevňující fáze

- kompozity s částicovými zpevňujícími fázemi,
- kompozity s vláknovými zpevňujícími fázemi,
- kompozity se skeletárními zpevňujícími fázemi,
- kompozity s vrstevnatými zpevňujícími fázemi.

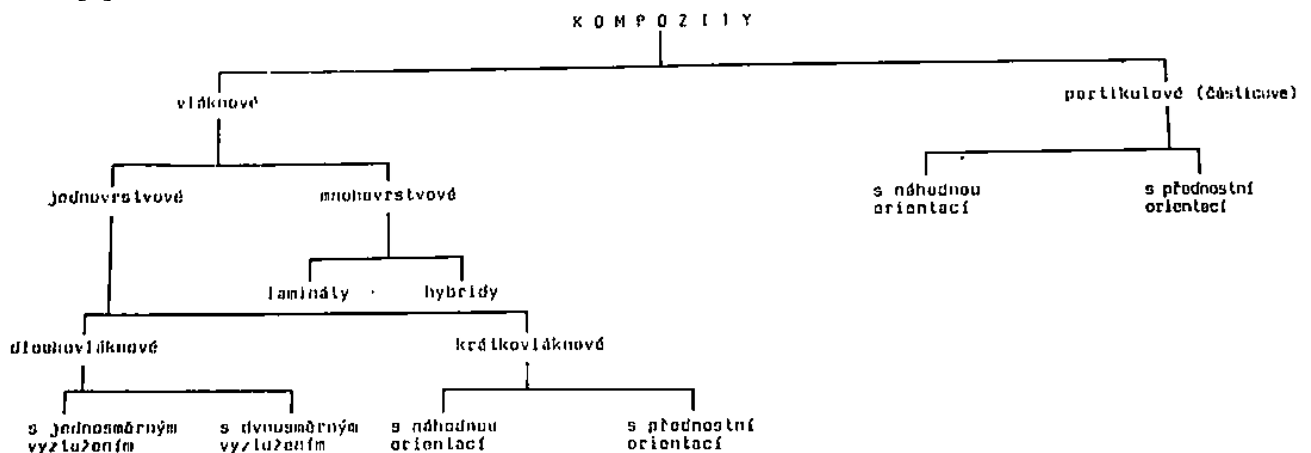
Dalším klasifikačním kritériem mohou být rozměry vyztužující fáze, dle kterých dělíme kompozity na **nano-**, **mikro-** a **makrokompozity** [2].

Nanokompozity jsou kompozity plněné částicemi o rozměrech řádově v nanometrech (nm). Nejčastěji se používají speciálně organicky upravené jíly. Vyznačují se mimořádně vysokým zpevňujícím efektem při minimálním obsahu výztuže. Účinně zlepšují vlastnosti zvláště u plastů a to především tepelnou odolnost, pevnost, tuhost a odolnost proti hoření. Perspektivní využití se předpokládá v motorových částech automobilů a jiných, podobně namáhaných výrobcích. [2].

Mikrokompozity mají obecný význam jako konstrukční materiály pro různé technické aplikace. Příčné rozměry výztuže se pohybují zhruba v rozmezí 1 až 100 μm. Ve srovnání s kovy mají menší hustotu a tudíž příznivější měrnou pevnost (R_m/ρ) a měrný modul pružnosti (E/ρ). Mikrokompozity mají dobrou lomovou houževnatost, zatímco nanokompozity dosahují vyšší pevnosti a tvrdosti [2].

Makrokompozity představují kompozitní soustavy s výztuží o příčných rozměrech řádově milimetry až desítky milimetrů. Jedná se o systémy používané hlavně ve stavebnictví jako např. beton s výztuží ocelových prutů, beton plněný kamennou drtí, či polymerbetony s obsahem pryskyřice a kameniva aj. Za makrokompozity jsou také považovány vrstvené polymerní materiály vyztužené tkaninami (známé jako textit), vrstvené dřevo (překližka), strukturní pěny z plastů a i plátované kovy a bimetaly [2].

Obecně přijaté klasifikační schéma pro kompozitní materiály představuje obr. 16. V této klasifikaci je rozlišovací charakteristikou zpevňujících fází v podstatě to, zda je vláknová či nikoli [1].



Obr. 16 Klasifikace kompozitních materiálů [1].

V praxi se obvykle kompozity dělí podle geometrického tvaru výztuže na částicové a vláknové a v rámci těchto skupin se pak rozlišují podle uživatelských vlastností v závislosti na materiálu matrice a materiálu výztuže [2].

1.5.1 Částicové kompozity

Charakteristikou částicových kompozitů je, že částice jako vyztužující fáze jsou dispergovány v matrici a nevytváří vlastní agregovanou strukturu. Matrice může být kovová, polymerní i keramická. Částice je definována jako nevláknový útvar, může být kulová, krychlová, destičková nebo jiného pravidelného či nepravidelného tvaru, ale přibližně rovnoosá [1].

Částice v partikulovém kompozitu omezují rozvoj plastických deformací v materiálu matrice. Rovněž se podílí na přenosu namáhání, ale v mnohem menším rozsahu než vlákna ve vláknových kompozitech, ležících ve směru zatížení. Částice jsou tedy účinné při zlepšování tuhosti kompozitů, ale nenabízejí možnost podstatného zvýšení tahové pevnosti. Částicová plniva jsou široce využívána ke zlepšení vlastností matricových materiálů např. pro úpravu tepelné a elektrické vodivosti, zlepšení chování při zvýšených teplotách, k redukci tečení, zvýšení odolnosti vůči opotřebení a ořezu, pro zlepšení obrobitelnosti, zvýšení povrchové tvrdosti a k redukci smrštění [1].

Materiál částic a matrice v partikulovém kompozitu může být jakákoliv kombinace kovových a nekovových materiálů. Volba určité kombinace závisí na žádaných konečných vlastnostech. Významná pozornost se věnuje disperzně zpevněným kovovým materiálům připravovaným práškovou metalurgií, které jsou složeny z kovové matrice a stabilních disperzních částic, např. oxidů, nitridů, karbidů a boridů [1].

Aplikaci nepoužívanějších disperzních zpevněných soustav uvádí tab. 12.

Tab. 12 Nepoužívanější disperzně zpevněné materiály [2].

Typ kompozitu	Vlastnosti	Aplikace
Ag – CdO Ag – SnO ₂	Dobrá el. vodivost	Elektrické kontakty přístrojů (spouštěčů, vypínačů, relé)
Cu – Al ₂ O ₃ Cu – BeO Cu – ThO ₂	Tepelně stabilní, žárupevné, vysoce el. vodivé	V elektrotechnice a svářecí technice
Slitiny Fe – Al ₂ O ₃ Fe – CrO ₂ Fe – ThO ₂ Fe – Y ₂ O ₃ Fe – Cr ₂ O ₃	Odolnost proti křehnutí v podmínkách neutronového záření	V konstrukcích atomových reaktorů
Al – Al ₂ O ₃ Al – Al ₄ C ₃	Teplotní odolnost do 773K	Konstrukční části dlouhodobě zatěžované při zvýšených teplotách do 773K
Ni – ThO ₂ Ni – HfO ₂ Ni – ZrO ₂	Teplotní odolnost do 1273K	V letecké a kosmické technice (spalovací komory, lopatky plynových turbín, stabilizátory plamene)

Anorganická plniva (CaCO₃, MgO, ZnO aj.) se velmi výhodně používají pro zlepšení různých vlastností polymerů, např. pevnosti, tuhosti aj. vlastností důležitých pro konstrukční využití. Kaučukovité částice vložené do polymeru, který je křehký, vytvářejí energetické bariéry růstu trhlin a zvyšují pevnost kompozitu apod. [1].

Další spektrum částicových kompozitů, avšak agregovaných, poskytují keramické systémy. Nejjednodušším je dvoufázový kompozit z keramické a pórové fáze, vyráběný slinutím prášků oxidů (Al₂O₃, ZrO₂, BeO aj.) [1].

- kompozit keramika-kov, např. pro použití jako materiálu pro kluzná uložení (Al-Pb, Fe-Pb, C-Cu) [1].

- kompozit keramika-keramika, tuhá keramická fáze disperguje v tuhé keramické matici. Např. Si_3N_4 s dispergovanými částicemi SiC nebo B_6C . Obě fáze přispívají ke zlepšení vlastností pro využití při vysokoteplotních aplikacích [1].
- kompozit keramika v kovu (tvz. cermet). Strukturně jde o disperzi keramických částic ve spojité kovové matici anebo naopak. Cermety na oxidové bázi se běžně používají jako materiály na nástroje pro obrábění při vysokých rychlostech, ochranná pouzdra termočlánků, vývody pecí apod. [1].

1.5.2 Vláknové kompozity

Synergické spolupůsobení pevných a tuhých vláken (kovových, polymerních, skleněných, keramických nebo whiskerů) s poddajnou nebo křehkou maticí (kovovou, pomylní, keramickou, skleněnou nebo sklokeramickou) umožňuje konstruovat kompozity s vysokou pevností, tuhostí a houževnatostí. Proto kompozitům tohoto druhu je v praxi věnováno nejvíce pozornosti a nachází také nejširší uplatnění [1].

Vláknové kompozity můžeme dělit podle způsobu uložení vláken na materiály s uspořádaným systémem výztuže – kontinuálních vláken (s **dlouhými vlákny**) a s náhodně uloženými (diskontinuálními) vlákny (**krátká vlákna**) [1].

Kompozity s dlouhými vlákny mohou mít uspořádání vláken v matici, jednosměrné, dvouosé nebo víceosé, mohou být jednovrstvové nebo vícevrstvé i s hybridním uspořádáním vrstev. Vlákna jsou spojena maticí, která plní funkci přenášení vnějšího zatížení na vlákna. Požadavky na vlákna a matrice kompozitu jsou rozdílné v souvislosti s jejich účelem použití (vysoká pevnost, žarupevnost, elektrická vodivost, chemická odolnost apod.) [2].

Některé aplikace kompozitů s kovovou a keramickou maticí vyztužených kontinuálními vlákny uvádí tabulka 13.

Tab. 13 Příklad použití kompozitů s kovovou a keramickou maticí vyztužených dlouhými vlákny [2].

Oblast využití	Příklad použití	Požadované vlastnosti	Požadované vlastnosti
Konstrukce letadel	Vzpěry, dorzální nosníky, skříně křídel, výztuhy, dveře, rámové konstrukce	Nízká hmotnost, tuhost a pevnost	Al/B, Al/SiC, Al/C
	Lopatky kompresoru a dmychadel, lopatky turbíny	Tuhost, pevnost, odolnost vůči teplotě a nárazům	Al/SiC, Al/C, Ni/ThO ₂ , SiC/C
Automobily	Bloky motorů, rámové konstrukce, pístnice, rozvodové tyče	Nízká hmotnost, odolnost vůči teplotě, pevnost a tuhost	Al/SiC, Al/B
Energetika	Lopatky kompresorů a turbodmychadel	Pevnost, tuhost, nízká hmotnost	Al/B do 250°C pro vyšší T až do 600°C Ti/B, Ti/SiC

Elektrotechnika	Kartáče el. motorů, vodiče	Elektrická vodivost, otěruvzdornost	Cu/C
	Desky Pb akumulátorů	Tuhost, pevnost, korozivzdornost	Pb/Al ₂ O ₃ , Pb/C, Pb/skleněné vlákno
Sportovní nářadí	Tenisové rakety, lyže, lyžařské hole, rámy kol	Nízká hmotnost, tuhost a pevnost	Al/B, Al/C, Al/SiC
	Golfové hole, rybářské pruty	Nízká hmotnost, pevnost a ohebnost	Al/B, Al/C

Vlastnosti a použití kompozitů s termoplastovou a reaktoplastovou maticí, vyztuženou dlouhými vlákny, jsou uvedeny v tabulkách 14 a 15.

Tab. 14 Vlastnosti a použití kompozitů s termoplastovou maticí vyztužených dlouhými vlákny [2].

Kompozit		Objem výtzuže V (%)	Měrná hmotnost ρ (kg. m⁻³)	Max. pracovní teplota T (°C)	Modul pružnosti v tahu E (Gpa)	Použití
Matrice	Druh a forma výtzuže					
Polypropylen PP	Sklo-Vlákno rohož	13,5	1100	100	4630	Nádrže a zásobníky pro chemikálie, kryty, pouzdra.
Polybutylen-ereftalát	Sklo-Vlákno rohož	22	1580	140	8280	Kryty, pouzdra díly pro automobily
Polyethersulfon	C-vlákno tkanina	62	1650	160	76 000	V leteckých konstrukcích
Polyetheretherketon	C-vlákno rovng	65	1620	250	17 400	Konstrukční mat. v letectví
Polyamid 12	C-vlákno tkanina	54	1420	160	62 600	Letecké aplikace

Tab. 15 Vlastnosti a použití kompozitů s reaktoplastovou maticí vyztužených dlouhými vlákny [2].

Kompozit		Objem výtzuže V (%)	Měrná hmotnost ρ (kg. m ⁻³)	Max. pracovní teplota T (°C)	Modul pružnosti v tahu E (Gpa)	Použití
Matrice	Forma a druh a forma výtzuže					
Polyesterová pryskyřice	Sklo E tkanina	33,8	1720	80	16 000	Chemický průmysl, stavebnictví, dopravní prostředky
	Sklo E rohož	16,8	1400	80	6150	Kontejnery odpadu, nádrže, sportovní lodě
Fenolická pryskyřice	Sklo tkanina	33,8	1720	150-230	35 000	Lamináty pro interiéry prostředků homadné dopravy
Epoxi	Sklo S roving	65	2070	125	57 000	Letecký průmysl, kapotáž větroňů, přistávací klapky
Bismaleinimidová pryskyřice	C-vlákno roving	60	1620	230	165 000	Spodní díly letadel s kolným startem

Kompozity s krátkými vlákny jsou většinou svým charakterem vyztužení, materiály izotropní s vlákny nahodile uspořádanými, nebo s výtzuží typu netkaných textílií či rohoží. Mohou být jednovrstvé i vícevrstvé i s hybridním uspořádáním vrstev. Jako matrice jsou používány jak reaktoplasty (které převažují), tak termoplasty. Používaná výtzuž krátkých vláken jsou převážně sekaná skleněná vlákna, ale i uhlíková a jiná, vyjma kovových a keramických. Nebo skleněná vlákna (též uhlíková, aramidová apod.) v podobě netkaných textílií, rohoží event. tkanin [2].

Praktické využití těchto kompozitů je velmi široké v různých technických oborech. Vlastnosti a použití některých krátko vláknových kompozitů s maticí termoplastovou a reaktoplastovou jsou uvedeny v tabulce 16 [2].

Tab. 16 Vlastnosti a použití kompozitů s termoplastovou a reaktoplastovou maticí vyztužených krátkými vlákny [2].

Kompozit		Objem výtzuže V (%)	Měrná hmotnost ρ (kg. m ⁻³)	Max. pracovní teplota T (°C)	Modul pružnosti v tahu E (Gpa)	Použití
Matrice	Forma a druh a forma výtzuže					
REAKTO-PLASTY Polyesterová pryskyřice	Vlákna skleněná sekaná	33	1830	80	13 200	Výlisky pro automobilový průmysl, sanitární techniku
	Skleněná vlákna sekaná	65	1820	80	1480	Výlisky pro elektrotechniku, přílby
Fenolická pryskyřice	Skleněná vlákna sekaná	10-25	1780-2100	150-210	17 000-21 000	Výlisky pro elektrotechnický průmysl s vysokou tep. odolností
TERMO-PLASTY Polypropylen	Skleněná vlákna sekaná	30	1140	100	48	Košíky, vaničky, vázací pásy
Polyamid	Skleněná vlákna sekaná	30	1350	150	-	Ozubená kola, ložiska
Polykarbonát	Skleněná vlákna sekaná	30	1350	130	6800	Jako dielektrikum, ložiska, ozubená kola

1.6 Kompozity v každodenním životě

Nesporná skutečnost, že kompozitní materiály představují nejúčinnější využití potenciálních možností hmoty, a tím maximalizaci energetických úspor nejen z hlediska materiálu, ale i z hlediska využívání konstrukce, se odráží v rychlém pronikání kompozitů do všech odvětví hospodářství [3].

Železobeton (obr. 17) nebo také železový beton je název pro kompozitní materiál tvořený betonem a ocelovou nebo železnou výtzuží (betonářská výtzuž), která je do betonu při výrobě vložena (zalita) tak, aby při deformaci (zatížení) prvku byla „natahována“. Důvodem vkládání výtzuže do betonu jsou typické vlastnosti betonu, tj. vysoká pevnost v tlaku a velmi malá pevnost v tahu. Naproti tomu výtzuž má v tahu únosnost vysokou [5].

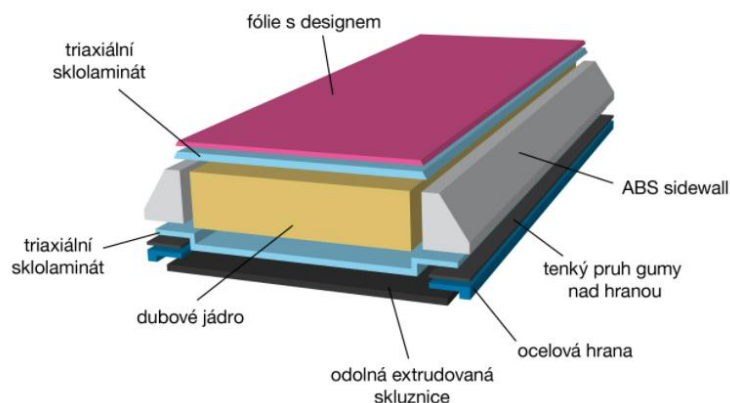


Obr. 17 Náhled na vybouranou strukturu železobetonu, který tvoří stropní panel [5].

Velké množství kompozitních materiálů je využíváno pro výrobu **sportovního náčiní**. V dnešní době se ve většině sportovního odvětví výrobci nabízí kompozitní výrobky. Výrobci vykládají astronomické částky na výrobu a vývoj nových materiálů pro sportovní potřeby. Největším důvodem pro využití kompozitů je snížení hmotnosti cca 20% proti součásti vyrobenou z klasických mat.) další výhodou je možnost vyrábět komplikované tvary [3].



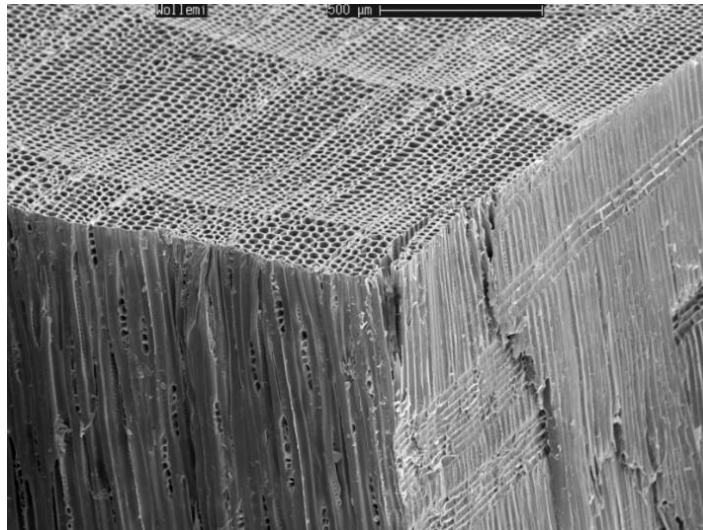
Obr. 18 Struktura čepce hokejky z kompozitu [6].



Obr. 19 Řez sjezdovou lyží a jednotlivé vrstvy [7].

Kompozity se uplatňují se při výrobě sportovních zařízení a vybavení, jako jsou např. hokejky (obr. 18), golfové hole, tenisové rakety, oštěpy, lyže (obr. 19) a snowboardová prkna, lodě apod. [3].

Jedním z příkladů kompozitních materiálů je **dřevo** obr. 20. Dvě hlavní stavební složky dřeva jsou lignin a celulóza. Pokud izolujeme celulózu, zjistíme, že se jedná o velmi pevný materiál, ale jenom co se týče jeho tahu. Stejně jako naše oblečení, celulóza ve formě vláken sice dobře udrží napětí, ale lze ji velmi lehce ohnout. Proto by nikdy sama o sobě nedokázala udržet váhu celého stromu. Na druhou stranu, lignin by zase nedokázal podpořit větve, rozpínající se v korunách stromů a ohýbající se pod vlivem gravitace [8].



Obr. 20 Obrázek struktury dřeva pod mikroskopem [8].

Právě kombinace ligninu a celulózy propůjčuje dřevu dostatečnou pevnost, aby udrželo celou váhu koruny působící na kmen a umožnilo větvím odolávat gravitaci [8].

2 MOŽNOSTI OBRÁBĚNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ A DOSTUPNÉ TECHNOLOGIE

Obrábění kompozitních materiálů je velice odlišné od běžného obrábění kovů a jejich slitin díky jejich rozdílným fyzikálním vlastnostem a vzhledem k jejich nehomogenitě a silné anizotropii. Během obrábění kompozitních materiálů je nástroj velmi silně opotřebováván, zejména abrazivně. To způsobují mechanické vlastnosti výztuže. Z tohoto důvodu je doporučeno používat nástroje z tvrdých a otěruvzdorných materiálů, jako je například slinutý karbid, cermety, řezná keramika a především polykrystalický diamant, případně polykrystalický nitrid bóru. Díky různé orientaci vláken je materiál silně anizotropní. Problematický je také odvod tepla z místa řezu. Je to zapříčiněno především vlastnostmi matrice. Ta velmi špatně vede vzniklé teplo a usazuje se na nástroji [9].

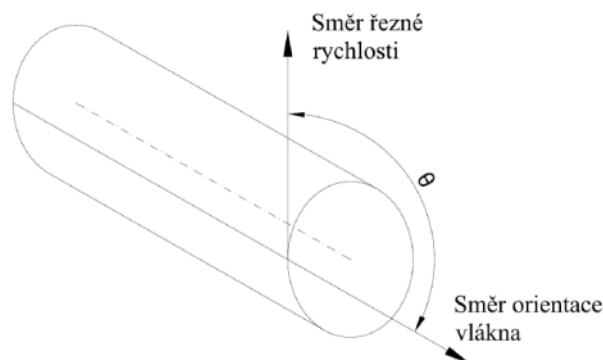
I když není obrábění FRP chtěné, nelze se tomuto zpracování vyhnout kvůli požadované rozměrové přesnosti a kvalitě povrchu. Vrtání, soustružení, frézování, broušení a dělení materiálu patří k nejčastějším obráběcím technologiím FRP [2].

2.1 Soustružení

Soustružení se provádí především pro obrábění symetrických rotačních součástí, jako jsou ložiska, vřetena, nebo jiné válcové součásti z kompozitních materiálů. Soustružení se liší od frézování a řezání hlavně téměř konstantními záběrovými podmínkami. Tyto podmínky nejsou plně konstantní, protože matrice a vyztužující vlákna kladou různý odpor. Při obrábění FRP dochází ke kvazi-kontinuálnímu stříhu [3].

Úhel natočení vláken při soustružení

Při soustružení kompozitních materiálů nemá orientace vláken tak velký vliv na drsnost povrchu. Na povrch, velikost řezných sil a podobu třísky má zásadní vliv orientace vláken θ (obr. 21). Tato orientace je prezentována jako úhel mezi směrem orientace vlákna a směrem řezné rychlosti, ve směru hodinových ručiček. Vektor řezné rychlosti se při soustružení nemění. Úhel natočení vláken závisí na uspořádání vláken na obráběné součásti. [3].

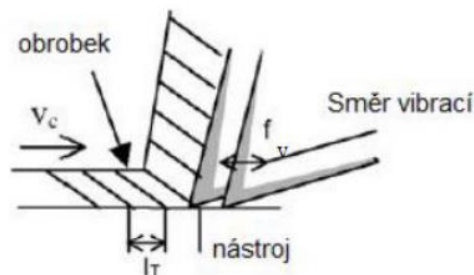


Obr. 21 Úhel natočení vláken při soustružení [10].

Pro orientaci vláken 0° , tj. podélně navíjená vlákna, jsou při styku s řeznou špičkou nástroje namáhána kolmo pod úhlem 90° . Vlákna jsou namáhána na ohyb a dochází k přelamování vláken kolmo na vedení. Zde dochází k značné delaminaci, roztržení a vylamování vláken z povrchu materiálu a tak je obrobený povrch hrubší [10; 11].

Při podélném soustružení dochází k roztřepení na rozhraní mezi obrobeným a neobrobeným povrchem a na přechodech jsou vlákna vytahána do obrobeného povrchu. Soustružením vrstvy s orientací vláken 90° dochází k vyřezávání celých vláken po obvodu obrobku. Vlákna jsou namáhána na tlak a břit podnítí praskání materiálu na rozhraní fází a výsledný povrch je tak ve vroubkované formě. Pokud je obráběna vrstva materiálu s vlákny pod úhlem 45° či 135° , jsou vlákna namáhána na ohyb a tlak. Kvalita povrchu a průběh obrábění šikmo navíjených vláken je zdaleka nejlepší [10; 11].

Protože je obtížné obrábět CFRP s vysokou účinností, je možné obrábět ultrazvukovým vibračním soustružením pomocí nástroje z PKD. Kvalitní povrch u složitě obrobitelných materiálů zajistíme použitím ultrazvukového vibračního řezání. Vibrace dávají možnost vyhnout se nepřetržitému kontaktu mezi obrobkem a břitem nástroje, jejich cílem je dosáhnout stříhu samostatně jednotlivých vláken a matrice. To je dáno řeznou vzdáleností během jedné periody vibrace nástroje. Princip postupu ultrazvukového vibračního řezání je na obr. 22. Povrch po vibračním soustružení je u materiálu s menším průměrem vláken výrazně lepší a u materiálů s většími průměry vláken je drsnost povrchu podobná [10; 11].



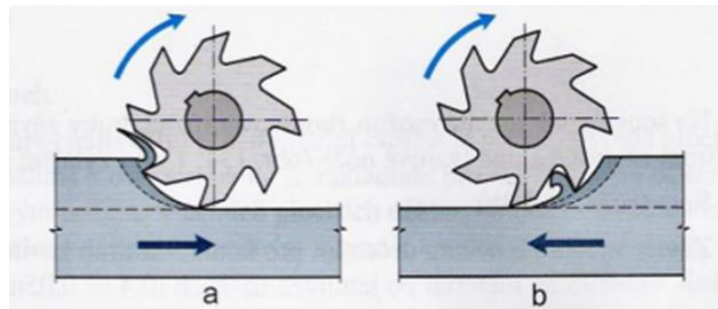
Obr. 22 Mechanismus ultrazvukového vibračního řezání [12].

2.2 Frézování

Technologie frézování používaná u vláknových kompozitních materiálů, se oproti kovovým materiálům liší nízkým poměrem odebraného materiálu, vzhledem k celkové části objemu. Frézování se většinou využívá jako dokončovací operace, nebo pro finální zpracování pro zvýšená kvality povrchu, jako odjehlování, nebo odstraňování modelovací směsi [3].

Nejdůležitějšími faktory, pro výběr vhodného nástroje a volbu obráběcích parametrů, jsou typ vláken výztuže, objemový podíl matrice a struktura. Volba nástrojového materiálu u uhlíkových a skleněných vláken se volí podle abraze, nástroj musí mít větší pevnost a tvrdost při řezání tvrdých vláken. Při řezání aramidových vláken, musí být vlákna řezána současně za jejich předpětí, to určuje jakou geometrii má mít nástroj. Chování materiálů při frézování kompozitů záleží nejvíce na vlastnostech vláken výztuže. Jelikož při frézování dochází k odběru ve více směrech najedou, je potřeba vhodně optimalizovat řezné podmínky [3].

Frézování kompozitů se rovněž vyznačuje několika specifickými aspekty. Na rozdíl od opracování kovů se při jejich obrábění doporučuje dávat přednost frézování nesouslednému (obr. 23a), kdy se zub frézy pohybuje proti směru posuvu. Při tomto způsobu práce se možná trhlinka iniciuje ve směru obrábění a do míst, která dosud nejsou obrobena (při sousledném frézování zub, vnikající do materiálu, iniciuje trhlinku kolmo na směr posuvu, a ta zůstává v povrchu i po obrobení) [13].



Obr. 23 a) nesousledné frézování, b) sousledné frézování [14].

Dále se při sousledném frézování (obr. 23b) odebraný materiál městná při obrobeném povrchu, dochází k nežádoucímu zvýšení tlaku na obrobenou plochu a může dojít k problémům s nedostatečnou velikostí prostoru pro třísky – u nesousledného frézování tyto problémy odpadají. Konečně při nesousledném frézování nedochází k maximální teplotě na břitu při výběhu nástroje ze záběru na opracovaném povrchu, ale na povrchu dosud neopracovaném [13].

2.3 Vrtání a vyvrtávání

Pro vrtání děr v součástech vyrobených z vláknových kompozitů lze použít klasické šroubovitě vrtáky z rychlořezných ocelí bez povlaků nebo s povrchovými ořezvzdornými povlaky. V obou případech je ale nutné očekávat nízkou trvanlivost a s ní spojenou častou výměnou a přestrojování nástroje, samozřejmě ve větší míře u nepovlakovaných vrtáků [3].

Ukázka vrtání do kompozitního materiálu z uhlíkových vláken obr. 24.



Obr. 24 Vrtání do kompozitu z uhlíkových vláken [15].

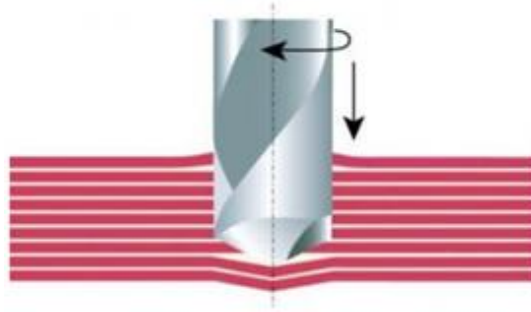
Velký vliv na proces tvorby třísky, trvanlivost nástroje, přesnost rozměrů, tvaru a drsnost povrchu vyrobené díry mají též geometrické parametry šroubovitěho vrtáku. Proto je vhodné před vlastním vrtáním provést kontrolu přesnosti nástroje zaměřenou na průměr, kuželovitost, tloušťku jádra, rozdíly v délkách hlavních ostří a velikost příčného ostří. Důležitou roli hrají i úhly nastavení obou hlavních ostří a jejich rozdíly a úhly hřbetu obou břitů a jejich rozdíly [3].

Vrtání představuje nejrozšířenější operaci při opracování kompozitů – jenom na moderním dopravním letadle je nutno do kompozitových dílců vrtat 1,5–2,0 mil. otvorů pro nýty! Při vrtání kompozitů lze dosáhnout přesností H7–H8; problematický je zejména výstup nástroje z materiálu, kde příliš velká axiální složka řezné síly způsobuje delaminaci povrchových vrstev [13].

Řešením je speciální úprava ostří s úhlem špičky jen 90–100°, úhel čela 15–20°, dostatečně velký úhel hřbetu zabraňující vzniku tepla jeho třením o opracovaný materiál, zkrácení příčného ostří, stupňovité provedení špičky nebo vybavení vrtáku řeznými hroty na vnějším průměru nástroje [13].

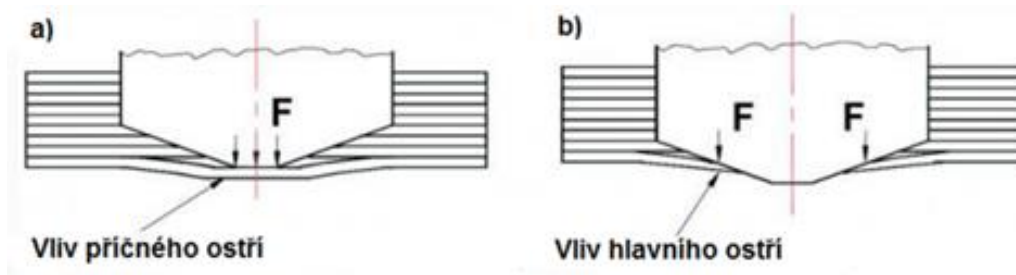
Delaminace

Specifickým poškozením při obrábění kompozitů je delaminace. Nejčastěji se vyskytuje při vrtání vrstvených kompozitů. Dochází k ní jak uvstupu (odlupování povrchové vrstvy) tak i na výstupu (odlupování neobrobené vrstvy pod nástrojem) vrtáku z materiálu (obr. 25) [16].

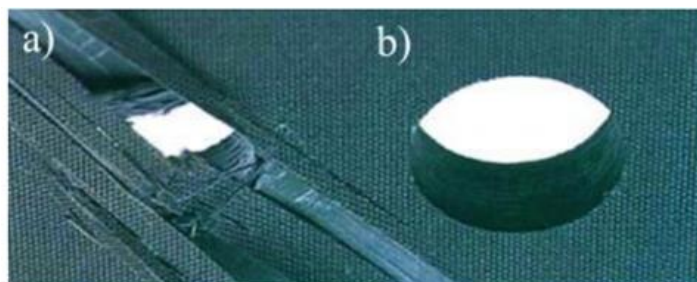


Obr. 25 Delaminace [16].

Vznik a rozvoj delaminace při vrtání šroubovým vrtákem probíhá postupně ve dvou fázích (fáze působení příčného ostří a fáze působení hlavního ostří). První fáze začíná v momentě, kdy síla F od příčného ostří, působící na dosud neobrobenou vrstvu materiálu, dosáhne kritické hodnoty a končí poté, co příčné ostří pronikne ven (obr. 26a). Při deformaci se nejdříve vytvoří malé vydutí v okolí osy vrtání a poté se dále šíří ve směru vláken v povrchové vrstvě. V okamžiku, kdy vyboulení dosáhne mezní hodnoty, povrchová vrstva se rozevře, příčné ostří pronikne ven a následně začne druhá fáze. Delaminace iniciovaná v první fázi se v důsledku tlaku a otáčení hlavního ostří vrtáku dále rozvíjí (obr. 26b). Příčné ostří řeže materiál obrobku s velkým negativním úhlem a tvoří přes 50% posuvové síly. V momentě, kdy příčné ostří prostoupí na povrch, delaminace dosáhne z velké části své konečné velikosti [16].



Obr. 26 a, b Fáze vzniku delaminace [16].



Obr. 27 a) díra s delaminací b) správně vyvrtaná díra [17].

Delaminace u vrstvených materiálů nenastane uvnitř vrstvy, ale pouze mezi jednotlivými vrstvami laminátu obr. 27. Mimo nastavení řezných podmínek má na delaminaci také značný vliv stav ostří nástroje. Není-li nástroj dostatečně ostrý, vlákna nejsou deformována stříhem, ale mají sklon se před ostřím ohýbat a dále jsou vytahována z matrice [16].

Delaminaci můžeme omezit, případně jí zcela zabránit volbou vhodných nástrojů. Geometrie fréz mají nízké stoupání šroubovice, zajišťující snížení axiálních sil na lamelární vrstvy materiálu a tudíž nedochází k jejich delaminaci. Také při volbě správného vrtáku se používá různých úhlů špičky a stoupání šroubovice [18].

2.4 Broušení

Metoda obrábění broušením kompozitů se používá, stejně tak jako u broušení kovových částí, převážně pro získání požadovaného hladkého povrchu nebo lepší rozměrové přesnosti. Pro získání kvalitnějšího povrchu se používají klasické brusné papíry, kotouče či jiné brusné elementy [19].

Jiným důvodem broušení těchto materiálů je získání povrchu pro následné nanesení barvy nebo přebroušení nanesené barvy před následným lakováním. Pro brusný proces se využívá rotačních brusných kartáčů. Jednotlivé kartáče jsou vsazovány do brusné hlavy, která koná rotační pohyb. Výhodou používání kartáčů je stejnoměrné vybroušení tvarových profilů. Kartáč se totiž chová jako brusivo přitlačované rukou. Trvanlivost brusiva je přitom delší než u použití tradičních postupů [19].

Broušení jako dokončovací operace zaručuje nejvyšší přesnost a nejnižší drsnost povrchu obrobeneé plochy kompozitního dílce ($R_a=2,5 \mu\text{m}$) [9].

2.5 Dělení

Při dělení kompozitních materiálů se doporučuje používat rozbrusné kotoučové nástroje, kvůli přerезání vyztužujících vláken. Tímto dosáhneme čistého řezu bez delaminace, trhlin nebo jiných vad na konci řezaného materiálu. Kvůli tomuto problému není vhodné použití stříhacích nástrojů, jako např. nůžek nebo kleští, jelikož rozdrťí konce vláken v místě dělení materiálu. Další možnosti dělení materiálu jsou např. frézování, upichování [1].

2.6 Nástroje

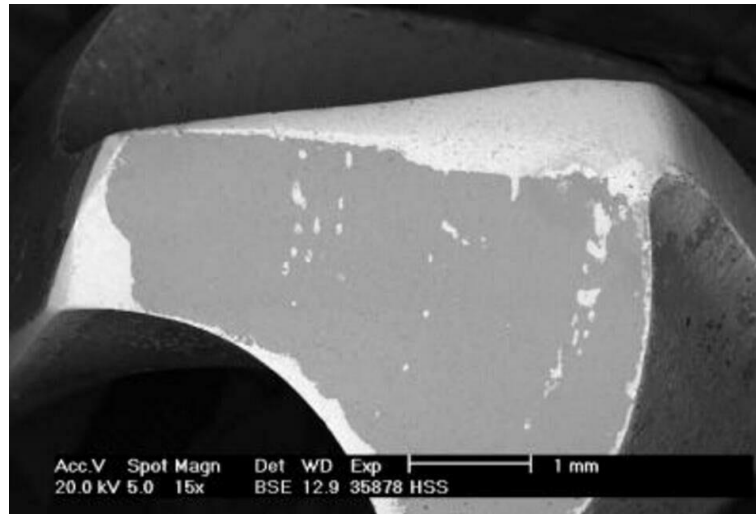
Kompozitní materiály patří do skupiny materiálů se specifickými vlastnostmi, jejichž použití spolu s požadavky na nástroje neustále vzrůstá. Obrábění kompozitních materiálů je obtížné a volba vhodných řezných nástrojů vyžaduje zpravidla selektivní postup a velkou pečlivost [17].

Nejčastěji obráběné kompozitní materiály obsahují vlákna uhlíková, skelná nebo aramidová, která jsou vázána organickým polymerem, epoxidovou nebo fenolovou pryskyřicí. Vzájemnou kombinací matrice a vyztužujících vláken lze dosáhnout rozdílných mechanických vlastností, které je nutno zohlednit při volbě řezného nástroje [17].

Zatímco kompozitní materiály zpevněné uhlíkovými vlákny jsou velmi abrazivní, a tudíž je vyžadován co nejvíce odolný nástrojový materiál, tytéž materiály vyztužené aramidovou tkaninou kladou velké nároky především na správnou geometrii břitu, protože jsou měkké a lehce se poddají tlaku nástroje. Pro tyto materiály byly vyvinuty speciální nástroje, které vlákno nejprve předeprnou a potom čistě oddělí a odstraní z pracovního prostoru [17].

Kromě nástroje samotného mají hlavní vliv na kvalitu obrábění kompozitních materiálů i rezné podmínky. Záleží na správně zvoleném posuvu, na otáčkách a na zajištění dokonalého řezu, to znamená na zamezení tření nástroje o povrch obrobku. Neřeže-li nástroj správně, dochází k delaminaci materiálu nebo k lomu vláken [17].

Vyztužující vlákna působí na nástroj silným abrazivním účinkem a jsou hlavní příčinou velmi intenzivního opotřebení nástroje. Proto je nutné pro dosažení vyšší trvanlivosti volit nástrojové materiály s vysokou odolností vůči otěru (např. povlakované SK, diamant). Vyztužené kompozity lze obrábět na běžných kovoobráběcích nebo i dřevoobráběcích strojích. Na rozdíl od obvykle obráběných kovů a kovových slitin je však třeba při navrhování rezných podmínek více přihlížet k následujícím zvláštnostem těchto materiálů. [17].



Obr. 28 Mikroskopický pohled na rezný nástroj z rychlořezné oceli, bez povlaku, $VB=1,33$ mm [17].

Vyztužující vlákna působí na nástroj silným abrazivním účinkem (obr. 28) a jsou hlavní příčinou velmi intenzivního opotřebení nástroje. Proto je nutné pro dosažení vyšší trvanlivosti volit nástrojové materiály s vysokou odolností vůči otěru (např. povlakované SK, diamant) [17].

Hodnoty koeficientu tření mezi obráběným kompozitním materiálem a hřbetem nástroje nebo třískou a čelem nástroje (0,15 - 0,30) jsou pro všechny nejužívanější nástrojové materiály (rychlořezné oceli, SK, reznou keramiku, diamant) nižší než při obrábění kovových materiálů. Hodnoty měrných rezných sil jsou mnohem nižší než při obrábění kovů - tím se snižují rezné síly a potřebný příkon obráběcího stroje [17].

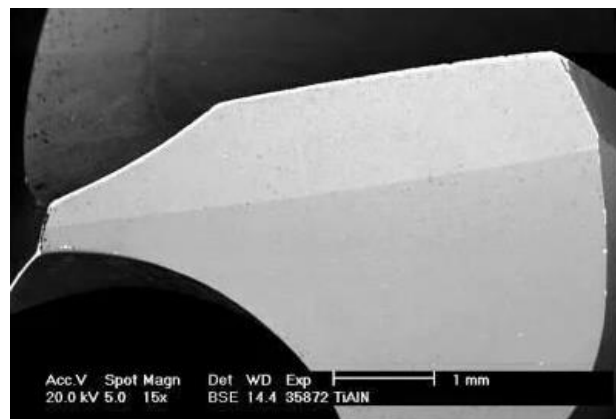
Volba řezných nástrojů

Pro obrábění kompozitních materiálů lze sice použít nástroje z rychlořezných ocelí, při jejich použití je však nutné očekávat nižší hodnoty trvanlivosti a s tím spojenou častou výměnu a přestřování nástroje, a to především z následujících důvod [17]:

- **Rychlořezné oceli** jsou ve srovnání s jinými řeznými materiály charakteristické nižšími hodnotami tvrdosti, a mají tudíž i menší schopnost odolávat abrazivnímu působení vyztužujících vláken [17].
- Většina kompozitních materiálů má velmi nízkou tepelnou vodivost (výjimku tvoří kompozity s kovovou maticí), proto vzniklé teplo musí být ze zóny řezu v maximální míře odvedeno nástrojem. Tepelná vodivost rychlořezných ocelí je však relativně nízká, třikrát až čtyřikrát nižší než u slinutých karbidů, a vysoké teploty v oblasti ostří nástroje způsobují špatnou trvanlivost břitu [17].
- Nejčastějším způsobem, jak zvýšit odolnost proti opotřebení a tím i trvanlivost nástrojů z rychlořezných ocelí, je aplikace různých otěruvzdorných povlaků. I v tomto případě je však intenzita opotřebení poměrně vysoká [17].

Nástroje ze slinutých karbidů dosahují lepších výsledků v porovnání s nástroji z rychlořezných ocelí. Mechanické vlastnosti slinutých karbidů závisí zejména na obsahu pojiva (nejčastěji Co) a velikosti zrna karbidické fáze. Tvrdost se zvyšuje s vyšším podílem a jemnějším zrnem fáze karbidické, naopak velká zrna a větší podíl pojiva zvyšují houževnatost slinutého karbidu. Proto jsou pro účely obrábění kompozitních materiálů vyztužených abrazivními vlákny (uhlíková, skelná) vhodné především jemnozrné slinuté karbidy, které mají vyšší hodnoty tvrdosti, takže lépe odolávají opotřebení [17].

Pro zvýšení trvanlivosti jsou tyto nástroje navíc pokryty různými druhy povlaků na bázi karbidů, nitridů, oxidů nebo diamantu. Nižší hodnoty houževnatosti nástroje je pak nutné zohlednit při procesu obrábění, zejména pokud dochází k dynamickému zatížení břitu. Ukázka opotřebení hlavního hřbetu monolitního karbidového vrtáku s povlakem TiN + TiAlN je uvedena na obr. 29 [17].



Obr. 29 Mikroskopický pohled na řezný nástroj ze slinutého karbidu, povlak TiN+TiAlN, VB = 0,12 mm [17].

Nejllepších výsledků při obrábění kompozitních materiálů dosahují **nástroje z polykrystalického diamantu**. Především vysoká tvrdost, která umožňuje odolávat vysokému abrazivnímu účinku vláken, a vynikající tepelná vodivost, která zaručuje rychlý odvod tepla z oblasti řezu, jsou předpokladem pro vysokou kvalitu obrobeného povrchu a dlouhou trvanlivost nástroje. Trvanlivost je mnohonásobně vyšší (až stonásobně) než u nástrojů ze slinitých karbidů [17].

Ostrý břit, který vydrží po dlouhou dobu obrábění, poskytuje chladnější řez a snižuje tvorbu delaminace, protože při nadměrném opotřebení břitu se vlákna spíše odlamují, místo aby byla běžně řezána. Vhodnou aplikací nástrojů z PKD při obrábění kompozitních materiálů dochází ke zvýšení řezných podmínek (zejména řezné rychlosti) a následně produktivity o 50 až 100 % [17].

Nástroje na soustružení

Při soustružení kompozitů je potřebné použít vyhovující nástroj pro zajištění správných řezných podmínek. Nejvíce se setkáváme s nástroji s vyměnitelnými břitovými destičkami. Destičky jsou nejčastěji ze SK nebo SK, které jsou povlakované vrstvou PKD (obr. 30). Pro soustružení jsou nejčastěji využívané nástroje s kladnou geometrií a tvrdým, ostrým břitem, aby byl nástroj schopen rezat silně abrazivně vyztužená vlákna [2].

Při obrábění CFRP je dobré zajistit kontinuální řez karbidickým nástrojem, protože u přerušovaného řezu vzniká vyšší opotřebení. Abychom zvýšili životnost nástroje, je třeba najít vhodný kompromis na úhlu břitu. S rostoucím úhlem hřbetu je nástroj ostřejší, ale je zeslabováno ostří (úhel břitu) a nástroj trpí na vznik lomu. Při rázu může dojít až odštípnutí nebo ulomení části břitu [2].



Obr. 30 VBD povlakované vrstvou PKD [20].

Nástroje na frézování

Problémem, zejména při frézování obvodovým, jsou axiální síly, podporující separaci povrchových vrstev. Proto se doporučuje používat tzv. kompresních fréz, jejichž zuby jsou uspořádány ve šroubovicích opačného směru; tak lze docílit toho, že při práci jsou oba vnější povrchy axiální složkou řezné síly stlačovány k sobě a nebezpečí separace vrstev nehrozí. Představitelem těchto nástrojů jsou frézy CoroMill Plura S215 (obr. 31) nebo frézy vyráběné americkou společností LMT Onsrud LP [13].



Obr. 31 Fréza CoroMill Plura S215 [21].

Součástí výrobní řady CoroMill jsou také nástroje, jako jsou čelní frézy CoroMill 590 nebo stopkové frézy CoroMill 390 využívající břitové destičky s hrotem nebo povlakem z polykrystalického diamantu, které jsou obzvláště účinné v případě kompozitních materiálů s vysokým obsahem uhlíkových vláken [22].

KOMPOZITNÍ FRÉZY YG-1 (obr. 32): YG-1 je uznáván jako největší světový výrobce stopkových fréz, což platí i pro kompozitní frézování. Bylo vyvinuto velké portfolio, které pomáhá koncovým uživatelům vybrat ten správný produkt věnovaný správnému procesu [23].



Obr. 32 Kompozitní frézy YG-1 [23].

Kompozitní stopkové frézy YG-1 se liší od jednoduchých nepovlakovaných „routerů“ pro skelná vlákna až po „routery“ pro dělení třísek, kompresní a finišovací „routery“ a různé kombinace geometrií v závislosti na aplikacích. Všechny kompozitní stopkové frézy jsou vyráběny s použitím YG-1 ve vlastních geometriích zobrazených ze vstupních dat zákazníků s nejlepší surovinou ve své třídě na trhu a špičkovým povlakem, hlavně CVD, pokud je potřeba [23].

Společnost **Seco** nabízí ucelený sortiment monolitních fréz obr. 33 určených pro frézování uhlíkových a sklolaminátových kompozitů a plastů vyztužených uhlíkovým vláknem. Nabídka obsahuje čelní frézy z monolitního karbidu s diamantovým povlakem i nepovlakované a monolitní frézy z polykrystalického diamantu (PKD), které jsou k dispozici s různými geometriemi. Sortiment zahrnuje i monolitní stopkové frézy s pájenými polykrystalickými diamantovými břity. Tato produktová řada obsahuje nástroje optimalizované pro obtížné řezné podmínky v náročných materiálech obrobků [24].



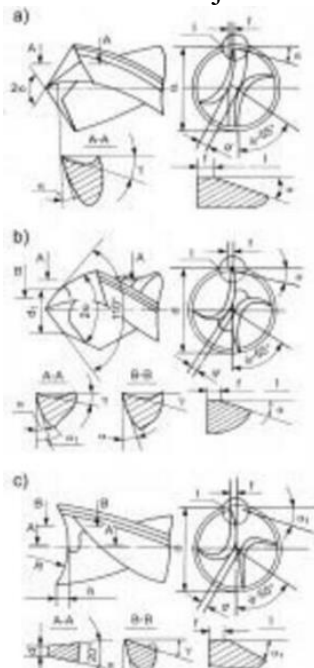
Obr. 33 Fréza na kompozity JC899 od společnosti Seco [24].

Nástroje na vrtání

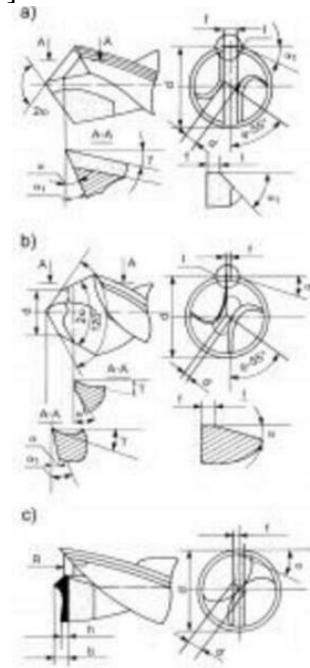
V současné době jsou na trhu k dispozici vrtáky s geometrií poskytující vhodnější rozložení posuvové síly, umožňující vrtání kompozitů bez vzniku delaminace [16].

Velký vliv na proces tvorby třísky, trvanlivost nástroje, přesnost rozměrů, tvaru a drsnost povrchu vyrobené díry mají též geometrické parametry šroubovitého vrtáku. Proto je vhodné před vlastním vrtáním provést kontrolu přesnosti nástroje zaměřenou na průměr, kuželovitost, tloušťku jádra, rozdíly v délkách hlavních ostří a velikost příčného ostří. Důležitou roli hrají i úhly nastavení obou hlavních ostří a jejich rozdíly a úhly hřbetu obou břitů a jejich rozdíly [3].

Doporučené geometrie vrtáků z rychlořezných ocelí pro obrábění kompozitních materiálů jsou uvedeny na obr. 34a. U klasických šroubovitých vrtáků s běžně ostřenou špičkou (obr. 34a, obr. 35a) by velikost příčného ostří měla být pokud možno co nejmenší. Příčné ostří má negativní vliv na proces řezání, protože v důsledku nízké řezné rychlosti a negativního úhlu čela materiál spíše vytlačuje než reže. To má za následek silné zvýšení posuvové složky řezné síly a následnou delaminaci materiálu. Z tohoto důvodu jsou pro obrábění kompozitů v široké míře používány především vrtáky se speciální úpravou ostří (obr. 34c, obr. 35c), které výrazným způsobem zabraňují tvorbě nežádoucí delaminace [17].



Obr. 34 Doporučené geometrie vrtáků z rychlořezných ocelí [17].



Obr. 35 Doporučené geometrie vrtáků a) slinutý karbid b) monolitní SK, c) připájená břitová destička [17].

Pro vrtání děr v součástech vyrobených z vláknových kompozitů lze použít klasické šroubovitě vrtáky z rychlořezných ocelí bez povlaků nebo s povrchovými otěruvzdornými povlaky. V obou případech je ale nutné očekávat nízkou trvanlivost a s ní spojenou častou výměnou a přestřování nástroje, samozřejmě ve větší míře u nepovlakovaných vrtáků [9].

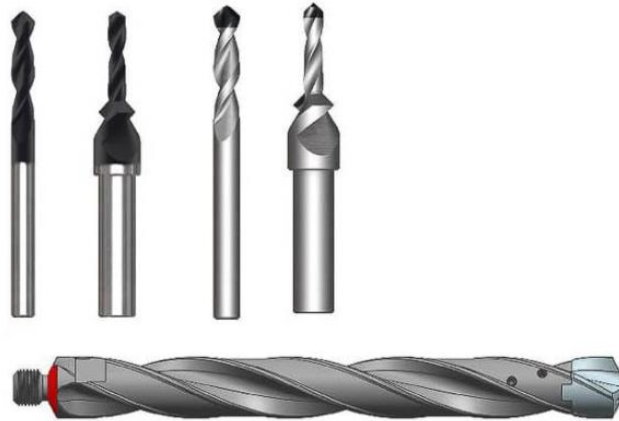
Vzhledem k vyšší odolnosti proti opotřebení se pro vrtání vláknově vyztužených kompozitů hodí vrtáky ze slinutých karbidů. U dražších celokarbidových, monolitních nástrojů, které mohou být vzhledem k velikosti pracovní části mnohokrát přestřovány, lze očekávat velmi dlouhou životnost. Pro zvýšení trvanlivosti jsou tyto nástroje navíc pokryty různými druhy povlaků na bázi karbidů, nitridů, oxidů nebo diamantu. Levnější nástroje s pájenými břitovými destičkami ze slinutých karbidů vykazují menší životnost, protože počet ostření je omezen velikostí samotné destičky. Nejvyšší trvanlivost a tedy i životnost dosahují při vrtání kompozitních materiálů vrtáky s pájenými břitovými destičkami z polykrystalického diamantu [9].

Použití kompozitních materiálů a CFRP (carbon fiber reinforced plastics) je dnes poměrně časté a jejich tržní podíl roste. Oddělení vývoje společnosti **ISCAR** neustále přináší inovované řady rezných nástrojů, které jsou speciálně navrženy pro efektivní práci s kompozitními materiály. Tyto pokrokové produkty poskytují zákazníkům velmi efektivní řešení pro výrobu týkající se těchto náročných materiálů. Vrtáky pro kompozitní materiály značky ISCAR (obr. 36) [25].



Obr. 36 Vrtáky pro kompozitní materiály značky ISCAR [26].

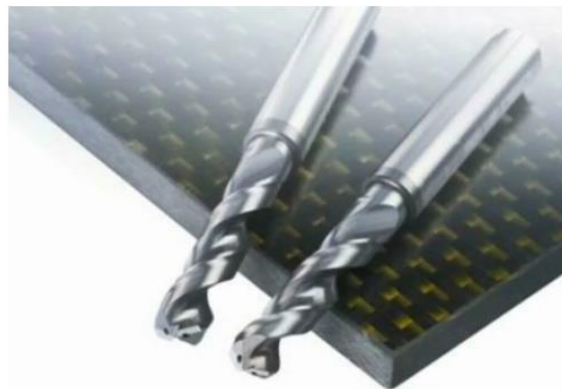
KOMPOZITNÍ VRTÁKY YG-1 (obr. 37): od jednoduchého nepotahovaného karbidu až po vysoce výkonné vrtáky PKD a produkty s diamantovým povlakem CVD, YG-1 má nejlepší odborné znalosti přinášející správné geometrie nástrojů, které dosahují optimálních nákladů na zhotovení otvoru [23].



Obr. 37 Kompozitní vrtáky YG-1 [23].

Mimo jiné lze využít také některou z geometrií nových vrtáků CoroDrill z nabídky firmy **Sandvik Coromant**. Vrtáky CoroDrill 854 a 856 (obr. 38) byly vyvinuty tak, aby splňovaly mimořádně tvrdé požadavky na obrábění nejnovějších CFRP materiálů a vrstevnatých kompozitů s hliníkovou fólií a vyznačují se dlouhou a konzistentní životností umožňující opakované dodržení přísných tolerancí. Geometrický tvar vrtáku CoroDrill 854 je navržen tak, aby se u materiálů s vysokým obsahem vláken zvýšila kvalita díry na vstupu i na výstupu z obrobku [27].

Z hlediska dosažení optimální kvality, spolehlivosti obráběcího procesu a hospodárnosti nákladů na vyrobenou díru má zásadní význam správná volba vrtáku. Z tohoto pohledu nachází vrták CoroDrill 854, s geometrií opatřenou ostrými výběžky, uplatnění v případech, kdy je problémem třepení a vyštípnutí, zatímco použití vrtáku CoroDrill 856 je vhodné, pokud u materiálů s velkým podílem polymerní matrice dochází k delaminaci - hlavní podíl na tom má jeho geometrie s lomeným ostřím, která usnadňuje klidný vstup do obráběného materiálu a výstup z něj [27].



Obr. 38 Vrtáky CoroDrill 854 a CoroDrill 856 firmy Sandvik Coromant [27].

2.7 Teplota

Pro obrábění je nezbytné respektovat teplotní omezení matrice – při překročení teploty 80°C (výjimečně 150°C) dochází k její degradaci a výraznému zhoršení mechanických vlastností kompozitu. Tato skutečnost je důležitá tím spíše, že kompozity vykazují nízkou tepelnou vodivost, která činí zhruba 0,2–0,4 W/m.K oproti oceli, kde jsou běžné hodnoty 52–53 W/m.K, a tudíž je nutno se vyvarovat místního přehřátí [13].

Proto je třeba volit takové řezné podmínky, aby nebyla překročena tzv. kritická teplota, kdy dochází k degradaci pryskyřičné matrice a na obrobeném povrchu se začnou objevovat spálené oblasti [17].

Velmi nízká tepelná vodivost obráběného materiálu způsobuje, že vzniklé teplo přechází do obráběného materiálu a třísky pouze v zanedbatelném rozsahu, a musí být tedy v maximální míře odvedeno nástrojem, případně řeznou kapalinou (pokud vůbec může být použita) [17].

Porovnání odvádění tepla při obrábění kompozitních materiálů a oceli je vidět v tab. 17.

Tab. 17 Odvod tepla při obrábění kompozitních materiálů v porovnání s ocelí v % [3].

Odvod tepla	Ocel	Termoplast	Reaktoplast	FRP
Třískou	75	50÷57	2÷3	5÷10
Obrobkem	20÷22	15÷25	5÷8	5÷15
Nástrojem	3÷5	20÷25	80÷90	70÷80
Prostředím	(3÷5)% Při suchém prostředí			
FRP- kompozity vyztužené uhlíkovými nebo skelnými vlákny				

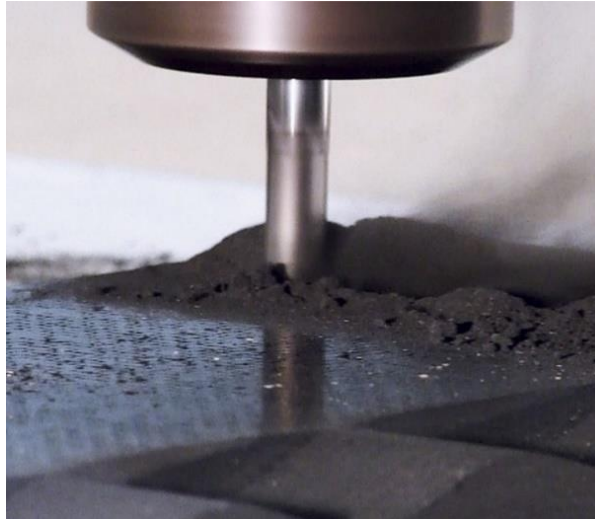
Chlazení při obrábění kompozitu je ve většině případů nemožné z důvodu nasáklivosti materiálu. Volba obrábění za mokra nebo za sucha se provádí na základě operace obrábění. Použití chladicí kapaliny může také pomoci při odvádění prachu. Kompozitní materiály jako například karbon jsou velmi porézní. Olejové emulze zasychají a zůstávají v pórech kompozitu a následné lepení materiálů není možné. Pokud obráběcí proces vyžaduje chlazení, je možné použít chlazení vodou, speciálními roztoky nebo vzduchem. Kompozity s kovovou maticí je nutné při obrábění chladit. U většiny kompozitních materiálů je upřednostňována jako chladicí kapalina čistá voda. Pokud je důležitá kontrola rzi, lze přidat malé množství inhibitoru rzi (1-2%). [2].

Několikanásobná tepelná roztažnost proti kovovým materiálům (hodnota tepelné roztažnosti kompozitů klesá s rostoucím obsahem skelných vláken) způsobuje poměrně velkou změnu rozměrů vyráběné součásti během vlastního procesu obrábění nebo i po jeho skončení. Tuto skutečnost je třeba vzít v úvahu při výrobě i měření přesněji lícovaných součástí [9].

2.8 Tříška

Při obrábění vyztužených kompozitů se tvoří drobné částičky třísky (zejména z vyztužujících vláken), které se ve formě prachu šíří z místa řezu do okolí. To vyžaduje aplikovat výkonná odsávací zařízení, aby nebyly překročeny zdravotní a hygienické limity pracovního prostředí [17].

Odsávací zařízení musí být v případě obrábění kompozitů velice výkonná, jelikož může docházet k víření prachu v okolí. Při obrábění karbonu (obr. 39) je odsávání důležité kvůli abrazivním účinkům uhlíkového prachu na styčných plochách stroje jako např. lože nebo jiné posuvné plochy a také kvůli elektrické vodivosti. Prach z karbonu dokáže v elektroinstalaci zapříčinit zkrat obráběcího stroje. U sklolaminátů, kde se prach šíří z místa řezu do prostoru je důležité odsávat, protože při vdechnutí skelných vláken se částice mohou držet v těle člověka i několik let [1].



Obr. 39 Frézování karbonu a vzniklý uhlíkový prach [28].

2.9 Nekonvenční metody obrábění

Pod pojmem nekonvenční metody obrábění si lze představit soubor technologií, které nevyužívají pro dělení materiálu a jeho obrábění klasických nástrojů, ale procesy zakládající se na přírodních zákonitostech o erozi materiálu. Tyto metody jsou také charakteristické tím, že nepoužívají mechanické práce pro úběr materiálu, tedy nevzniká tříška [29].

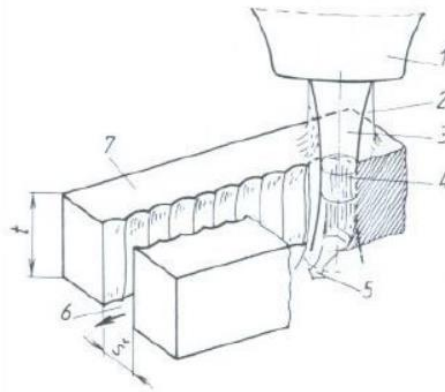
Při klasickém způsobu třískového obrábění je hodnota obrobiteľnosti daného materiálu přesně dána limitujícími hodnotami od mechanických vlastností, jako je pevnost nebo tvrdost apod., daného materiálu. U nekonvenčních metod obrábění je hodnota obrobiteľnosti materiálu omezena hlavně fyzikálními vlastnostmi materiálu, jako jsou tepelná vodivost, elektrická vodivost, elektroerozivní odolnost, teplota tavení apod., a také chemickým složením [29].

Důvodem vzniku nekonvenčních metod obrábění byl rozvoj vojenského, leteckého a kosmického průmyslu. Díky zvyšujícím se požadavkům v těchto odvětvích bylo nutné obrábět těžkoobrobitelné materiály třískovými metodami, s důrazem na jejich tvarovou a rozměrovou přesnost [29].

Vláknové kompozity s polymerní maticí není možné obrábět některými metodami pracujícími za vysokých teplot z důvodů jejich malé tepelné odolnosti. Vzhledem k nasáklivosti kompozitů a následnému snížení vlastností je obrábění kompozitů chemickými způsoby značně obtížné. Netradičními metodami se obrábějí zejména materiály s kovovou nebo keramickou maticí anebo sendvičové kompozity [29].

2.10 Řezání laserem

Odběr materiálu působí úzký svazek laserového záření o vysoké hustotě energie obr. 40 (příkon typicky několik kW). Odebíraný materiál se přitom taví a vyfukuje, pálí nebo sublimuje. Užívá se k přesnému řezání a vyřezávání kovů i jiných materiálů, umožňuje však na stejném stroji i jednostranný odběr materiálu, například gravírování. U oceli a železa lze řezat plechy až do 50 mm tloušťky, rychlost řezu až 10 m/min, u plechů pod 1 mm až 250 m/min. Šířka řezu u tenkých plechů 0,1–0,8 mm. Přesnost řezání je zhruba 0,05–0,5 mm, řez je velmi čistý, takže často nevyžaduje další obrábění. Laserové řezání rozlišujeme vláknové (fiber) nebo CO₂ [30].



Obr. 40 1- řezací tryska, 2- asistentní plyn, 3- paprsek laseru, 4- poloha ohniska zaostření paprsku laseru, 5- odtavený materiál, 6- řezná spára, 7- obrobek [31].

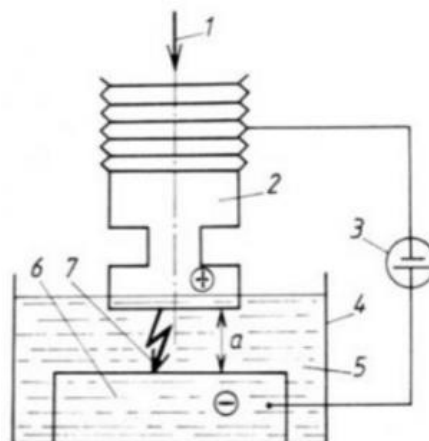
Při laserovém řezání vznikají tepelné účinky, které významně ovlivňují vhodnost použití. Problém může nastat u uhlíkových vláken kvůli dobré tepelné vodivosti, kde se může vytvořit zuhelnatělý nebo roztavený okraj nebo tepelně ovlivněné oblasti obklopující řez [2].

2.11 Elektroerozivní obrábění

Základem tohoto elektricko-tepelného způsobu úběru materiálu je fyzikální jev, obecně označovaný jako elektroeroze [29].

Fyzikální pochod úběru materiálu elektrickým výbojem je velmi komplexní jev. Jak je zřejmé obr. 41, obrábění probíhá na dvou elektrodách při ponoření do pracovního média. Tímto médiem je dielektrikum, tj. kapalina s vysokým elektrickým odporem. Vznik výboje mezi elektrodami je vyvolán přivedením napětí na elektrody. Výše tohoto napětí závisí především na následujících faktorech [29]:

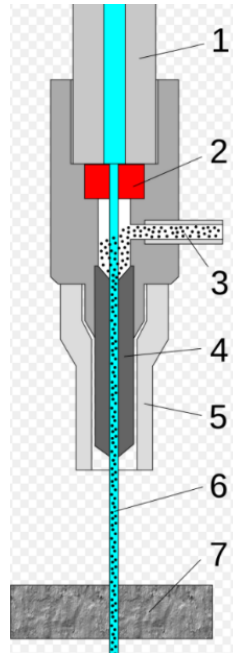
- vzdálenosti mezi elektrodami,
- vodivostí dielektrické kapaliny,
- znečištění dielektrika.



Obr. 41- posuv nástrojové elektrody, 2- nástrojová elektroda, 3- generátor, 4- pracovní vana, 5- dielektrikum, 6- obrobek, 7- elektrický výboj [29].

2.12 Řezání vodním paprskem

Podstatou dělení materiálů je obrušování děleného materiálu tlakem vodního paprsku obr. 42. Tento proces je v podstatě stejný jako vodní eroze, ale značně zrychlený a soustředěný do jednoho místa. Řezání probíhá nejčastěji na CNC řízených stolech. Pracovní tlak vody se pohybuje v rozmezí 2000 – 6200 bar. Tlakovým zdrojem jsou speciální vysokotlaká čerpadla, která se liší příkonem a průtokem vody. Paprsek vzniká v řezací hlavě zakončené řezací tryskou. Při zpracování měkkých materiálů se používá čistý vodní paprsek, pro ostatní případy je třeba použít abrazivní paprsek [32].



Obr. 42 Řezání vodním paprskem. 1-vysokotlaký přívod vody, 2-rubínová nebo diamantová tryska, 3-abrazivo, 4-směšovací trubička, 5-držák, 6-paprsek, 7-materiál [32].

3 APLIKACE NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE ABRAZIVNÍHO PAPRSKU NA KONKRÉTNÍ KOMPOZITNÍ MATERIÁL

Tato kapitola byla zpracována ve spolupráci s firmami **MSR Engines group a.s.**, Střelice 864 a **AWAC spol. s.r.o.**, sídlící na adrese Maříkova 3, Brno. Společnost MSR Engines group a.s spolupracuje se společností AWAC spol. s.r.o. při řezání kompozitů. Tato kapitola rozebírá řezání součásti padformátoru obr. 43. Padformátor je spojovací mezikus mezi vázáním a motorovým surfovacím prknem. Kvůli nárokům na vysoké mechanické vlastnosti a nízkou hmotnost je padformátor vyráběn z prepregu, který se skládá z uhlíkových vláken a epoxidové pryskyřice.



Obr. 43 Vrchní a spodní pohled na padformátor

Společnost **AWAC, spol. s.r.o.**, byla založena v říjnu 1990. Hlavní činností bylo poskytování služeb v té době málo známou metodou dělení materiálů vysokotlakým vodním paprskem. AWAC, spol. s r.o. se od samého začátku soustředí na kvalitu a spolehlivost prováděných služeb. V současné době provádí i 3D řezání s eliminací úkosů, což je jeden z nejnovějších trendů u řezání vodním paprskem. V počtu řezacích strojů a vysokotlakých vodních čerpadel patří mezi největší komerční řezárny vodním paprskem v ČR. Provádí montáže a servis řezacích pracovišť. Dodává náhradní díly a spotřební materiál pro řezací pracoviště. Také je dodavatelem CNC strojů MicroStep na dělení materiálu laserem, plazmou, vodním paprskem, autogenem a vysokootáčkovým vřetenem [33].

Příběh společnosti **MSR Engines group a.s.** se začal psát jejím založením v roce 2005. Následně tato firma dělala od motorů do motokár a motorek přes RedBull AIR race se této firmě podařilo dostat až k vlastnímu produktu: Motorovému surfu. Jihomoravská firma JetSurf je pro většinu Čechů stále neznámá. Přitom vyvinula unikátní motorové surfy, se kterými nyní dobývá svět. Ročně jich z linek ve Střelicích u Brna sjede 1200 kusů.

K pyšným vlastníkům prken se spalovacím motorem se řadí například jezdec Formule 1 Lewis Hamilton, dnes již bývalý šéf soutěže F1 Bernie Ecclestone nebo zpěvák Andrea Bocelli [34; 35].

3.1 Stroj na řezání vodním paprskem

Architektura strojů na řezání vodním paprskem se odlišuje od výrobce k výrobcu. Základní koncepce jednotlivých přístrojů (obr. 44) tvořící stroj pro řezání vodním paprskem však zůstává u každého zařízení v podstatě identická [4].

K základním přístrojům tvořící stroj na řezání vodním paprskem patří [4]:

- hydraulická jednotka s čerpadlem a multiplikátorem,
- akumulátor tlaku,
- filtrační jednotka,
- vysokotlaké potrubí,
- řezací hlavice,
- nádoba na zachytávání vody (lapač vodního paprsku),
- systém dávkování abraziva,
- manipulační systém.

Firma AWAC, spol. s.r.o. disponuje pěti stroji pracující s technologií řezání vodním paprskem. Čtyři stroje jsou od firmy pro 2D řezání a to MicroStep AquaCut 1501. 20 W, 4001. 25 WW, 4001. 20WW, 3001. 40WW a jeden stroj umožňující 3D řezání, Mach 4c.

Ve společnosti dokážou řezat materiály v tloušťkách od 0,1 mm až 250 mm s maximálním rozměrem polotvaru 3000 x 6000 mm [33].

Samotné řezání padformátorů proběhlo na stroji MicroStep AquaCut 4001.25WW (obr. 45), který umožňuje pouze 2D řezání. Stroj je vybaven dvěma řezacími hlavami a stolem o rozměrech 4000 x 2500 mm. Díky dvěma řezacím hlavám tento stroj nabízí vyšší produktivitu.

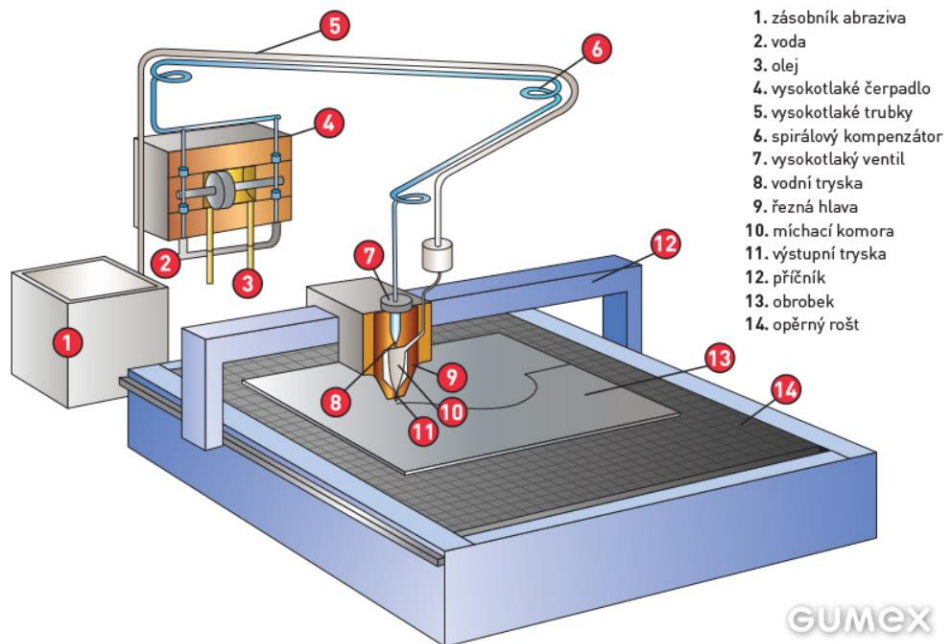


Obr. 45 Stroj na řezání vodním paprskem MicroStep AquaCut 4001.25WW.

Technické parametry stroje jsou uvedeny v tab. 18.

Tab. 18 Technické parametry stroje Stroj MicroStep AquaCut 4001.25WW.

Firma	MicroStep Group
Typ	AquaCut 4001.25WW
Rok výroby	2007
Výkon	3 kW
Síť	400 V 50 Hz
Zdvih	150 mm
Pracovní tlak	3826 bar
Rozměry stolu	6000 x 2500 mm
Počet hlav	2



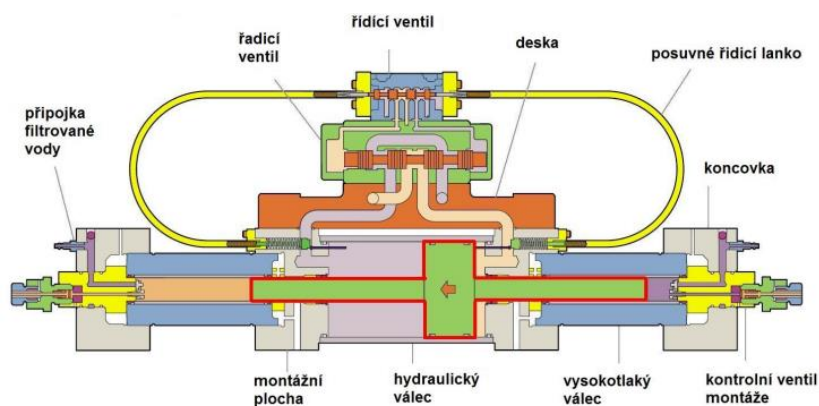
Obr. 44 Schéma zařízení vodního paprsku [36].

3.1.1 Vysokotlaká čerpadla

V současné době se využívají dva typy generátorů vysokého tlaku vodního paprsku. Pro vysoké tlaky se používá zařízení s multiplikátorem (až 650 MPa) a pro nízké a střední tlaky (do 300 MPa) se používá triplexová pístová čerpadla [37].

a) Multiplikátor

Multiplikátor obr. 46 slouží k převedení tlaku oleje čerpadla na vysoký tlak vody. Ke zvýšení tlaku se využívají rozdílně velké pracovní plochy pístu. Multiplikátor je tvořen dvěma okruhy. První je nízkotlaký, do kterého se přivádí olej do oblasti pístu na první plochu. Druhý okruh pracuje s vodou na druhé straně pístu s druhou plochou. Tlak oleje na pístu způsobuje tolikrát větší tlak vody, kolikrát je menší druhá plocha ku první [37].



Obr. 46 Schéma multiplikátoru [38].

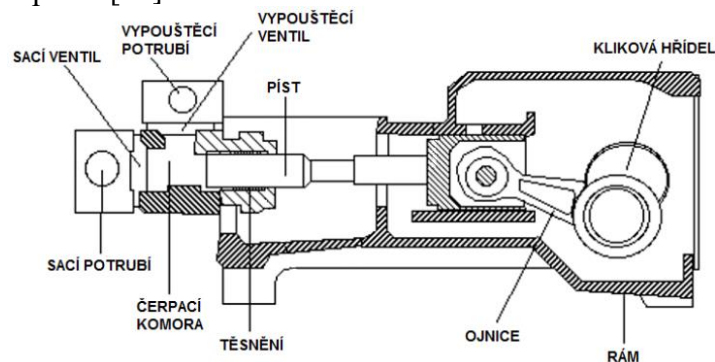
Čerpadlo společnosti ACCUSTREAM AS-6075 využívané v AWACU obr 47.



Obr. 47 Čerpadlo ACCUSTREAM AS-6075.

b) Pístová čerpadla

Hlavními součástmi u plunžrových (pístových) čerpadel je válec a píst, který koná přímočaře vratný pohyb. V hlavě válce jsou instalovány sací a výtlačné ventily. Na obr. 48. je zobrazeno schéma pístového čerpadla [39].

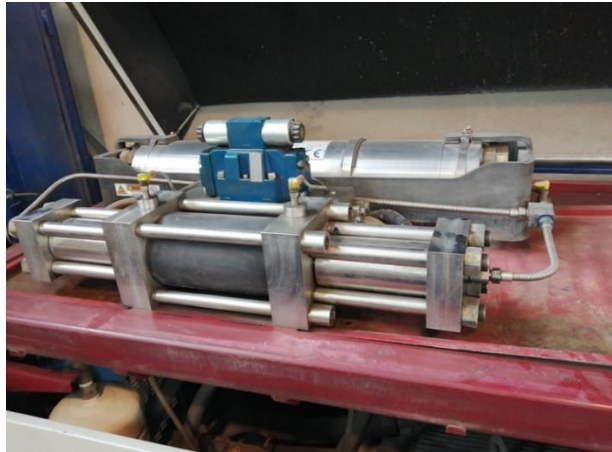


Obr. 48 Schéma pístového čerpadla [39].

Při sacím zdvihu se píst (plunžr) posouvá směrem k dolní úvrati a válec se přes otevřený sací ventil plní vodou. Následuje reverzní pohyb pístu a stoupá tlak ve válci. Ventily pro přívod vody se uzavřou a voda je vysokým tlakem vytlačena do vysokotlakého potrubí přes otevřené výtlačné ventily. Výhodou tohoto zařízení je jeho rozměrová nenáročnost [39].

3.1.2 Akumulátor tlaku

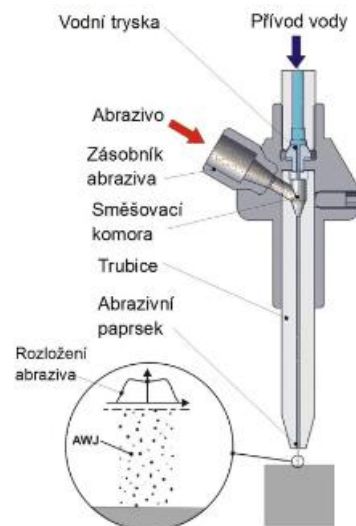
Zařízení používané pro tlumení rázů v kapalině, které je vyvolané vznikem pulzování vodního proudu, jako důsledek stlačené vody se nazývá akumulátor tlaku. Akumulátor (obr. 49.) je dutá tlaková nádoba o daném objemu, ve kterém je voda stlačena na požadovaný tlak. Po dosažení vyrovnaného tlaku se voda dostává z akumulátoru do vysokotlakého potrubí. Úlohou akumulátoru je tedy udržovat stejnou rychlost a stejný tlak vysokotlakého proudu v systému [39].



Obr. 49 Ukázka multiplikátoru (vpředu) a akumulátoru (vzadu) ve firmě AWAC.

3.1.3 Řezací hlava

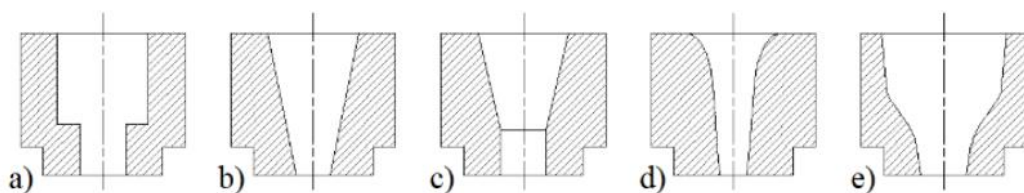
Jedna z nejdůležitějších a základních věcí pro řezání vodním paprskem je řezací hlava na obr. 50. Umožňuje převádět vysoký tlak kapaliny na řezný nástroj, který ho potom převádí na vysokorychlostní tenký vodní paprsek. Řezací hlava taky ovlivňuje tvar vodního paprsku, kvalitu řezu a dávají výslednou podobu paprsku a jeho vlastnostem. Závisí na nich také tvar, kvalita a přesnost řezu [4].



Obr. 50 Schéma řezací hlavy [40].

3.1.4 Trysky

Abrazivní tryska obr. 51. Určuje výslednou podobu vodního paprsku, jenž vystupuje z řezací hlavy. Abrazivní tryska vyžaduje dobrou otěruvzdornost [4].



Obr. 51 Tvary vodních dýz a) válcová, b) kuželové, c) kombinovaná, d) kónická, e) složená (bikubická) [4].

Tryska je většinou vyrobena ze slinutého karbidu, korundu, syntetického diamantu nebo safíru. Diamantové trysky mají obvykle až desetinásobně vyšší životnost než trysky z rubínu nebo safíru, tato vlastnost je však vykoupená desetinásobnou cenou. Na životnost trysek má nejvíce vliv voda abrazivo a počet cyklů [4].

3.1.5 Pracovní kapalina

Pracovní kapalina, která se používá při řezání vodním paprskem musí mít tyto vlastnosti: zdravotní nezávadnost, nízká cena, nízká viskozita, malé ovlivnění součástí korozí. Voda musí být vhodně upravena. Celý vysokotlaký systém musí mít ochranu před nečistotami a příměsemi, vyskytující se v běžné vodě. Využívající úpravy vody jsou filtrace, změkčování a deionizace [3].

Filtrace slouží k oddělení pevných látek z kapaliny. Filtr je tvořen čtyřmi vrstvami, které jsou vymyšleny tak, že vrchní vrstva zachytává největší částice, spodní která má síto a chytá malé částice dosahující několika mikrometrů [29].

Změkčování se uplatňuje jako přípravná část, poté se provádí deionizace nebo reverzní osmóza. Podle obsahu vápníku a hořčíku se udává tvrdost vody. Smysl je takový, že voda prochází přes zařízení, které má v sobě nádržky s pryskyřicí. Pryskyřicová zrnka na sebe vážou hořčík a vápník a takto dochází k změkčování vody. Deionizace je složitější verze změkčování [4].

3.1.6 Abrazivum

Vodní paprsek bez příměsí abraziva je efektivní pouze pro velmi měkké materiály, jako jsou např. pryže nebo potravinářské výrobky. Přidáním abraziva se výrazně zvyšuje řezací schopnost paprsku a umožňuje proniknout i velmi tvrdými materiály, mezi které patří např. keramika [41].

Mezi nejčastěji používané abrazivní materiály patří [4]:

- granát – nejčastěji používaný, vyšší cena, vyšší účinek a opotřebení trysky,
- křemičitý písek, nízká cena, nižší účinek a opotřebení trysky, nevhodný pro recyklaci,
- oxid hlinitý (Al_2O_3),
- olivín,
- ocelové nebo skleněné kuličky.

Obr. 52 ukázka používaných abraziv.



Obr. 52 Používané druhy abraziv (olivín, oxid hlinitý, granát, skleněné kuličky, ocelové kuličky) [42].

Faktory zohledněné při výběru abraziva [29]:

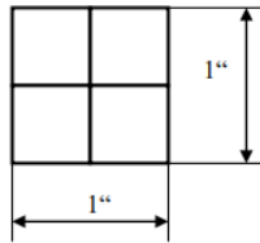
Tvrdość abraziva – vysoká tvrdość napomáhá efektivitě řezu, ale dochází k rychlému opotřebení trysky [29],

Velikost abrazivních zrn čím je zrno menší, tím je dosaženo kvalitnějších povrchů, ale i delšího času potřebného pro řezání materiálu. Velikost zrna se udává v jednotkách MESH, což označuje počet ok síta na délce jednoho palce. Na obr. 53 je zobrazen příklad vyhodnocení jednotky MESH [29],

Tvar abrazivních zrn se vyznačuje kruhovostí a kulatostí. Kulatější zrna mají vliv na vyšší jakost povrchu na úkor hloubky řezu [29],

Ekologičnost abraziva splnění bezpečnostních požadavků a požadavků na zdravotní nezávadnost [29],

Cena abraziva.



Obr. 53 Hodnota mesh = 4 [43].

Zrnitost (mesh) popisuje počet ok síta na 1“, kterým zrno propadne. Standardně se používají zrna o zrnitosti mesh = 80 – 120, to odpovídá příčnému rozměru zrna cca 0,15 mm [43].

Náklady na abrazivo zaujímají okolo 50% z celkových nákladů při řezání hydroabrazivním vodním paprskem. Proto mnoho společností abrazivo recykluje pomocí recyklačních zařízení. Pomocí recyklování lze znovu využít až 50% abraziva. Při řezání pomocí recyklovaného abraziva však produktivita řezání klesá o 15 až 20% [4].

Ve společnosti AWAC spol. s.r.o. využívají jako abrazivo indický granát, MESH 80. Recyklace abraziva se v této firmě neprovádí. Vyváží se na skládku nebo dále prodává jiným firmám pro recyklaci.

3.2 Materiál padformátoru

Jako používaný materiál k výrobě padformátorů, kvůli dosažení dobrých mechanických vlastností a zároveň nízké hmotnosti se používá prepreg. Prepreg používaný u naší součásti padformátoru se skládá z uhlíkového vlákna 12k, kepr 2/2 a epoxidové pryskyřice ER 38 UV.

Prepregy jsou polotovary k výrobě vláknových kompozitů. Jako každý kompozit tak i polotovar prepreg se skládá z výtzuže a matrice (pojivo). Prepregy jsou ploché útvary požadovaného tvaru a tloušťky vyráběné kladením jednotlivých vrstev na sebe do forem. Dotvarují a dotvrdí se vlivem tepla a tlaku, u termoplastických bez vytvrzení [3].

Hlavní složkou je výztuž předimpregnovaná částečně vytvrzenými pryskyřicemi. Na výztuže se používají textilní materiály, zejména skleněná, uhlíková a aramidová vlákna. K impregnaci prepregů se nejčastěji používají nenasyčené polyesterové pryskyřice, vinylové a epoxidové pryskyřice. Hlavní výhody prepregů jsou vysoký podíl vláknové výztuže, stejnoměrnost a hladkost hotových dílů, které souvisejí s předem definovatelným a přesným uložením výztuže. Vyrobené kompozitní materiály jsou tepelně odolné, vysoce pevné, extrémně lehké a tuhé [44].

Z prepregů se vyrábí především kompozitní díly pro letectví a kosmonautiku. Známé jsou také technicky náročné produkty jako radarové dómy, náběhové a brzdové klapky, kryty komunikačních přístrojů a turbin aj [44].

Prepreg padformátoru

Uhlíkové vlákno 12k, kepr 2/2 600 g/m², úhel vlákna 90°.

Používá se u: Vysokopevnostních laminátů, vysokopevnostních povlaky / sendvičové konstrukce, modelové konstrukce. Jedná se o pevnou síťovinu díky použití jemné příze a vysokému počtu nití. Použití: Stavba lodí, motoristický sport, konstrukce letadel [3].

Parametry uhlíkového vlákna 12k, kepr 2/2 600 g/m², úhel vlákna 90° jsou uvedeny v tab. 19.

Tab. 19 Parametry uhlíkového vlákna 12k, kepr 2/2 600 g/m², úhel vlákna 90° [45].

Plošná hmotnost	600 g/m ² (±5%)
Druh vazby/příze:plátno	Carbon 12K
Počet ok osnova x útek	3,7 x 3,7
Tloušťka	0,85 mm (±10%)
Hustota	1,78 g/m ³
Průměr vlákna	7 μm
Pevnost v tahu	min 4200 Mpa
Modul pružnosti	240 GPa
Teplotní odolnost	3500°C

Keprová vazba obr. 54.



Obr. 54 Keprová vazba [46].

Epoxidové pryskyřice ER 38 UV.

Epoxidové pryskyřice jsou za normální teploty kapalné látky o viskozitě medu. EP se vyznačují zejména dobrými mechanickými vlastnostmi, vysokou rozměrovou stálostí (2-5 % smrštění), chemickou odolností a výbornou adhezí k většině povrchů, což výrobkům propůjčuje možnost zpracování lepením. Výborná adheze k většině povrchů se přínosně projeví také na mezifázi při výrobě kompozitních materiálů [47].

Firma MSR Engines a.s. si nechá vyrábět polotvary obr. 55 o rozměru 520x300x3 mm k řezání padformátorů od externího dodavatele. Na polotvaru byly před vyrobeny zhloubení děr o úhlu 73° a středová díra o průměru 29,68 mm. Tyto polotvary jsou následně dodány k samotnému vyříznutí obrysu dle přílohy 8 do firmy AWAC spol. s.r.o.



Obr. 55 Zpracovávaný polotvar.

3.3 Řezání padformátoru

V této kapitole bude rozebráno řezání abrazivním vodním paprskem součásti padformátoru. Součást byla řezána na stroji AquaCut 4001. 25WW viz. tab. 18, obr. 45. Součást „padformátor“ jako i jiné součásti z kompozitních materiálů pro motorové surfy řeže firma AWAC spol. s.r.o. pro společnost MSR Engines s.r.o. pravidelně.

V této výrobní dávce bylo za úkol vyřezat 64 ks padformátorů obr. 56. Jako polotvar byl dodán prepreg o rozměrech 520x300x3 mm se specifikacemi podle kapitoly 3.2.

Brno 21780	Zákazník: MSR Engines s.r.o. Macek Lubomír	21.04.2022 Havlík Lukáš	Objednávka Došlá: 50801 Objednávka zákaz.09/0000 Obchodní případ č.: REZ 63
Výkres: Padformator horní		Soubor: MSR-padformator_horni-stredici.dwg MSR-padformator_horni-markovani-tuning.CNC MSR-padformator_horni.CNC	Délka řezu: 144,00 Počet ks: 64 Nástřel:
Offset:	Materiál: Karbon	Materiál AWAC/zákazník: Výrobky - bez materiálu AW	Počet ks na desku:
TL.mat: 3	Rychlosti: 1200	Abrazivo: 250	Parametr Doporučeno

Obr. 56 Výrobní list pro část řezání.

Výrobní postup (obr. 57) zahrnoval **programování**, to obnášelo: přenesení vyřezávané kontury součásti, tuto konturu posílá zákazník ve formátu STEP (příloha 8). Kontura je dále nahrána do CAM programu ASPER. Zde probíhá nastavení řezných podmínek (dávkování abraziva, rychlost řezání, výška řezání aj.), programování strategie samotného řezání (dráha řezu, nájezdy, nástřely, výjezdy). U **manipulace** byly započítány časy na nahrání a nastavení programu na řídicím panelu. Nastavení stroje: výměnu trysek, sestavení upínacího systému a manipulaci s polotvarem při řezání (upínání, oddělování vyřezaných součástí od zbytků, uložení součástí a odepnutí zbytkového polotvaru). **Řezání** obsahuje čistý čas řezu stroje. **Omílání** se provádělo na vibračním omílacím zařízení AVALON WGS250. Pomocí vibrační stroje a umělého kameniva ve tvaru pyramid byly padformátory odjehleny. Padformátory se odjehlovaly po cca 20 ks za dobu 15 min.

79	Zákazník: MSR Engines s.r.o. Macek Lubomír	21.04.2022 Havlík Lukáš	Objednávka Došlá: 508014187 Objednávka zákaz.09/000074 Obchodní případ č.: REZ 633805			
Operace	Název	Datum/Čas	Jmeno	Čas (min.)	Stroj	Čárový kód
J-10	Programování		<i>Luky</i>	20,0 0,0 0,0		A727585B
J-20	Manipulace	<i>33+24</i>	<i>PL/S</i>	70,0 0,0 0,0	STUL-BR3	A727586B
J-30	Řezání	<i>105+35</i>	<i>PL/S</i>	0,0 256,0 0,0	STUL-BR3	A727587B
Vodní tryska: 0,012 Abr. tryska: 1,02 Kvalita řezu: 60%-B Čas prog. 250						
J-40	Omílání			0,0 0,0 60,0	OML-BR	A727588B

PC -lámka:
2 hlavy

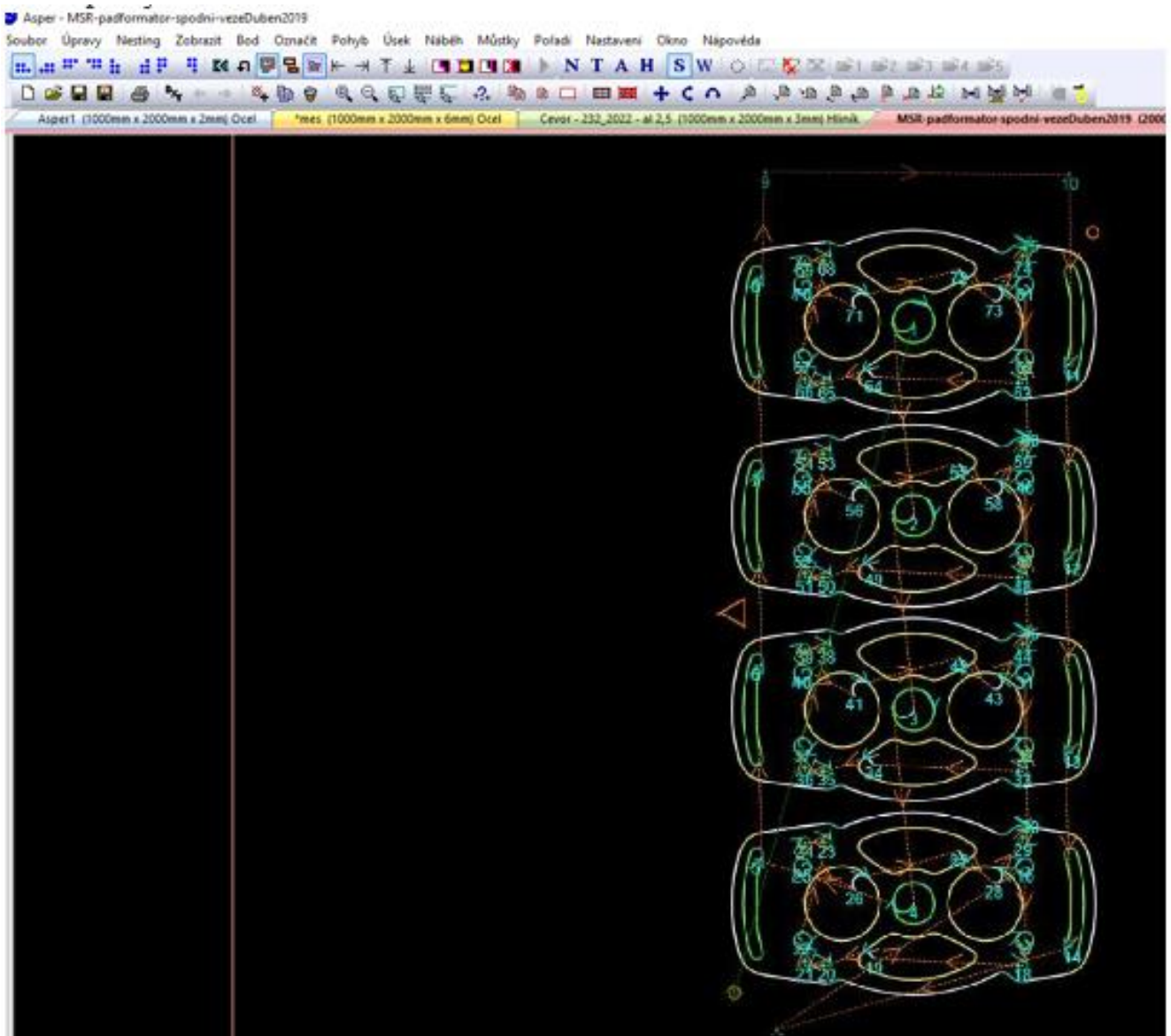
Obr. 57 Výrobní postup pro součást padformátor.

PROGRAM ASPER

MicroStep CAM software Asper® obr. 58 je výsledkem 15 let intenzivního vývoje a neustálého zákaznického zlepšování v oblasti softwarových aplikací pro CNC stroje. Sjednocuje praktické zkušenosti s programováním s dlouhodobým uživatelským know-how a intuitivním, transparentním způsobem ovládání. Asper® poskytuje nástroje pro snadnou a rychlou tvorbu NC programů pro různé technologie řezání. Základní sadu lze rozšířit o různé specializované moduly přizpůsobené aktuálním požadavkům zákazníka. Se svou transparentní strukturou menu a rozšířenými funkcemi představuje Asper® moderní a výkonný nástroj pro NC programování [48].

Umožňuje programovat:

- řeznou strategii, nájezdy, výjezdy nástřeily,
- dávkování abraziva,
- volbu řezné rychlosti,
- korekce nástroje,
- řezné plány a další.



Obr. 58 Rozhraní programu Asper.

Systém řezu byl zvolen takto: všechny vnitřní otvory se musí nejprve předděrovat, zde bylo použito tzv. markování (obr. 59). Markování je způsob předděrování, který je založen na strojním základu. Markovací bod je programově vložen na začátek řezu, jak vnitřních, tak venkovních nájezdů do výrobku. Důvod je jednoduchý, je to rychlejší než předvrtávat všechny otvory ručně do každého výrobku. Pokud v našem případě děláme dávku cca 64 ks od každého typu padformátoru, tak je efektivita předvrtání ručně kontraproduktivní.

U markování se musí stáhnout tlak na vysokotlakém čerpadle cca na 1000 barů, vysoký (řezný) je cca 4000 barů. Po markování bylo provedeno řezání všech vnitřních obrysů. Kvůli úspoře času byly vždy vyříznuty všechny otvory nacházející se ve stejné výšce najednou.

Řezání probíhalo následovně dle přílohy 8. U všech čtyř padformátorů: 1. díry $\varnothing 29,68$ mm ve výšce 15,5 mm, 2. drážky R120,75 šířky 8,5 mm ve výšce 4 mm. Poté byl řezán postupně celý padformátor. Nejprve byly řezány ve výšce 12 mm všechny otvory jeden po druhém podle nejkratší vzdálenosti mezi nimi (kvůli úspoře řezacího času).

Otvory: díra $\varnothing 6,25$ mm, $\varnothing 12$ mm, $\varnothing 55,09$ mm a drážka detailu pohledu A (1:1). Nakonec byl vyříznut celý vnější obrys. Po vyříznutí celé součásti řezací hlava začala vyřezávat druhý padformátor se stejnou strategií.

Obecně u karbonů platí – nájezdy do vnitřních otvorů dát co nejdál od kontury výrobku. To znamená – jestli chceme vyřezat díry průměru 10 mm, dáme nájezdy o délce 5 mm na střed díry. U průměru díry 20 mm – nájezd 10 mm atd. Výjezd zde použit nebyl.

Řezná rychlost se mění v závislosti na tloušťce materiálu a průměru děr. Platí – čím menší otvor, tím jede stroj pomaleji. Uvedeno v procentech. Tyto údaje máme automaticky přednastavené v prog. Asper. Konec úseku řezu se zadává také v programu Asper, standardně brzdíme 3 mm od konce řezaného úseku na 35 procent základní řezané rychlosti. To znamená při rychlosti 1200 mm/min. je rychlost brždění konce 420 mm/min.

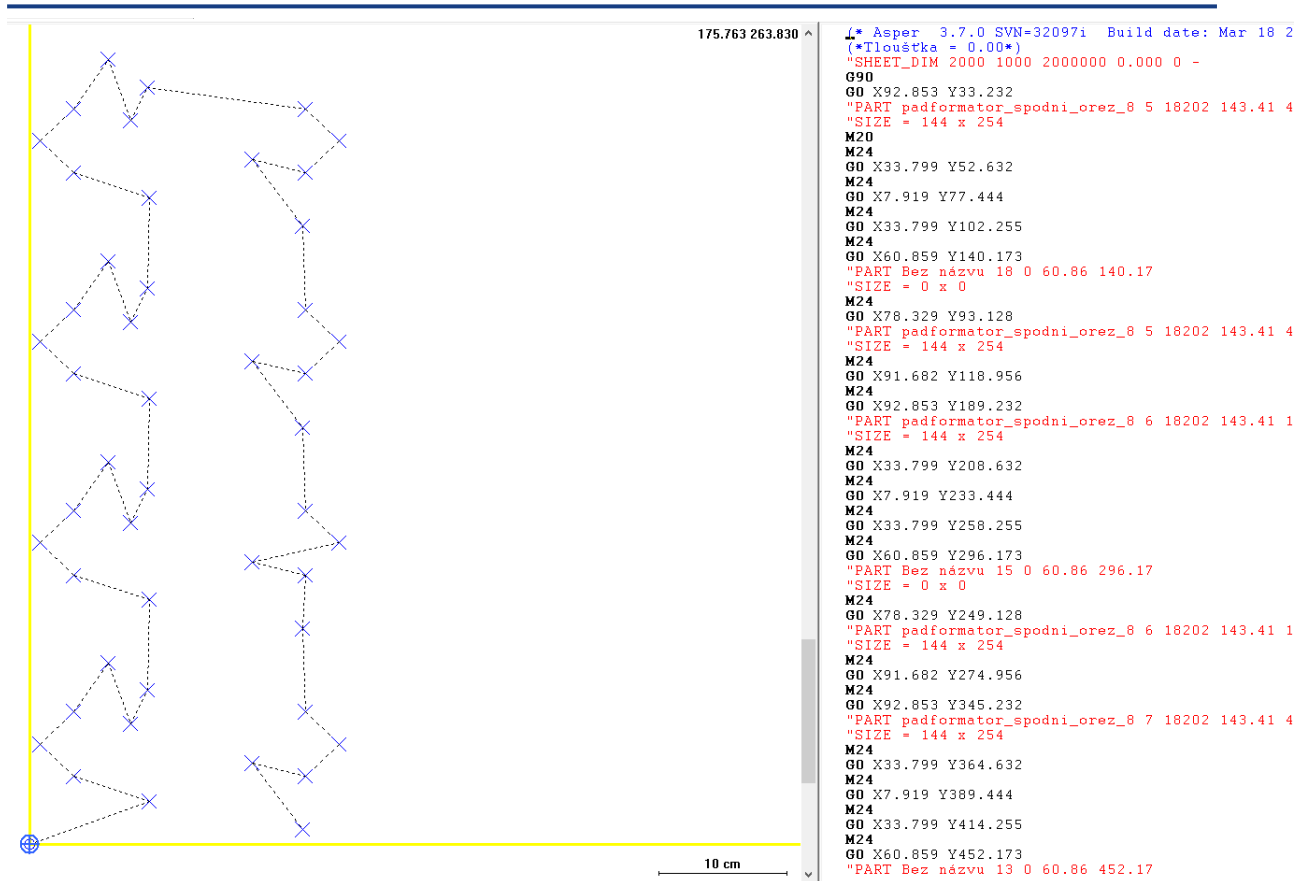
Řezné rychlosti vygenerované v programu Asper dle barev obr. 58.

Bíla = základní řezná rychlost 1200 mm/min,

Světle zelená = 60 % ze základní řezné rychlosti = 720 mm/min,

Tmavě zelená = 50 % ze základní řezné rychlosti = 600 mm/min,

Žlutá = 80 % ze základní řezné rychlosti = 960 mm/min.



Obr. 59 Markování otvorů a ukázka vygenerovaného NC kódu.

Parametry řezání (tab. 20) byly zvoleny s ohledem na druh materiálu, tloušťce a požadované kvalitě řezu.

Tab. 20 Vstupní parametry řezání.

Tloušťka mat.	3 mm
Tlak vody	3826 bar
Průtok abraziva	250 g/min
Řezná výška	3 mm
Abrazivo	indický granát, MESH 80
Vodní tryska (dýza)	0,012mm
Průměr abrazivní trysky	1,02 mm
Základní řezná rychlosti	1200 mm/min

Jako ideální varianta k upnutí polotvaru, vzhledem k velikosti série a náročnosti na manipulaci bylo zvoleno ustavení polotvaru dle obr. 60. Do OSB desky byly závitníkem vyříznuty dva vnitřní závity M8. Polotvary byly přišroubovány pomocí dvou šroubů M8 k OSB desce. OSB deska byla položena na rošt řezacího stolu, kvůli tomu, aby součást byla ustanovena v rovině. Pomocí svorek byla deska upnuta a zatížena po obvodu ocelovými válci dle obr. 61. Navíc zde bylo použito svěrek pro zlepšení pevného a nehnutelného upnutí polotvaru. Ty svíraly OSB desku a spodní částí řezacího stolu.



Obr. 60 Upnutí polotvaru.

Součásti byly po každém vyříznutí sejmuty ze zbytkového polotvaru a ten byl odšroubován a nahrazen novým polotvarem. Díky zkušenostem z opakovatelnosti vyřezávání součásti padformátoru a chytře zvolenému upnutí polotvaru nedošlo k žádným problémům při jeho řezání.



Obr. 61 Řezání padformátorů

3.4 Výsledná podoba motorového surfu

Samotné vázání a padformátor je spojen pomocí čtyř šroubů se zápusťnou hlavou dle obr. 62. Zahloubení na hlavu šroubů se již z výroby polotvaru na něm vyskytuje. Dochází zde jen k řezání děr na dřík šroubů. Díky vícero zahloubením pro šroub je použití padformátoru univerzální pro více druhů vázání. Část horního padformátoru a vázání je spojena pomocí spodního padformátoru k motorovému surfu (obr. 63). Spojení spodního a horního padformátoru je pomocí šroubů v drážce dle obr. 63. Tento tvar drážky je vyroben z důvodu možnosti natáčení vázání podle požadavků surfaře.



Obr. 62 Spojení padformátoru s vázáním.



Obr. 63 Spojení surfovacího prkna a vázání pomocí padformátoru.

Výsledná podoba motorového surfu po kompletní montáži připravená na předání zákazníkovi (obr. 64).



Obr. 64 Výsledná podoba produktu před předáním zákazníkovi.

Jetsurfing (obr. 65) je poměrně mladý sport, který začal jednoduchým nápadem. Zalíbení v něm mohou najít milovníci vodních sportů, motorových sportů i kdokoliv jiný, kdo chce zkusit něco nového. Někteří jetsurfing označují za nejbezpečnější motorový sport. Projet se na jetsurfu, tedy surfovém prkně, obohaceném o spalovací motor, není nijak náročné a může být zábavné i pro lyžaře [49].

Surf, který se používá pro motosurfing, je podobný kitesurfovému, tedy surfovému prknu s kapsami na nohy, díky kterým prkno drží volně na nohách (podobně jako vázání na snowboardu). Prkno se dá lehce přepravovat, váží méně než dvacet kilo [49].



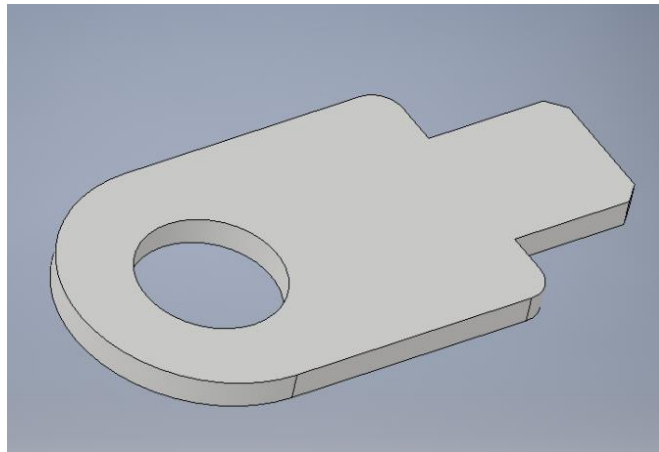
Obr. 65 Motorový Jetsurf v akci [49].

Druhou významnou částí je jednoválcový dvoutaktní spalovací motor, vyvinutý čistě pro JetSurf. Ten roztáčí karbonovou turbínu, díky které je JetSurf schopný jet rychlostí až 64 km/h. Na jednu nádrž (2,8 litrů benzínu) vydrží jetsurf jezdit zhruba hodinu [49].

Poslední, ale nepostradatelnou součástí jetsurfu je ovládací rukojeť, kterou motosurfař v průběhu jízdy reguluje rychlost. Práce s akcelerací vyžaduje trochu cviku, ale během pár desítek minut se na jetsurfu naučí téměř každý [49].

4 PROVEDENÍ EXPERIMENTU NA VZOROVÉM DÍLU Z KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU

Tato část práce se bude zabývat zdokumentováním a porovnáváním vzorku obr. 66, které byly řezány zařízením využívající abrazivní vodní paprsek. Řezání probíhalo taktéž ve firmě AWAC spol. s.r.o, kde bylo vyřezáno pět identických součástí, za různých řezných podmínek. Po konzultaci s programátorem a požadavkem pro následné porovnání jakosti vyřezaných součástí za různých řezných podmínek bylo doporučeno u každého řezaného vzorku navýšení řezné rychlosti. Tyto řezné rychlosti byly zvoleny s cílem dosáhnout stupně kvality obrobeneho povrchu Q1 až Q5 viz tab. 23. Obsahovat bude měření a porovnání jakosti vyřezaných součástí zahrnující rozměrovou přesnost, výpočet kuželovitosti, vizuální kontrolu a drsnost povrchu.



Obr. 66 Model vzorku vymodelovaný v programu Autodesk Inventor 2019.

4.1 Použitý kompozitní materiál

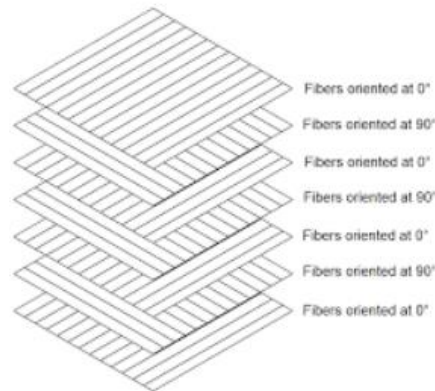
Pro zadaný experiment, byl poskytnut zbytkový materiál (obr. 67), obdélníkového tvaru o rozměrech 1000 x 400 mm z uhlíkových vláken.

Jedná se o kompozit z jednosměrných uhlíkových vláken se standartní strukturou 0° a 90° . Matrice je z epoxidové pryskyřice, jedna vrstva má 0,2 mm.



Obr. 67 Použitý zbytkový kompozitní materiál.

Jednosměrné desky z uhlíkových vláken jsou složeny z několika vrstev jednosměrného prepregu z uhlíkových vláken / jednosměrné tkaniny z uhlíkových vláken. Tyto jednosměrné tkaniny z uhlíkových vláken jsou předimpregnovány vysoce kvalitní epoxidovou pryskyřicí. Uhlíková deska se vytvoří po vytvrzení epoxidové pryskyřice pomocí vysokoteplotního a vysokotlakého vytvrzení. Na rozdíl od mokrého pokládání může vysokoteplotní a vysokotlaké vytvrzování vytvářet ploché, lehké plechy s minimálními dutinami a nánosy. Struktura jednosměrné desky z uhlíkových vláken je následující obr. 68 [50]:



Obr. 68 Struktura jednosměrné uhlíkové desky[50].

Jednosměrná tkanina z uhlíkových vláken má největší pevnost ve 2 směrech (vždy po směru vlákna) a je velmi tuhá. Při zpracování a výrobě desek z uhlíkových vláken lze jednosměrné tkaniny překrývat v různých směrech, tak aby se dosáhlo pevnosti ve více směrech. Podobně v procesu pokládání může být jednosměrná tkanina vrstvena s jinými vazbami tkanin z uhlíkových vláken, tak aby se získaly různé směrové pevnostní charakteristiky nebo estetické vlastnosti [50].

Hmotnost jednosměrné tkaniny z uhlíkových vláken je velmi nízká, dokonce lehčí než její tkané protějšky. Pokud jde o výrobní náklady, jednosměrná tkanina z uhlíkových vláken je levnější než tkanina z tkaných uhlíkových vláken. Jelikož proces tkaní je také součástí nákladů, takže použití jednosměrné tkaniny jako základního materiálu desky z uhlíkových vláken může ušetřit náklady a dosáhnout vysoké pevnosti [50].

Použití jednosměrných uhlíkových vláken: Jednosměrná uhlíková vlákna lze řezat na rámy dronů, podvozky závodních vozů a modely lodí, modely raket, jízdních kol a zábavních holí (hokej, turistika, lakros atd.). Kompozitní díly používané v automobilech a dalších vícerozměrných aplikacích, které vyžadují komplexní zvýšení pevnosti, by měly používat různé metody tkaní, jako je plátňová vazba, keprová vazba nebo kovaná vazba [50].

4.2 Zařízení

Řezání vzorků proběhlo na stroji MicroStep AquaCut 1501.20 W (obr. 69), který umožňuje pouze 2D řezání a je ovládán pomocí softwaru MSNC 500 W. Stroj je vybaven jednou řezací hlavou a stolem o rozměrech 4000 x 2500 mm. Toto zařízení je ve firmě AWAC spol. s.r.o. využíváno na řezání součástí menších rozměrů a malých sérií.



Obr. 69 Stroj MicroStep AquaCut 1501.20 W.

Technické parametry stroje jsou uvedeny v tab. 21.

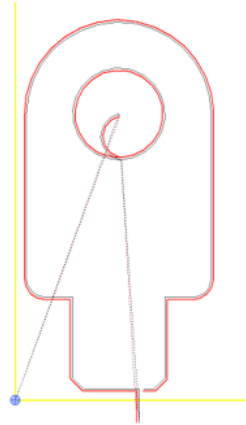
Tab. 21 Technické parametry stroje Stroj MicroStep AquaCut 1501.20 W.

Firma	MicroStep Group
Typ	AquaCut 1501.20 W
Rok výroby	2004
Výkon	2 kW
Síť	230 V 50 Hz
Zdvih	150 mm
Pracovní tlak	3826 bar
Rozměry stolu	4000 x 2500 mm

4.3 Výroba vzorků

Cílem této kapitoly bylo vyřezat pomocí abrazivního vodního paprsku na stroji MicroStep AquaCut 1501.20 W navrženou konturu dle obr. 74 na pěti různých vzorcích.

Model vzorku byl vymodelován v softwaru Autodesk Inventor 2019, pomocí softwaru ZWCAD 2022 byla nakreslena obrysová kontura součásti. Ve formátu DXF byla tato kontura přenesena do CAM programu ASPER, kde byly vybrány řezné podmínky, nájezdy, výjezdy a strategie samotného řezání obr. 70. Následně byla řezaná kontura i s ostatními řeznými parametry a nájezdy nahrána na stroj do řídicího programu.



Obr. 70 Ukázka trajektorie řezu.

Nastavované parametry jsou uvedeny v tabulce 22.

Tab. 22 Vstupní parametry řezání.

Tloušťka mat.	6 mm
Tlak vody	3826 bar
Průtok abraziva	300 g/min
Řezná výška	3 mm
Abrazivo	indický granát, MESH 80
Zdvih	150 mm
Průměr abrazivní trysky	1,02 mm
Řezná rychlost	300, 600, 1000, 2000, 3000 mm/min

Po nastavení všech řezných parametrů bylo po diskusích s obsluhou stroje zvoleno usazení polotvaru dle obr. 71. Na ocelový rošt byla dána OSB deska, sloužící pro lepší usazení polotvaru a proti propadávání součástí mezi rošt. Na desku byly ustaveny články z polyethylenu, kvůli zlepšení přesnosti rozměrů, rovinnosti a kolmosti vyřezaných vzorků. Tento článek byl vyříznut, tak aby splňoval kolmost, požadovanou pro ustavení polotvaru. Článek byl upnut pomocí svěrek a hranolů ze dřeva ke stolu stroje. Polotvar byl zatížen třemi válci z oceli viz obr. 72. Jelikož na obrobek působí velké síly a je nežádoucí, aby se polotvar pohnul, při průstřelu materiálu nebo v průběhu řezání kontury.



Obr. 71 Ustavení polotvaru.

Výroba vzorků obr. 72 probíhala postupně od vzorku, na kterém byla použita nejpomalejší řezná rychlost 300 mm/min až do extrémní řezné rychlosti 3000 mm/min. Tato řezná rychlost byla po každém vyřezaném vzorku zvýšena o danou hodnotu na řídicím panelu stroje.



Obr. 72 Výroba vzorků.

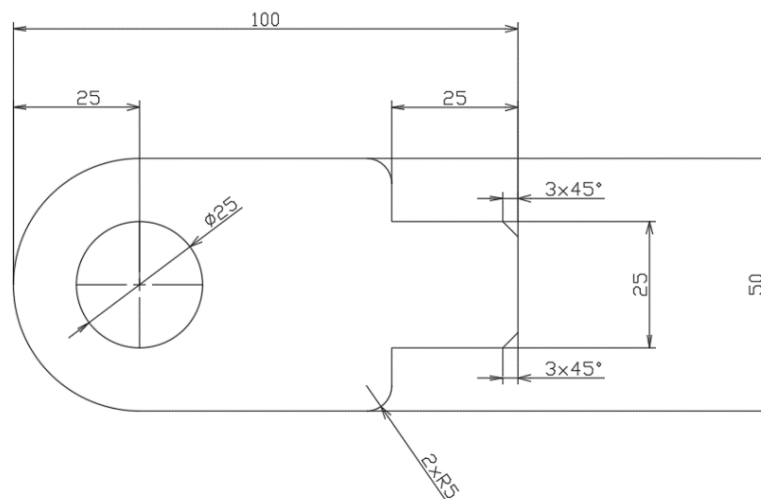
Po vyříznutí byly vzorky obr. 73 opláchnuty vodou a ofouknuty od nečistot, zbytků abraziva a kapaliny stlačeným vzduchem. Před následným měřením nebyly tyto vzorky jiným způsobem opracovány.



Obr. 73 Vyříznuté vzorky.

4.3.1 Kontura vzorku

Jako tvar součásti na provedení experimentu vzhledem k velikosti zbytkového materiálu byla zvolena kontura o rozměrech dle obr. 74.



Obr. 74 Kontura sledovaných vzorků.

Tento tvar součásti byl zvolen z důvodu, že paprsek bude řezat vnější i vnitřní konturu. Zadaná součást osazuje šest rohů, z důvodu možnosti sledování povrchu při změně trajektorie řezu byly čtyři rohy upraveny. První dva rohy byly upraveny na R5, na následujících dvou byla provedena úprava 3x45°.

4.4 Kvalita a přesnost řezaných vzorků

Řezání vodním paprskem umožňuje minimální ztráty řezaného materiálu a poměrně velmi vysokou kvalitu povrchu. Parametry, které mají vliv na dosahovanou kvalitu řezu jsou např [4]:

- pracovní tlak vody,
- abrazivo,
- vzdálenost mezi tryskou a obrobkem,
- šířka paprsku,
- rychlost paprsku,
- úhel sklonu paprsku,
- řezaný materiál.

Kvalita obrobeneho povrchu u řezání vodním paprskem se dělí do 5 stupňů Q1-Q5 a je rozdělena podle několika parametrů. Tyto charakteristiky udává tab. 23.

Tab. 23 Stupně kvality obrobeneho povrchu [4].

Stupeň	Základní charakteristik a	Drsnost Ra (μm)		Tvarová přesnost (mm)		Úkos
		V horní kontuře	Ve spodní kontuře e	V horní kontuře	Ve spodní kontuře	
Q5	Nejlepší řez	Pod 3,2	Cca 3,2	$\mp 0,1$	$\mp 0,1$	Mírný podřez
Q4	Kvalitní řez	Cca 3,2	Cca 6,3	$\mp 0,1$	$\mp 0,15$	Většinou minimální

Q3	Střední řez	Cca 4	Do 12,5	$\mp 0,15$	Podle typu a síly materiálu	Podle typu a síly materiálu
Q2	Hrubý řez	Cca 4	Do 25	$\mp 0,2$	Podle typu a síly materiálu	Podle typu a síly materiálu
Q1	Dělicí řez	4-6,3	Do 40	$\mp 0,2$	Výrazně nepřesné	Výrazný úkos do +

4.4.1 Rozměrová přesnost

Řezání vodním paprskem je známo jako jedna z metod obrábění materiálů, která může poskytnout extrémně vysokou úroveň přesnosti a preciznosti. Přesnost řezání vodním paprskem do značné míry závisí na následujících faktorech: stav stroje, řezný výkon, tloušťka, typ materiálu, teplota a dalších. Některé stroje mohou produkovat díly s odchylkou pouhých 0,025 mm. Standardní toleranční odchylka se při řezání vodním paprskem pohybuje od 0,075 do 0,125 mm. V případě materiálů, jejichž tloušťka přesahuje 2,5 cm, dokáží stroje vyrobit díly s odchylkou od 0,125 do 2,5 mm [51; 52].

Přesnost vyřezaných materiálů byla kontrolována na rozměrovou a tvarovou přesnost vyřezaných vzorků. Měření proběhlo ve spolupráci se společností KOVO-PLAZMA s.r.o. na výkonném 3D souřadnicovém měřicím stroji Mitutoyo CRYSTA-Apex S 7106 obr. 75. Tento měřicí přístroj byl použit kvůli dosahované přesnosti, kterou bychom na jiných měřicích přístrojích jen těžko dosahovali.



Obr. 75 Stroj Mitutoyo CRYSTA-Apex S 7106 [53].

Stroj Mitutoyo Crysta-APEX S 7106

Jedná se o vysoce výkonný, levný, CNC souřadnicově měřicí stroj splňující celosvětové standardy. Stejně jako v případě konvenčních souřadnicových měřicích strojů Mitutoyo jsou

v CRYSTA-Apex S použity různé struktury, které karosérii poskytují vyšší tuhost. Vodicí lišta v ose Y, která je integrována na jedné straně žulové povrchové desky, vykazuje používáním malé zhoršení, a proto si mnohem déle zachovává uvedenou přesnost. Vzduchová ložiska umístěná na spodní straně, minimalizují vibrace i při vysokorychlostním pohybu s velkým zrychlením, čímž zajišťují stabilní lineární pohyb [54].

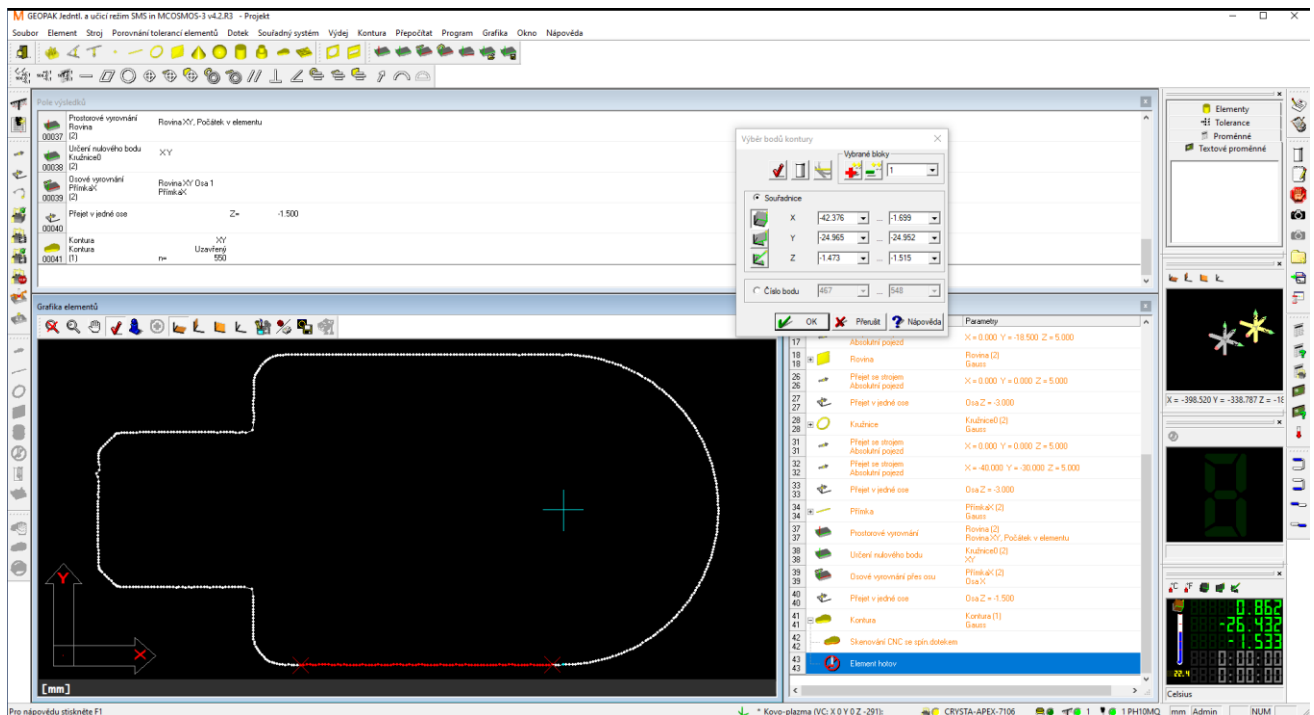
V tab. 24 jsou uvedeny parametry stroje Mitutoyo Crysta-APEX S 7106.

Tab. 24 Parametry stroje Mitutoyo Crysta-APEX S 7106 [55].

Měřicí rozsah Osa X, osa Y, osa Z	700 mm, 1000 mm, 600 mm
Rozlišení	0,0001 mm (0,1 μm)
Způsob vedení	Vzduchová ložiska ve všech osách
Rychlost pohonu	8 – 300 mm/s (CNC mode), max. rychlost 519 mm/s, maximální rychlost měření 8 mm/s
Rozměry dílce	Max. výška 800 mm, max. hmotnost 1000 kg
Přívod vzduchu	Tlak 0,4 Mpa, spotřeba 60 l/min za normálních podmínek,
Hmotnost zařízení	1951 kg
Rozměry zařízení	Šířka 1950 mm, výška 2730 mm, délka 1950 mm

Postup měření a vyhodnocení vzorků

Stroj Mitutoyo Crysta-APEX S 7106, kterým je firma KOVO-PLAZMA s.r.o., obsahuje softwar MCCOSMOS-3 (obr. 76), vyvíjený od stejnojmenné firmy jako stroj-Mitutoyo.



Obr. 76 Rozraní programu MCCOSMOS-3.

Před samotným měřením vzorků bylo nutné provést několik úkonů:

- dle zvolené strategie měření vytvořit v softwaru program pro měření námi zjišťovaných rozměrů (program pro měření je uveden v příloze 1),
- ustavit vzorek pro následné měření. Jelikož při měření na vzorek působí jen minimální síla od měřicí sondy, bylo zvoleno ustanovení dle obr. 77. Na pevně ustanoveném vyrovnaném kvádru byla nalepena oboustranná páska. Na tuto pásku pak byl nalepen samotný měřicí vzorek,
- Definovat rovinu na vrchní straně vzorku a určit orientaci osy X a osy Y.,
- Samotné měření dle CNC programu,
- Vyhodnocení výsledků dle výstupních protokolů (protokoly z měření jsou uvedeny jako příloha 1, příloha 2, příloha 3, příloha 4, příloha 5)



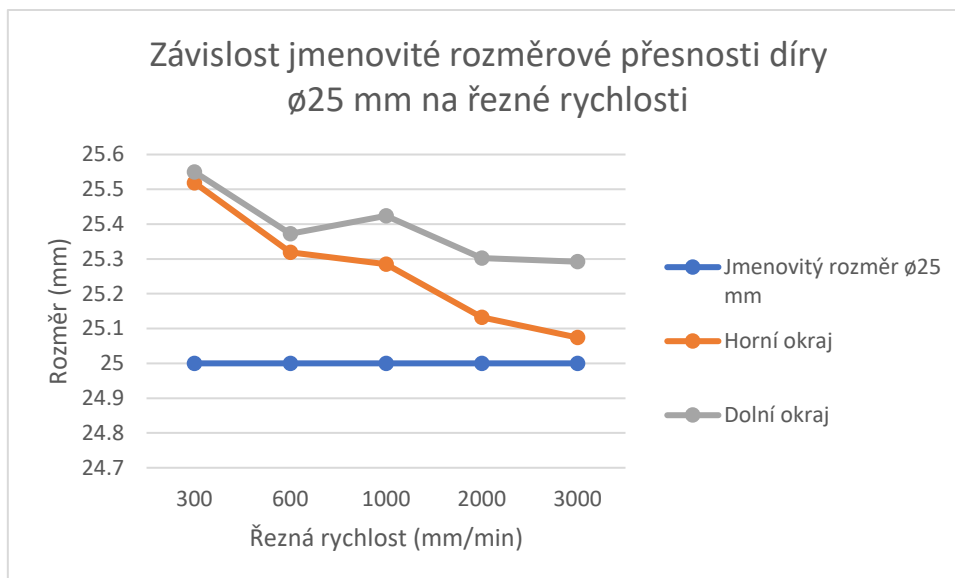
Obr. 77 Ustavení vzorku pro měření.

Pro vyhodnocení rozměrové přesnosti byly zvoleny tři rozměry dle kontury obr. 74. Jedná se o rozměry délka 100 mm, šířka 50 mm a díra průměr 25 mm. Rozměrová přesnost u horního a dolního okraje byla měřena vždy 1,5 mm od horní a spodní plochy vzorku. Tab. 25, 26, 27 a udávají naměřené a zjištěné hodnoty na jednotlivých vzorcích.

Tab. 25 Naměřené rozměry díra $\varnothing 25$ mm.

Díra $\varnothing 25$ mm					
	Vzorek č. 1	Vzorek č. 2	Vzorek č. 3	Vzorek č. 4	Vzorek č. 5
	Řezná rychlost 300 mm/min	Řezná rychlost 600 mm/min	Řezná rychlost 1000 mm/min	Řezná rychlost 2000 mm/min	Řezná rychlost 3000 mm/min

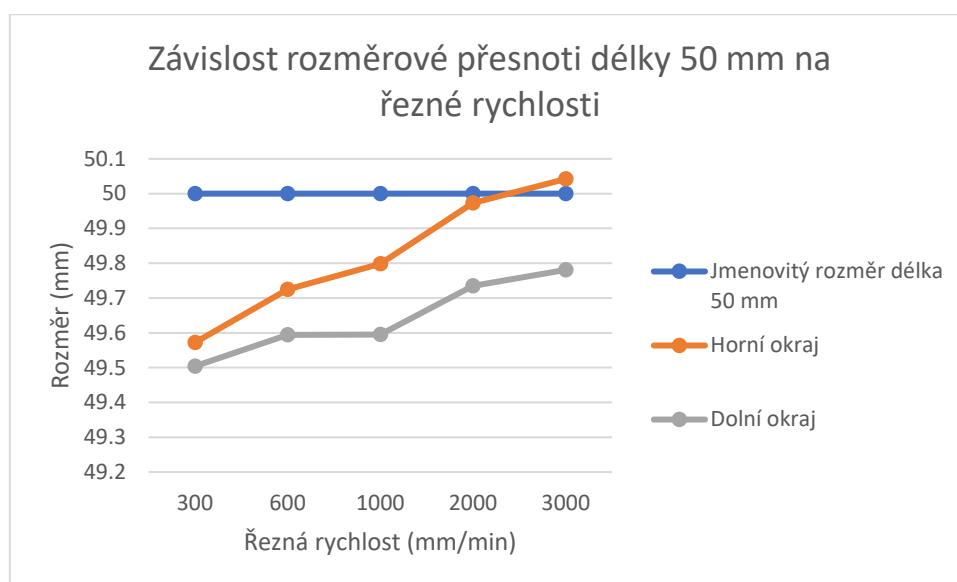
Horní okraj (mm)	25,519	25,319	25,285	25,132	25,074
Dolní okraj (mm)	25,550	25,372	25,424	25,302	25,292
Rozdíl (mm)	0,331	0,053	0,139	0,17	0,218
Průměr horní, dolní okraj (mm)	25,5345	25,3455	25,3545	25,217	25,183


 Obr. 78 Závislost rozměrové přesnosti díry $\varnothing 25$ mm na řezné rychlosti.

Tab. 26 Naměřené rozměry vzdálenosti 50 mm.

Délka 50 mm					
	Vzorek č. 1	Vzorek č. 2	Vzorek č. 3	Vzorek č. 4	Vzorek č. 5
	Řezná rychlost 300 mm/min	Řezná rychlost 600 mm/min	Řezná rychlost 1000 mm/min	Řezná rychlost 2000 mm/min	Řezná rychlost 3000 mm/min
Horní okraj (mm)	49,572	49,594	49,798	49,973	50,042
Dolní okraj (mm)	49,504	49,725	49,595	49,735	49,781

Rozdíl (mm)	0,068	0,131	0,203	0,238	0,261
Průměr horní, dolní okraj (mm)	49,538	49,6595	49,6965	49,854	49,9115

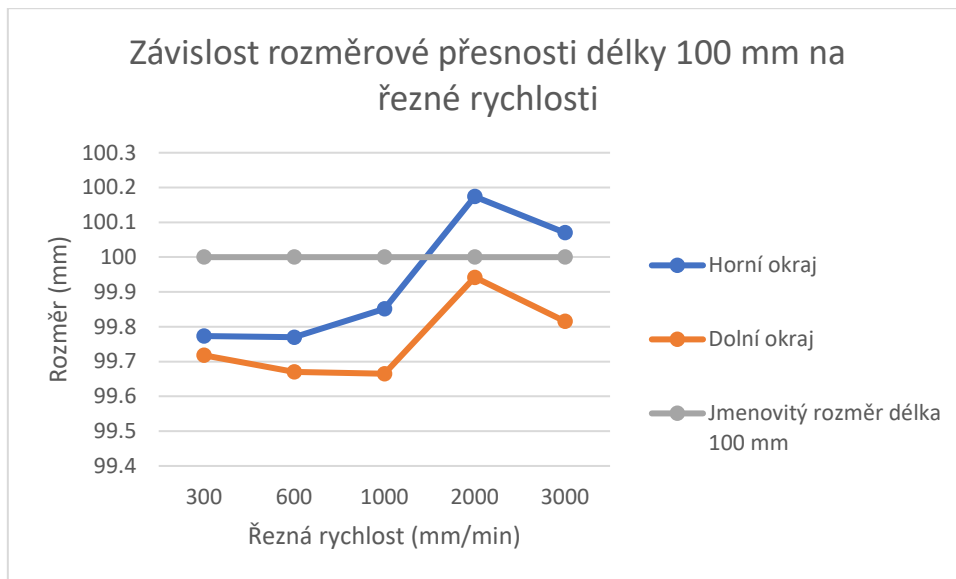


Obr. 79 Závislost rozměrové přesnosti délky 50 mm na řezné rychlosti.

Tab. 27 Naměřené rozměry vzdálenosti 100 mm.

Délka 100 mm					
	Vzorek č. 1	Vzorek č. 2	Vzorek č. 3	Vzorek č. 4	Vzorek č. 5
	Řezná rychlost 300 mm/min	Řezná rychlost 600 mm/min	Řezná rychlost 1000 mm/min	Řezná rychlost 2000 mm/min	Řezná rychlost 3000 mm/min
Horní okraj (mm)	99,773	99,67	99,851	100,174	100,07
Dolní okraj (mm)	99,718	99,77	99,665	99,942	99,816
Rozdíl (mm)	0,055	0,1	0,186	0,232	0,254
Průměr horní,	99,7455	99,72	99,758	100,058	99,943

dolní okraj (mm)					
------------------------	--	--	--	--	--



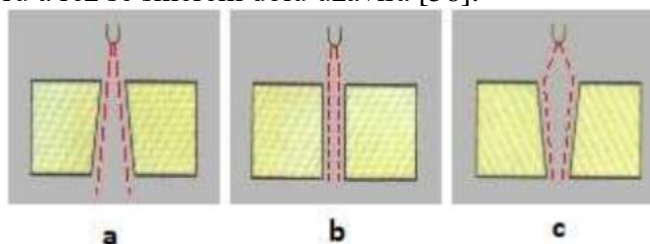
Obr. 80 Závislost rozměrové přesnosti délky 100 mm na řezné rychlosti.

Z grafů obr. 78, 79, 80 a tabulek je zřejmé, že přesných jmenovitých rozměrů se nedosáhlo. Odchytky od jmenovitých rozměrů jsou až v řádech desetin mm. Grafy a tabulky ukazují, že čím vyšší řezná rychlost tím se rozměr přibližuje její jmenovité hodnotě. Tento výsledek je zapříčiněn špatnou korekcí dávkování abraziva při jednotlivých řezných rychlostech. To je dáno tím, že čím větší je řezná rychlost vodního paprsku, tím voda s příměsí abraziva stačí méně vyžít daný materiál. Měřila se horní i dolní hrana vzorku, tak aby následně mohlo být vypočítáno zkosení.

4.4.2 Kuželovitost

Většinou při řezání technologiemi WJM nebo AWJM vznikají určité úkosy maximálně ale 1–2°. Důležité je optimalizovat řeznou rychlost, abychom dosáhli řezu bez úkosu. Důležitými aspekty je i tlak vody a vzdálenost trysky od materiálu. Na úkosy má vliv i množství abraziva, tvaru řezu atd. [4].

Tvary úkosů jsou zobrazeny na obr. 81. Je-li řez velmi pomalý, nebo je-li dělený materiál měkký, stihne paprsek probrousit kuželový tvar zobrazený na obr. 81a. Varianta b nastává zvolením optimálních řezných parametrů. Rychlost řezu pro dané materiálové charakteristiky, včetně tloušťky materiálu, je optimálně nastavena a úkos v tomto případě nevzniká. Poslední případ nastává, pokud je zvolen velmi rychlý posuv hlavičky, nebo řeže-li se odolnější materiál. Tento tvar je způsoben tím, že paprsek nestihne probrousit vstupní část ve svém celém průměru a řez se směrem dolů uzavírá [56].



Obr. 81 Tvary úkosů [57].

Kuželovitost byla vypočítána dle vztahu 1.1 z hodnot naměřených na vstupu a výstupu z materiálu dle tab. 25, 26, 27.

Výpočet kuželovitosti dle vztahu 4.1 [4]:

$$\alpha = \frac{\tan^{-1} \left(\frac{L_{VST} - L_{VYS}}{H} \right)}{2} \quad (4.1)$$

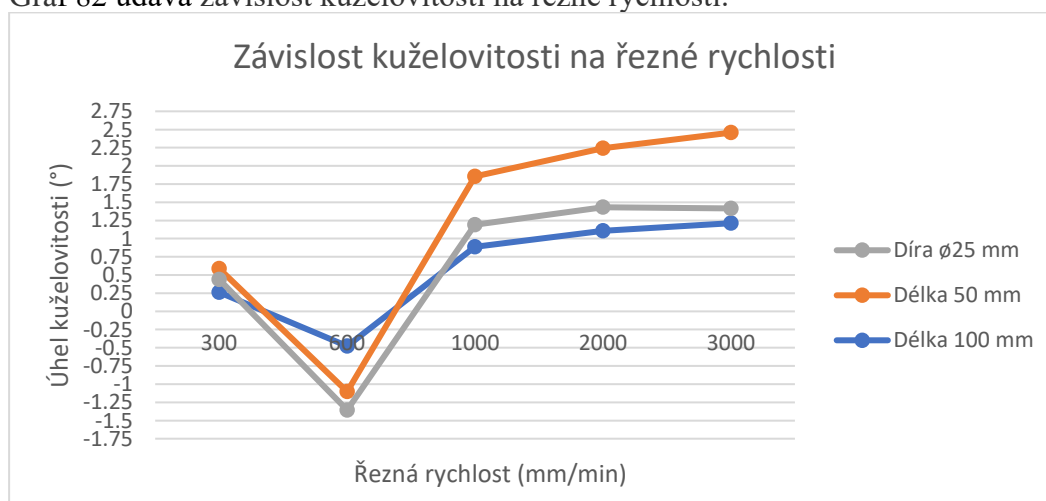
Kde: α – úhel kuželovitosti [°],
 h – tloušťka materiálu [mm],
 L_{VST} – vzdálenost na horní řezné hraně [mm],
 L_{VYS} – vzdálenost na dolní řezné hraně [mm].

Tabulka 28 udává vypočítanou kuželovitost při daných řezných rychlostech.

Tab. 28 Kuželovitost při určitých řezných rychlostech.

Vzorek	Řezná rychlost (mm/min)	Úhel kuželovitosti		
		Díra Ø25 mm	Délka 50 mm	Délka 100 mm
1.	300	-0° 9'	0° 20'	0° 16'
2.	600	-0° 15'	0° 38'	0° 29'
3.	1000	-0° 40'	0° 58'	0° 53'
4.	2000	-0° 49'	1° 8'	1° 6'
5.	3000	-1° 2'	1° 15'	1° 13'

Graf 82 udává závislost kuželovitosti na řezné rychlosti.



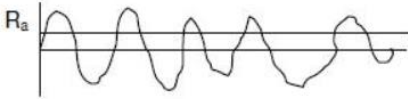
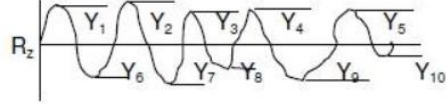
Obr. 82 Závislost kuželovitosti na řezné rychlosti.

Z tabulek a grafu je zřejmé, že zvyšováním řezné rychlosti dochází k zvyšování úkosu. Avšak u námi zvolených řezných podmínek nedošlo ke kritické hodnotě úkosu nad 1,5°. Dle tab. 28

nám k velikosti úkosu vychází jako ideální řezná rychlost $v_c= 300$ mm/min. Při této řezné rychlosti dochází k mírnému úkosu což odpovídá stupni kvality řezu Q4.

4.4.3 Drsnost povrchu

Hydroabrazivní paprsek vytváří na obrobeném povrchu reliéf, který se rozděluje z hlediska kvality na horní a dolní erozní zónu. Kvalita je zde posuzována pomocí průměrné aritmetické úchytky povrchu R_a , R_z . Horní erozní zóna se vyznačuje nižšími hodnotami parametru profilu R_a , R_z . Dolní erozní zóna je klasifikována vyššími hodnotami parametru profilu R_a , R_z . Nejčastěji se drsnost povrchu pohybuje v rozmezí R_a 3,2-6,3 μm ve vrchní kontuře a R_a 3,2 až 40 μm ve spodní kontuře povrchu. Vysvětlení parametrů R_a , R_z obr. 83 [4].

Aritmetická odchylka od profilu R_a	Aritmetický průměr absolutních hodnot skutečného profilu (používá se na rugotestech)	
R_z $R_z=(4-6)R_a$	Průměrná hodnota z absolutních hodnot 5 maxim a 5 minim profilu křivky $R_z=(Y_1+Y_2+\dots+Y_9+Y_{10})/5$ ($R_z = \text{asi } 4-6x R_a$)	

Obr. 83 Specifikace parametrů R_a , R_z [58].

Měření drsnosti vyřezaných vzorků proběhlo v prostorách VUT FSI. Měření proběhlo na kompaktním přenosném drsnoměru TR100 Surface Roughness Tester obr. 84. Přístroj byl použit vzhledem k rychlému a přesnosti postačujícímu měření.



Obr. 84 Drsnoměr TR100 Surface Roughness Tester.

Drsnoměr TR100 Surface Roughness Tester

Kompaktní přenosný drsnoměr TR-100 je určen pro rychlé a přesné měření. Využívá piezoelektrickou mikrosenzorovou techniku, která je identická s vysoce přesnými laboratorními drsnoměry. Mezi vynikající vlastnosti TR-100 patří uživatelsky přívětivé ovládání a vysoká přesnost opakování. Jednoduše stisknete tlačítko a během několika sekund mikrosenzor v podobě diamantového stylusu snímá povrch. V závislosti na předem nastavené délce měření se na digitálním displeji zobrazí buď parametr drsnosti R_z nebo R_a [59].

Drsnoměr disponuje [60]:

- kapesní velikostí a ekonomickou cenou,
- velkým rozsahem měření vhodných pro většinu materiálů,
- měří ploché, vnější a šikmý povrchy,
- měří parametry Ra a Rz v jednom přístroji,
- umožňuje externí kalibraci na klávesnici,
- měření odpovídá ISO a DIN.

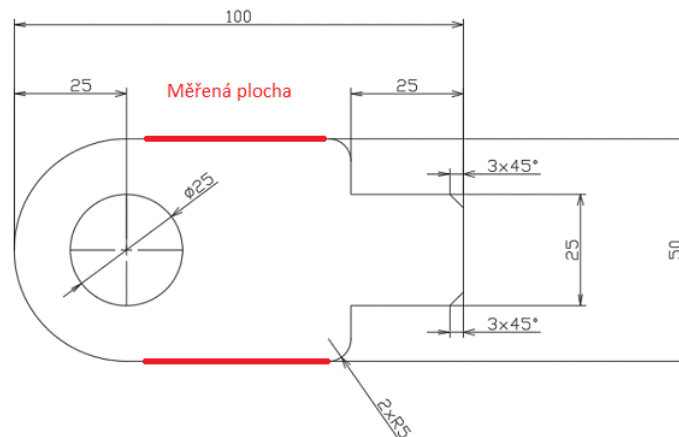
V tab. 29 jsou uvedeny parametry drsnoměru TR100 Surface Roughness Tester.

Tab. 29 Parametry drsnoměru TR100 Surface Roughness Tester [60].

Měřená drsnost	Ra, Rz
Rozsah měření	Ra: 0,05-15,0 μ m / Rz: 0,1-50 μ m
Rychlost posuvu hrotu	1,0 mm/s
Přesnost	± 15 %
Vyhodnocovací délka	1,25mm, 4,0mm, 5,0mm
Snímač	Piezoelektrický
Hmotnost zařízení	0-40 °C
Napájení	3,6V/2 \times NiMh-baterie
Hmotnost zařízení	200 g
Rozměry zařízení	Délka 125 mm, šířka 73 mm, výška 26 mm

Postup měření a vyhodnocení

Pro měření byly zvoleny plochy dle (obr. 85), které po vizuální kontrole jevily největší nerovnost.



Obr. 85 Měřená plocha.

Před samotným měřením vzorků bylo nutné provést několik úkonů:

- Zkontrolovat přesnost měření drsnoměru pomocí přiloženého etalonu,
- Vyčistit měřený povrch, to obnášelo odmaštění a vysušení měřeného povrchu.
- Ustanovení vzor pro následné měření. Jako optimální upnutí vzhledem k počtu měření a nutnosti udržet vzorky ve svislé poloze bylo zvoleno ustanovení dle obr. 86. Vzorek

byl ze stran pevně stlačen dvěma ocelovými kvádry, které dostatečně udržely vzorek nehnutě ve svislé poloze,

- Nastavit délku měření a požadovanou drsnost ke zhodnocení. Délka měřeného úseku byla vždy 5 mm. Vyhodnocen byl nejdříve parametr drsnosti Ra a následně přepnutím tlačítka zjištěn parametr drsnosti Rz.
- Samotné měření dle obr. 86,
- Zapsání a vyhodnocení výsledků dle naměřených údajů tab. 30 a grafů, 87, 88.

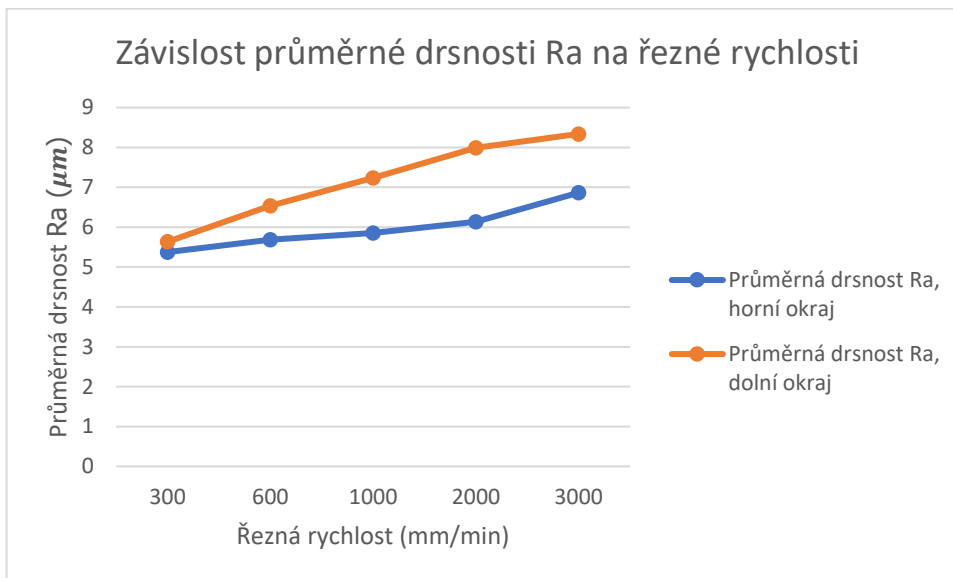


Obr. 86 Samotné měření vzorku pomocí drsnoměru.

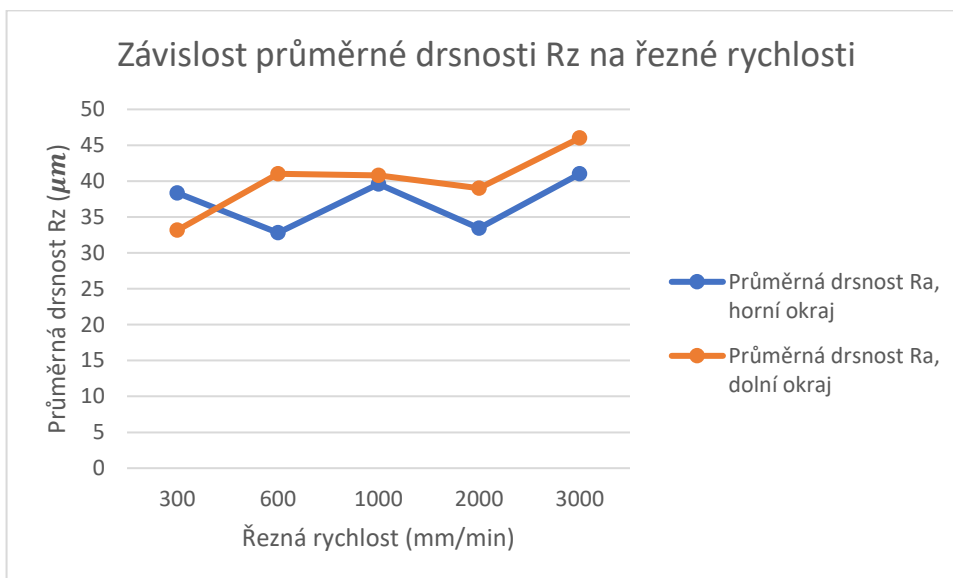
Tab. 30 Naměřená drsnost povrchu na měřené ploše.

Měření a plocha					
	Vzorek č. 1	Vzorek č. 2	Vzorek č. 3	Vzorek č. 1	Vzorek č. 1
	Řzná rychlost 300 mm/min	Řzná rychlost 600 mm/min	Řzná rychlost 1000 mm/min	Řzná rychlost 2000 mm/min	Řzná rychlost 3000 mm/min
Horní okraj (µm)	Ra: 5,21; 5,54	Ra: 5,51; 5,87	Ra: 5,63; 6,08	Ra: 5,88; 6,4	Ra: 6,93; 6,80
Ra, Rz	Rz: 32,9; 33,4	Rz: 35; 30,6	Rz: 38,2; 41	Rz: 27,5; 39,4	Rz: 43,9; 38,1
Dolní okraj (µm)	Ra: 5,20; 6,07	Ra: 6,84; 6,23	Ra: 7,30; 7,18	Ra: 7,26; 8,72	Ra: 8,22; 8,46
Ra, Rz	Rz: 34,8; 41,9	Rz: 41,8; 40,2	Rz: 46,7; 34,9	Rz: 37; 41	Rz: 42,6; 49,4

Průměr r horní, dolní okraj (μm) Ra, Rz	Horní: Ra: 5,375 Rz: 33,15	Horní: Ra: 5,69 Rz: 32,8	Horní: Ra: 5,855 Rz: 39,6	Horní: Ra: 6,14 Rz: 33,45	Horní: Ra: 6,865 Rz: 41
	Dolní: Ra: 5,635 Rz: 38,35	Dolní: Ra: 6,535 Rz: 41	Dolní: Ra: 7,24 Rz: 40,8	Dolní: Ra: 7,99 Rz: 39	Dolní: Ra: 8,34 Rz: 46



Obr. 87 Závislost průměrné drsnosti Ra na řezné rychlosti.



Obr. 88 Závislost průměrné drsnosti Ra na řezné rychlosti.

Dle naměřených hodnot se potvrdilo, že u horní plochy řezu dosahuje drsnost nižších hodnot než u dolní plochy řezu. Dle grafů je zřejmý nárůst drsnosti povrchu Ra se zvyšující se posuvovou rychlostí řezné hlavy. Nejlepší drsnosti povrchu Ra bylo dosaženo při řezné rychlosti 300 mm/min. U horní plochy řezu Ra 5,375 a u dolní plochy řezu vyšší hodnoty Ra 5,635. Nejvyšší hodnoty drsnosti povrchu Ra bylo dosaženo při řezné rychlosti 3000 mm/min. U horní plochy řezu Ra 6,865 a u dolní plochy řezu hodnoty Ra 8,34. Dle tab. 30

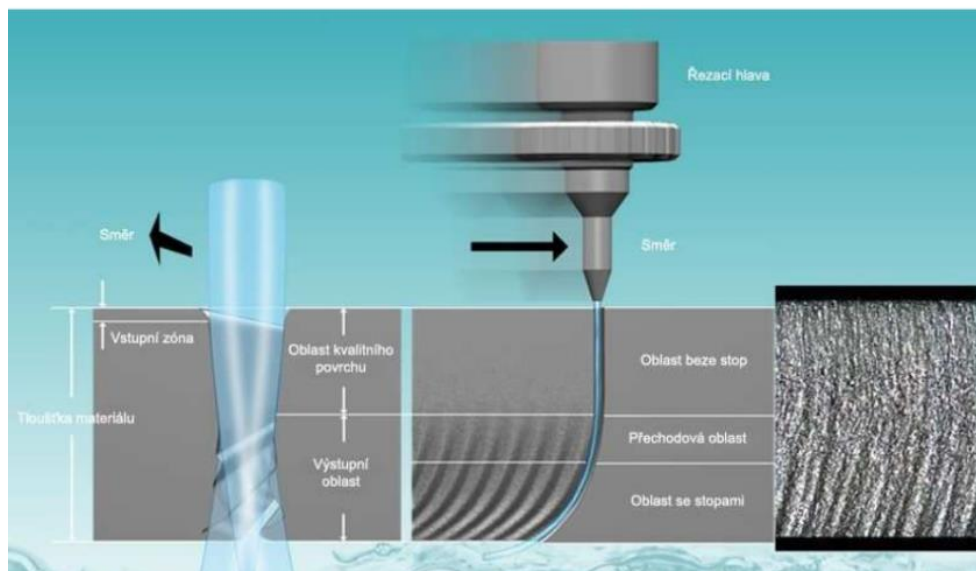
nám všechny hodnoty drsnosti R_a za každé řezné rychlosti spadají do stupně kvality Q1. Na grafu grafu 88 jsou viditelné výkyvy nejstenorodého zvyšování hodnot parametru drsnosti R_z , na řezné rychlosti. Tyto výkyvy mohou být způsobeny nehomogenní texturou povrchu a tím, že měříme jen určitou část povrchu, která nemusí obsahovat hlubší rýhy.

4.4.4 Vizualní kontrola

Vizuální metoda je základní a nejjednodušší metoda hodnocení kvality povrchu a je vhodná pro rychlé posouzení a selekci obrobků v případě přítomných viditelných vad nebo např. pro srovnání zkoumaného povrchu s vhodně zvolenými vzory, nicméně z důvodu malé přesnosti málo využívaná. Pro přesně stanovení a vyjádření drsnosti pomocí čísel je potřeba vhodných měřicích přístrojů [61].

U technologie řezání vodním paprskem je vizuální kontrola kvality, také jedna ze základních kontrol kvality řezu. Pomocí této kontroly je možné snadno a rychle zjistit jaké kvality povrchu řezu bylo dosaženo. Stupeň kvality Q1-Q5 u vizuální kontroly se určuje porovnáním vyříznutého vzorku s etanolem [4].

Morfologie řezné plochy má při dělení vodním paprskem specifický charakter, zobrazený na obr. 89.



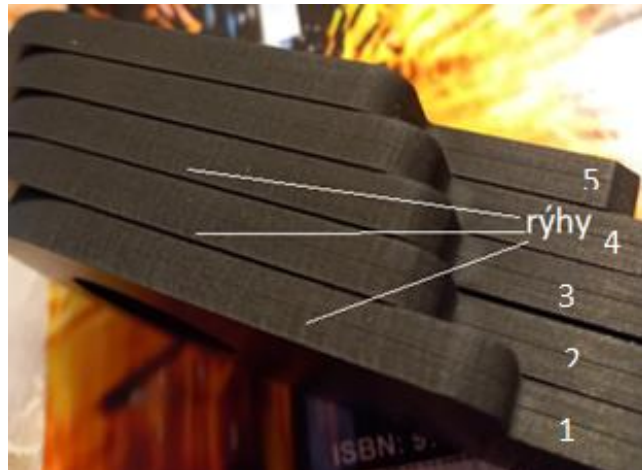
Obr. 89 Reliéf obrobeneho povrchu AWJ [62].

U vstupu do materiálu dochází k prvnímu kontaktu abrazivního vodního paprsku a začíná se mikroskopický úběr částic obrobku. Je charakteristická přijatelnou kvalitou obrobeneho plochy. Spodní plocha je místo kde AWJ opouští obráběný materiál. Vyznačuje se zpravidla zhoršenou kvalitou obrobeneho plochy [4].

Pruhy jsou vlastně vodní stopou, které se vyskytují nejvíce ve spodní části řezaného materiálu v důsledku ztráty kinetické energie AWJ, velké rychlosti posuvu abrazivní trysky, množství použitého abraziva. Přechodová oblast je horizontální hranice oddělující oblast beze stop a oblast se stopami. Se zvyšováním posuvu abrazivní hlavy se přechodová oblast posouvá směrem k vrchní ploše materiálu. Čím horší je kvalita obrobeneho plochy, tím jsou zřetelnější pruhy a horní oblast beze stop se zmenšuje. Je to způsobené změnou technologických parametrů abrazivního vodního paprsku, např. změnou rychlosti posuvu abrazivní trysky nebo změnou tlaku [4].



Obr. 90 Detailní pohled na řezanou plochu vzorků. Vzorky: 1-řezaný při 3000 mm/min, 2-řezaný při 2000 mm/min, 3-řezaný při 1000 mm/min, 4-řezaný při 600 mm/min, 5-řezaný při 300 mm/min.



Obr. 91 Detailní pohled na řezanou plochu vzorků. Vzorky: 1-řezaný při 3000 mm/min, 2-řezaný při 2000 mm/min, 3-řezaný při 1000 mm/min, 4-řezaný při 600 mm/min, 5-řezaný při 300 mm/min.

Jelikož jsou vzorky z uhlíkových vláken matné, není na první pohled na některých řezných plochách viditelný rozdíl. Při detailnějším pohledu (obr. 90, 91) nebo po přejetí prstem po řezaných plochách jsou již velmi dobře patrné rozdíly při změně řezné rychlosti. U vyšších řezných rychlostí lze pozorovat tzv. zpoždění paprsku, které je spojené s fenoménem rýh. U vzorků, které byly řezány řeznými rychlostmi 300 a 600 mm/min je výskyt striací minimální. U vzorků, které byly řezány řeznými rychlostmi 1000, 2000 a 3000 mm/min výrazně přibývá. Prokázalo se, že u této součásti by byla ideální rychlost řezání do 600 mm/min. Striace negativně ovlivňují rozměrovou přesnost i drsnost povrchu. Potvrdilo se, že s rostoucí řeznou rychlostí dochází ke zpoždění vodního paprsku, což dokazují rýhy na řezané ploše materiálu. Experimentem bylo prokázáno, že vyšší řezná rychlost znamená tedy zhoršenou kvalitu povrchu.

5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ

Největším plusem technologie řezání vodním paprskem v porovnání s jinými metodami dělení je proces řezání za studena. Tato technologie se používá tam, kde beztržkové, třískové a termické výrobní techniky poskytují z mechanicky anebo z fyzikálních důvodů neuspokojivé výsledky, popřípadě kde úplně selhávají. Na rozdíl od termických (tepelných) metod se pomocí vodního paprsku dají dělit všechny materiály bez toho, aby docházelo k jejich ovlivňování teplem a nemůže tedy docházet k vnitřnímu pnutí. Tato technika se velmi dobře hodí na vytváření řezů, vyznačující se mnohotvárností, na vytvoření ostrých úhlů, šikmých řezných hran a minimálních vnitřních rádiusů. Dosahovaná jakost a přesnost po řezání vodním paprskem je na takové úrovni, že mnohdy odpadají další technologické operace, které obvykle následují po konvenčních metodách výroby. Technologie řezání vodním paprskem si našla svoje místo ve strojírenském průmyslu a dokazuje to zvyšujícím se zájmem firem o tuto technologii [4].

Ekonomické vyhodnocení je zpracováno na základě kapitoly 3). Aplikace nekonvenční technologie abrazivního vodního paprsku na konkrétní kompozitní materiál. Jedná se o řezání součásti padformátoru na stroji MicroStep AquaCut 4001. 25WW.

U ekonomického vyhodnocení potřebujeme vědět vstupní hodnoty jako: pořizovací cena stroje, náklady na instalaci stroje, náklady na demontáž, likvidační hodnota, doba životnosti, efektivní časový fond stroje za rok, fixní hodinová sazba, cena polotvaru, cena polotvaru na jednu součást. Tyto hodnoty jsou získány od firem AWAC, spol. s.r.o., MSR Engines group a.s. a uvedeny v tab. 31.

Tab. 31 Vstupní hodnoty.

Parametr	Symbol	Hodnota
Pořizovací cena stroje	C_s	4 000 000 Kč
Náklady na instalaci stroje	N_i	150 000 Kč
Náklady na demontáž	N_d	100 000 Kč
Likvidační hodnota	L_h	800 000 Kč
Doba životnosti	Z	5 let
Efektivní časový fond stroje za rok	F_{ef}	6043 hod.
Fixní hodinová sazba	S_f	2000 Kč
Cena polotvaru	N_{pt}	2290 Kč

Výslednou cenu dvou součástí, které jsou vyříznuté v jednom pracovním cyklu stroje dvěma řezacími hlavami současně pak vypočítáme z následujících výpočtů:

Náklady na hodinu provozu stroje (5.1) [63]:

$$N_{hs} = \frac{C_s + N_i + N_d - L_h}{Z \cdot F_{ef}} + S_f \quad (5.1)$$

$$N_{hs} = \frac{4\,000\,000 + 150\,000 + 100\,000 - 800\,000}{5.6043} + 2000 = 2186,69 \text{ Kč. h}^{-1}$$

Kde:

N_{hs} [Kč. h⁻¹] - povrchová energie na rozhraní tuhé a plynné fáze,

C_s [Kč] - pořizovací cena stroje,

N_i [Kč] - náklady na instalaci stroje,

N_d [Kč] - náklady na demontáž,

L_h [Kč] - likvidační hodnota,

Z [rok] - doba životnosti,

F_{ef} [hod] - efektivní časový fond stroje za rok,

S_f [Kč] - fixní hodinová sazba.

Náklady na minutu provozu stroje (5.2) [63]:

$$N_{ms} = \frac{N_{hs}}{60} \quad (5.2)$$

$$N_{ms} = \frac{2186,69}{60} = 36,45 \text{ Kč. min}^{-1}$$

Kde:

N_{ms} [Kč. min⁻¹] – náklady na minutu provozu stroje,

N_{hs} [Kč. h⁻¹] – náklady na hodinu provozu stroje.

Náklady na vyříznutí dvou kusů (5.3) [63]:

$$N_{ks} = N_{ms} \cdot t_c \quad (5.3)$$

$$N_{ks} = 36,45 \cdot 3,91 = 142,52 \text{ Kč}$$

Kde:

N_{ks} [Kč] – náklady na vyříznutí dvou kusů,

N_{ms} [Kč. min⁻¹] – náklady na minutu provozu stroje,

t_c [min] – čas řezu.

Celková cena dvou kusů (5.4) [63]:

$$C_{ks} = N_{ks} + N_{pt} \quad (5.4)$$

$$C_{ks} = 142,52 + 2490 = 2432,52 \text{ Kč}$$

Kde:

C_{ks} [Kč] – celková cena jednoho kusu,

N_{ks} [Kč] – náklady na vyříznutí dvou kusů,

N_{pt} [Kč] – cena polotvaru.

Z výše uvedených výpočtů vyplývá, že náklady, při nichž dochází k současnému vyříznutí dvou součástí z jednoho polotvaru pomocí dvou řezacích hlav vychází na 142,52 Kč. Přičemž cena dvou kusů, po započítání ceny polotvaru je 2432,52 Kč, tudíž 1216,26 Kč za jeden.

6 DISKUZE

Experiment byl provedený v rámci 4. kapitoly této diplomové práce. Vzorky byly řezány na stroji MicroStep AquaCut 1501.20 W a následně byly podrobeny: rozměrové přesnosti, kuželovitosti, drsnosti povrchu a vizuální kontrole.

Kvůli požadavkům na přesné výsledky rozměrové přesnosti měření bylo použito výkonného CNC souřadnicově měřící stroje Mitutoyo CRYSTA-Apex S 7106. Tento stroj byl poskytnut k měření ve firmě KOVO-PLAZMA s.r.o. Výstupy z tabulek a grafů ukazují, že zde byla nastavena špatně korekce dávkování abraziva, jelikož se naměřené hodnoty výrazně liší od hodnot jmenovitých. Špatná korekce je zapříčiněna chybou a nepozorností řezače (obsluhy stroje). Po prvním vyřezaném vzorku, který byl řezán řeznou rychlostí 300 mm/min si obsluha stroje měla přeměřit rozměry vzorku. K tomuto nedošlo, a tudíž všechny ostatní vzorky byly řezány stejnou korekcí. Pro každý vzorek měla být nastavena samostatně korekce dávkování abraziva při dané řezné rychlosti, pak by bylo dosaženo přesnějších jmenovitých hodnot.

Naměřené výsledky z rozměrové přesnosti nám posloužily pro výpočet kuželovitosti měřených vzorků. Výsledky vypočítané kuželovitosti na měřených vzorcích odpovídají teoretickým předpokladům. Zvyšováním řezné rychlosti se zvětšuje rozdíl rozměrů měřených u horní a dolní plochy vzorku. Nejmenší velikosti úkosu bylo dosaženo u řezné rychlosti 300 mm/min a nejvyšší hodnoty úkosu při řezné rychlosti 3000 mm/min. Kritická hodnota úkosu pro řezání vodním paprskem nad $1,5^\circ$ nebyla překročena.

Měření drsnosti vyřezaných vzorků proběhlo v prostorách VUT FSI na kompaktním přenosném drsnoměru TR100 Surface Roughness Tester. Zde se taktéž prokázal teoretický předpoklad, že zvyšováním řezné rychlosti se zvyšuje drsnost povrchu. Na dolním okraji povrchu řezu se dosahuje horších hodnot drsnosti povrchu než na horním, snižováním kinetické energie paprsku. Bylo naměřeno vyšších hodnot parametrů drsnosti, než se předpokládalo. Tyto výkyvy mohou být způsobeny nehomogenní texturou povrchu a tím, že měříme jen určitou část povrchu, která nemusí obsahovat hlubší rýhy. Pro více vypovídající hodnoty měření by bylo nutné měřit vzorek na více místech nebo zvolit použití 3D scanneru. Scanner by umožnil zhodnotit celoplošně drsnost povrchu na celé ploše.

Jako poslední část zhodnocení proběhla vizuální kontrola. Jedná se o nejjednodušší metoda hodnocení kvality povrchu a je vhodná pro rychlé posouzení viditelných vad. Řezané vzorky jsou matné, jelikož jsou z uhlíkových vláken. U vzorků řezané nižšími řeznými rychlostmi (300, 600 mm/min) jsou rýhy znatelné jen při přejetí řezané plochy prstem. U vzorků řezanými rychlostmi 1000, 2000 a 3000 mm/min strií výrazně přibývá a jsou již viditelné pouhým okem.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se primárně zabývá technologií řezání vodním paprskem a kompozitními materiály. Práce se v úvodu zabývá rozborem jednotlivých druhů kompozitních materiálů. Je zde uvedeno, co to vlastně kompozitní materiál je, z kterých materiálů může být vytvořen. Popisuje nejdůležitější dvě části každého kompozitního materiálu, a to matrice a vyztužující fázi. Rozebírají se také možnosti výroby kompozitních materiálů s matricí v tekutém i tuhém stavu. Klasifikace kompozitů nahlíží na kritéria, podle kterých se dělí každý kompozit, jsou zde také rozděleny některé základní druhy kompozitů a jejich použití. Na závěr kapitoly je nastíněno na několik kompozitů s kterými se můžeme potkat v každodenním životě.

Následující kapitola je rešerší na téma: Možnosti obrábění kompozitních materiálů a dostupné technologie. Jsou zde podrobně rozebrány jednotlivé technologie obrábění kompozitních materiálů a problémy spojené s tímto zpracováním. Je zde také představeno několik nástrojů z různých materiálů a vhodných geometrií pro obrábění kompozitů. Kompozitní materiály lze také obrábět nekonvenčními technologiemi jako např. řezat laserem, elektroerozivně obrábět, řezat vodním paprskem. Vodní paprsek je nejpoužívanější nekonvenční technologie při obrábění kompozitů, hlavně kvůli jeho univerzálnosti řezání téměř všech kompozitů.

Třetí kapitola vznikla ve spolupráci firmy MSR Engines group a.s., která zadala zakázku na řezání součásti padformátoru tvořeného z prepregu. Řezání proběhlo ve společnosti AWAC, spol. s.r.o. na stroji se dvěma řezacími hlavami. Ve výrobní dávce bylo řezáno 64 ks padformátorů, řezací strategie a řezné podmínky určil programátor za podpory CAM programu ASPER. V této kapitole je popsán celý postup výroby padformátoru od přijetí kontury součásti až po výslednou montáž k surfovacímu prknu a vázání.

Čtvrtá kapitola byla věnována provedením experimentu na vzorovém dílu z kompozitního materiálu. Zde bylo vyřezáno pět vzorků zvolené kontury při pěti řezných rychlostech. Vzorky byly ze zbytkového materiálu o rozměrech 520x300x6 mm. Jednalo se o materiál z jednosměrných uhlíkových vláken. Vyhodnocení vzorků bylo provedeno na rozměrovou přesnost, kuželovitost, drsnost povrchu a také byly podrobeny vizuální kontrole. Zvyšování řezné rychlosti jasně prokázalo zhoršení všech zjišťovaných hodnot. Toto zjištění jednoznačně potvrzuje teoretické předpoklady. Na tuto kapitolu byla také zpracována diskuze na předcházející straně.

V poslední kapitole je zpracováno technicko-ekonomické vyhodnocení. Ekonomické vyhodnocení bylo počítáno na základě kapitoly č. 3 (Aplikace nekonvenční technologie abrazivního vodního paprsku na konkrétní kompozitní materiál). Pomocí vstupních hodnot získaných od společnosti AWAC byly vypočítány, náklady na hodinu provozu stroje, náklady na minutu provozu stroje, náklady na vyříznutí dvou kusů a konečná cena vyříznuté součásti. Jelikož stroj MicroStep AquaCut 4001.25WW disponuje dvěma řezacími hlavami, které nám zvyšují produktivitu, tak nám celková cena jedné součásti vyšla 1216,26 Kč.

Přes nesporný technologický pokrok dosažený v posledních letech v oblasti aplikací vysokorychlostních abrazivních paprsků existuje ve světě neustálý tlak na další vývoj technologií využívajících pouze čisté vodní paprsky. Výzkumné týmy se snaží o jejich zdokonalení tak, aby se ještě lépe přizpůsobily stále náročnějším ekologickým požadavkům, dále se zvyšovala jejich výkonnost a současně bylo jejich použití výhodnější také ekonomicky [64].

Kompozitům vzhledem k jejich jedinečným vlastnostem patří budoucnost. Prokazuje to nejen úspěch již hotových výrobků s kompozity, ale i výsledky současného výzkumu a vývoje nových kompozitních struktur a jejich výrobních technologií, které podstatně rozšiřují využití kompozitů s pozoruhodnými technickými parametry potvrzujícími, že tento obor je v permanentním rozvoji. Ten bychom neměli v zájmu našeho průmyslu podcenit [65].

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Míšek. *Polymery, keramika, kompozity*. Brno : Vysoké učení technické, 1993, 155 s. ISBN 80-214-0521-X.
- [2] MÍŠEK, Bohumil. *Kompozity*. Brno : Technický dozorčí spolek - Sekce materiálů a svařování, 2003, 1993, 81 s. ISBN 80-903386-0-7.
- [3] RICHARD, Bareš. *Kompozitní materiály*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1988, 325 s.
- [4] KMEC, Ján. *Delenie materiálov*. Vyd. 2. [Košice]: Technická univerzita v Košiciach, 2014, 325 s. ISBN 978-80-553-1872-1.
- [5] *Železobeton* [online]. [cit.2022-05-13].
Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BDDelezobeton>
- [6] *Životnost a odolnost čepelí* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.sportobchod.cz/technology/by-letter/c>
- [7] *Sjezdové lyže Ox Lobotomy + vázání Marker Free ten* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.lyze-radotin.cz/sjezdove-lyze-ox-lobotomy-vazani-marker-free-ten?>
- [8] *KOMPOZITY NA KONCI SVÉHO ŽIVOTA* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.materialtimes.com/materialy/kompozity/kompozity-na-konci-sveho-zivota.html>
- [9] HUMÁR, ANTON, *Obrábění vláknově vyztužených kompozitů, teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení v oboru strojírenská technologie*, Brno : Vutium, 2004. sv. 143. ISBN 80-214-2740-X.
- [10] Schorník, Václav, *Frézování rovinných ploch a drážek při obrábění kompozitního materiálu*. Plzeň, 2012/2013. 47 s. Bakalářská práce. ZČU Plzeň
- [11] R. Šebela, *Obrábění těžkoobrobitelných materiálů*, VUT v Brně, 2012
- [12] SÝKORA, Radek, *Obrábění kompozitních materiálů*. Plzeň, 2011/2012. 73 s. Bakalářská práce. ZČU Plzeň.
- [13] *Obrábět kompozity je umění* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/obrabet-kompozity-je-umeni_20078.html
- [14] *Frézování: Frézování čelní frézou* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://digit.isste.cz/op-hs/assets/1969656131.%20Frezovani.pdf>
- [15] *Nejnovější vrtáky Sandvik Coromant nabízejí vyšší spolehlivost a úroveň výkonnosti* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.zakazka.cz/nejnovejsi-vrtaky-sandvik-coromant-nabizeji-vyssi-spolehlivost-a-uroven-vykonnosti/>
- [16] *Problémy při obrábění kompozitních materiálů* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/problemy-pri-obrabeni-kompozitnich-materialu>
-

-
- [17] *Nástroje pro obrábění kompozitních materiálů* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-obrabeni-kompozitnich-materialu>
- [18] TEUN, V, ASTEN. Frézování a vrtání houževnatých materiálů [online]. [vid. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/novinka/frezovani-avrtani-houzevnatych-materialu.html>
- [19] Sýkora, R., *Obrábění kompozitních materiálů, ZČU v Plzni*, 2012
- [20] *Anbieter für "PKD Wendeschneidplatten / PKD Wendeplatten" - Seite 1* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://markt.technik-einkauf.de/anbieter-haendler-hersteller-lieferant/pkd-wendeschneidplatten-pkd-wendeplatten/>
- [21] *Anbieter für "PKD Wendeschneidplatten / PKD Wendeplatten" - Seite 1* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://markt.technik-einkauf.de/anbieter-haendler-hersteller-lieferant/pkd-wendeschneidplatten-pkd-wendeplatten>
- [22] *Změny v obrábění kompozitních materiálů* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/zmeny-v-obrabeni-kompozitnich-materialu>
- [23] *YG-1 nabízí „nejúčinnější řešení pro obrábění dílů z kompozitních materiálů“* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: https://www.yg1.kr/cze/newsmedia/pressroom_view.asp?id=3881&page=1&searchColumn=&searchKeyword=
- [24] *MONOLITNÍ KARBIDOVÉ FRÉZY PRO OBRÁBĚNÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.secotools.com/article/67312?language=cs>
- [25] *Více než obrábění kovů...* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/47607>
- [26] *Composite Machining Solutions* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/newarticles.aspx/lang/en/newarticleid/4217>
- [27] *Sandvik CoroDrill 854 y CoroDrill 856* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <http://www.interempresas.net/Hardware/Companies-Products/Product-Drill-bits-for-drilling-Sandvik-CoroDrill-452-80160.html>
- [28] *The Composite Challenge* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://shopmetaltech.com/machining-technology/cutting-tools/the-composite-challenge.html>
- [29] BARCAL, Jaroslav. *Nekonvenční metody obrábění*. Praha : České vysoké učení technické, 1989, 122 s.
- [30] *Obrábění: Řezání laserem* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD>
- [31] *Obrábění laserem: Řezání a vyřezávání* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1423>
-

-
- [32] *Řezání vodním paprskem* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%98ez%C3%A1n%C3%AD_vodn%C3%ADm_paprskem
- [33] *O SPOLEČNOSTI* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.awac.cz/o-spolecnosti/>
- [34] [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.energyglobe.cz/temata-a-novinky/-a94809--TVVCyd9E/martin-sula-jetsurf-jsme-jedna-z-mala-firem-na-svete-ktera-dokaze-vyrobic-cely-dopravni-prostredek>
- [35] *O nás* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.msengines.com/about>
- [36] *Řezání vodním paprskem: Průběh řezání vodním paprskem* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.gumex.cz/sluzby/profilu-a-vyroba-tesneni-75/rezani-vodnim-paprskem-46>
- [37] KRAJNÝ, Zdenko. *Vodný lúč v praxi - WJM*. Bratislava: 1998. 195s. ISBN 80-8057-091-4.
- [38] *Řezání vodním paprskem: Průběh řezání vodním paprskem* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.gumex.cz/sluzby/profilu-a-vyroba-tesneni-75/rezani-vodnim-paprskem-46>
- [39] Bit Tooth Energy [online]. 28.12.2012 [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: http://bittooth.blogspot.com/2012_12_01_archive.html
- [40] Scandiavian WaterJet: Industrial WaterJet [online]. 2014 [vid. 2014-04-01]. Dostupné z: <http://www.swa.se/page/132/industrial-waterjet.aspx>
- [41] WATERJETS. Waterjet abrasives. [online]. [vid. 2014-03-05]. Dostupné z: http://waterjets.org/index.php?option=com_content&task=view&id=85&Itemid=55
- [42] ŠŮŇ, Roman a Emil SPIŠÁK. *Prehľad najčastejšie používaného abrazívneho materiálu v procese rezanie hydroabrazívnym lúčom*. [online]. [vid. 2015-03-16]. Dostupné z: <http://www.it-strojar.sk/articles/00031.pdf>
- [43] OSIČKA, Karel a Milan KALIVODA. *OPUS – Vzdělanostní síť 1 výrobním technologiím. Nekonvenční technologie obrábění*. Brno, 2012. Dostupné z: <http://opus.fme.vutbr.cz/dokumenty/moduly/Osicka.pdf>
- [44] *Prepreg* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://czwiki.cz/Lexikon/Prepreg>
- [45] *R&G® Uhlíková tkanina TORAYACA™ T700SC - kepr 2/2 12K 800tex, 3,7x3,7 ok/cm, 600 g/m2, š. 125 cm* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.element-shop.cz/uhlikove-tkaniny-prizove--platno--kepr/r-g-uhlikova-tkanina-ttorayaca--t700sc-kepr-2-2-12k-800tex--3-7x3-7-ok-cm--600-g-m2--s--125-cm/>
-

-
- [46] *E- skelné jednosměrné tkaniny* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://skolil.cz/materialy-pro-vyrobu-forem-modelu-pripravku/vyroba-tepelne-odolnych-forem/13-materialy-pro-vyrobu-kompozit/tkaniny?layout=blog&lang=cz&start=5>
- [47] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [48] *Asper Basic* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.microstep.eu/software/asper/asper-basic/>
- [49] *JETSURFING: SURFOVÁNÍ BEZ ZÁVISLOSTI NA VLNÁCH ČI VĚTRU* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://snow.cz/clanek/5972-jetsurfing-surfovani-bez-zavislosti-na-vlnach-ci-vetru>
- [50] *Unidirectional Carbon Fiber Sheet Made By T300 T700 Carbon Fiber Material* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.jinjiuyi.net/carbon-fiber-sheet-material/unidirectional-carbon-fiber-sheet-t300-t700-material.html>
- [51] *How accurate is waterjet cutting?* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.jinjiuyi.net/carbon-fiber-sheet-material/unidirectional-carbon-fiber-sheet-t300-t700-material.html>
- [52] *Výhody obrábění vodním paprskem* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.flowwaterjet.cz/Prectete-si-vice/Vyhody-vodniho-paprsku.aspx#versatility>
- [53] *MITUTOYO CRYSTA-Apex S 7106 Coordinate Measuring Machine (700mm, 1000mm, 600mm)* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://emin.com.mm/mitutoyo191-254-10-mitutoyo-crysta-apex-s-7106-coordinate-measuring-machine-700mm-1000mm-600mm-myanmar-76573/pr.html>
- [54] *CRYSTA-APEX S SERIES* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: https://www.mitutoyo.com/webfoo/wp-content/uploads/CRYSTA_ApexS-_2202.pdf
- [55] *CRYSTA-Apex S 7106* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.electronicdatasheets.com/manufacturers/mitutoyo/parts/crystaapex-s-7106>
- [56] *Svarovani* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: HLAVATÝ, Ivo. VŠB – Technická univerzita Ostrava [online] [cit.2011-02-28]. Dostupné z WWW: <<http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-17.pdf>>
- [57] *LAVAP Water Cutting*, [online]. 2008 [cit. 2011-03-22]. Dostupné z WWW: <<http://www.lavap.cz/?web=princip-deleni-vodnim-proudem>>
- [58] *Měření drsnosti povrchu - Drsnoměry Profiloměry: Drsnost povrchu – základní pojmy a vysvětlení veličin Ry, Ra, Rz, Rmax* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: https://www.proinex.cz/cs/blog/10_mereni-drsnosti-povrchu
- [59] *TR-100 Handheld Surface Roughness Tester* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.checkline.eu/prod/surface-roughness-testers/tr-100>
- [60] *Surface Roughness Tester TR100* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <http://www.tradecombine.com/download/TR100.pdf>
-

- [61] DOSTÁL, František. Drsnost obrobených ploch. 1. vyd. Praha: SNTL, 1962.
- [62] *PRINCIP ŘEZÁNÍ VODNÍM PAPERSEM* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <http://www.rezani-cnc.cz/princip-rezani-vodnim-paprskem.html>
- [63] PROKOP, Jaroslav. Prezentace určené k podpoře výuky předmětu Vybrané statě z obrábění. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [64] *Pulzující vodní paprsek – technologie budoucnosti?* [online]. [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2013/cislo-12/pulzujici-vodni-paprsek-technologie-budoucnosti.html>
- [65] *Kompozity zdroj stále nevyčerpatelných konstrukčních možností* [online]. [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/kompozity-zdroj-stale-nevyčerpatelných-konstrukčních-možností_11466.html

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
Al	Hliník
Ag	Zlato
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý
Al ₄ C ₃	Kabrid hliníku
BN	Nitrid boritý
Be	Beryllium
BeO	Oxid berilnatý
B ₂ O ₃	Oxid boritý
B ₄ C	Kabrid boru
B ₆ C	Kabrid boru
C	Uhlík
CAM	Computer aided manufacturing
CFRP	Carbon-fiber-reinforced polymer (uhlíková vlákna)
CNC	Computer numerical control
CO ₂	Oxid uhličitý
CVD	Chemical vapour deposition
CaO	Oxid vápenatý
CdO	Oxid kademnatý
Co	Kobalt
Cu	Měď
Cr	Chrom
CaCO ₃	Uhličitan vápenatý
CrO ₂	Oxid chromičitý
Cr ₂ O ₃	Oxid chromitý
EP	Epoxydová pryskyřice
FRP	Fibre-reinforced plastic (vláknový kompozit)
Fe	Železo
HfO ₂	Oxid hafničitý
Mg	Horčík

Mo	Molybden
MgO	Oxid hořečnatý
NC	Numerical control
Ni	Nikl
Na ₂ O	Oxid sodný
PKD	Polykrystalický diamant
Pb	Olovo
SK	Slinutý karbid
Si	Křemík
SiC	Karbid křemíku
SiO ₂	Oxid křemičitý
Si ₃ N ₄	Nitrid křemičitý
SnO ₂	Oxid cíničitý
Ti	Titan
TiC	Karbid titanu
TiN	Nitrid titanu
TiAlN	Titan aluminium nitrid
ThO ₂	Oxid thoričitý
TiB ₂	Titanium diboride
UV	Ultrafialové záření
W	Wolfram
Y ₂ O ₃	Oxid yttritý
ZnO	Oxid zinečnatý
ZrB ₂	Zirconium diboride
ZrO ₂	Oxid zirkoničitý
spol.	společnost
s.r.o.	Společnost s ručením omezením
2D	Dvourozměrný prostor
3D	Třírozměrný prostor

Symbol	Jednotka	Popis
A	[%]	Tažnost
C_{ks}	[Kč]	Celková cena jednoho kusu
C_s	[Kč]	Požizovací cena stroje
d_s	[mm]	Velikost částice
d_v	[mm]	Průměr vlákna
E	[Pa]	Modul pružnosti v tahu
E/ρ	[Pa/kg.m ³]	Měrný modul pružnosti
F_{ef}	[hod]	Efektivní časový fond stroje za rok
h	[mm]	Tloušťka materiálu
KIC	[Pa.m ^{1/2}]	Lomová houževnatost
L_h	[Kč]	Likvidační hodnota
L_{vst}	[mm]	Vzdálenost na horní řezné hraně
L_{vys}	[mm]	Vzdálenost na dolní řezné hraně
l_v	[mm]	Délka vlákna
N_d	[Kč]	Náklady na demontáž
N_i	[Kč]	Náklady na instalaci stroje
N_{hs}	[Kč.h ⁻¹]	Náklady na hodinu provozu stroje
N_{ks}	[Kč]	Náklady na vyříznutí dvou kusů
N_{ms}	[Kč.min ⁻¹]	Náklady na minutu provozu stroje
N_{pt}	[Kč]	Cena polotvaru
R_m	[Mpa]	Pevnost v tahu
R_m/ρ	[Pa/kg.m ³]	Měrná pevnost
S_f	[Kč]	Fixní hodinová sazba
t_c	[min]	Čas řezu
T_g	[°C]	Teplota skelného přechodu
T_m	[°C]	Teplota tání
V	[%]	Objem výztuže
Z	[rok]	Doba životnosti
α	[°]	Úhel kuželovitosti

ε	[-]	Poměrné prodloužení
θ	[°]	Úhel orientace vláken
λ_s	[mm]	Mezi částicová vzdálenost
ϑ	[°]	Úhel smáčení
ρ	[Kg.m ³]	Hustota
σ	[Pa]	Napětí
σ_{kp}	[J]	Povrchová energie na rozhraní kapaliny a plynu
σ_{tk}	[J]	Povrchová energie na rozhraní tuhé a kapalně fáze
σ_{tp}	[J]	Povrchová energie na rozhraní tuhé a plynné fáze

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Program na měření vzorku pomocí stroje Mitutoyo CRYSTA-Apex S 7106.
- Příloha 2 Protokol o měření vzorku řeznou rychlostí 300 mm/min.
- Příloha 3 Protokol o měření vzorku řeznou rychlostí 600 mm/min.
- Příloha 4 Protokol o měření vzorku řeznou rychlostí 1000 mm/min.
- Příloha 5 Protokol o měření vzorku řeznou rychlostí 2000 mm/min.
- Příloha 6 Protokol o měření vzorku řeznou rychlostí 3000 mm/min.
- Příloha 7 Výkres součásti: Zkušební vzorek (2022-DP-200706-01).
- Příloha 8 Výkres součásti: Padformátor (2022-DP-200706-02).

Program na měření vzorku pomocí stroje Mitutoyo CRYSTA-ApexS7106

1	Změna sestavy doteku	Číslo sestavy doteku = 1
2	Změna doteku	1
3	Rovina	Rovina (1) Gauss
4	Manuální měřený bod	Počet bodů = 3
5	Element hotov	
6	Kružnice	Kružnice (1) Gauss
7	Manuální měřený bod	Počet bodů = 3
8	Element hotov	
9	Přímka	Přímka (1) Gauss
10	Manuální měřený bod	Počet bodů = 2
11	Element hotov	
12	Prostorové vyrovnání	Rovina (1) Rovina XY, Počátek v elementu
13	Určení nulového bodu	Kružnice (1) XY
14	Osově vyrovnání přes osu	Přímka (1) Osa X
15	CNC parametry a CNC zap.	Přejezdová rychlost = 50.000 Rychlost měření = 10.000 Bezpečnostní vzdálenost = 3.000
16	Přejet se strojem Absolutní pojezd	X = 0.000 Y = -30.000 Z = 5.000
17	Přejet se strojem Absolutní pojezd	X = 0.000 Y = -18.500 Z = 5.000
18	Rovina	Rovina (2) Gauss
19	Měřit bod CNC Dotykový bod se směrem	X = 0.000 Y = -18.500 Z = 0.000 Úhel X = 90:00:00 Úhel Y = 90:00:00 Úhel Z = 180:00:00
20	Měřit bod CNC Dotykový bod se směrem	X = 18.500 Y = 0.000 Z = 0.000 Úhel X = 90:00:00 Úhel Y = 90:00:00 Úhel Z = 180:00:00
21	Měřit bod CNC Dotykový bod se směrem	X = 0.000 Y = 18.500 Z = 0.000 Úhel X = 90:00:00 Úhel Y = 90:00:00 Úhel Z = 180:00:00
22	Měřit bod CNC Dotykový bod se směrem	X = -30.000 Y = 0.000 Z = 0.000 Úhel X = 90:00:00 Úhel Y = 90:00:00 Úhel Z = 180:00:00
23	Měřit bod CNC Dotykový bod se směrem	X = -60.000 Y = 7.000 Z = 0.000 Úhel X = 90:00:00 Úhel Y = 90:00:00 Úhel Z = 180:00:00

24	Měřit bod CNC Dotykový bod se směrem	X = -60.000 Y = -7.000 Z = 0.000 Úhel X = 90:00:00 Úhel Y = 90:00:00 Úhel Z = 180:00
25	Element hotov	
26	Přejet se strojem Absolutní pojezd	X = 0.000 Y = 0.000 Z = 5.000
27	Přejet v jedné ose	Osa Z = -3.000
28	Kružnice	Kružnice0 (2) Gauss
29	Automatické měření kružnice	Počet bodů = 6 Rovina projekce = Rovina XY X = 0.000 Y = 0.000 Z = -3.000 Průměr = 25.500
30	Element hotov	
31	Přejet se strojem Absolutní pojezd	X = 0.000 Y = 0.000 Z = 5.000
32	Přejet se strojem Absolutní pojezd	X = -40.000 Y = -30.000 Z = 5.000
33	Přejet v jedné ose	Osa Z = -3.000
34	Přímka	PřímkaX (2) Gauss
35	Automatické měření přímky	Počet bodů = 6 Rovina projekce = Rovina XY X = -40.000 Y = -30.000 Z = -3.000, Úhel = 0:00:00
36	Element hotov	
37	Prostorové vyrovnání	Rovina (2) Rovina XY, Počátek v elementu
38	Určení nulového bodu	Kružnice0 (2) XY
39	Osové vyrovnání přes osu	PřímkaX (2) Osa X
40	Přejet v jedné ose	Osa Z = -1.500
41	Kontura	Kontura (1) Gauss
42	Skenování CNC se spín.dotekem	
43	Element hotov	
44	Nově přepočítat z paměti Přímka	Přímka1 (3) Kontura (1); Rovina XY
45	Nově přepočítat z paměti Přímka	Přímka2 (4) Kontura (1); Rovina XY
46	Vzdálenost	Vzdálenost (1)
47	Tolerance - vzdálenost Vzdálenost (1)	Vzdálenost 50.000 0.300 -0.300 >> #1_1

48	Nově přepočítat z paměti Kružnice	Kružnice1 (3) Kontura (1); Rovina XY
49	Tolerance - Kružnice Kružnice1 (3)	Rádus 25,000 0,300 -0,300 >> #2_1
50	Min. a max. z kontury Bod	Kontura (1) Bod1 (1); Max. 1. osa
51	Nově přepočítat z paměti Přímka	Přímka3 (5) Kontura (1); Rovina XY
52	Vzdálenost	Vzdálenost (2)
53	Tolerance - Vzďálenost Vzdálenost (2)	Vzdálenost 100,000 0,300 -0,300 >> #3_1
54	Přejet se strojem Absolutní pojezd	X = 0,000 Y = -30,000 Z = -3,000
55	Kontura	Kontura (2) Gauss
56	Skenování CNC se spín.dotekem	
57	Element hotov	
58	Nově přepočítat z paměti Přímka	Přímka-3_1 (6) Kontura (2); Rovina XY
59	Nově přepočítat z paměti Přímka	Přímka-3_2 (7) Kontura (2); Rovina XY
60	Vzdálenost	Vzdálenost (3)
61	Tolerance - Vzďálenost Vzdálenost (3)	Vzdálenost 50,000 0,300 -0,300 >> #1_2
62	Nově přepočítat z paměti Kružnice	Kružnice2 (4) Kontura (2); Rovina XY
63	Tolerance - Kružnice Kružnice2 (4)	Rádus 25,000 0,200 -0,200 >> #2_2
64	Min. a max. z kontury Bod	Kontura (2) Bod2 (2); Max. 1. osa
65	Nově přepočítat z paměti Přímka	Přímka-3_3 (8) Kontura (2); Rovina XY
66	Vzdálenost	Vzdálenost (4)
67	Tolerance - Vzďálenost Vzdálenost (4)	Vzdálenost 100,000 0,300 -0,300 >> #3_2
68	Přejet se strojem Absolutní pojezd	X = 0,000 Y = -30,000 Z = -4,500
69	Kontura	Kontura (3) Gauss
70	Skenování CNC se spín.dotekem	

71	Element hotov	
72	Nově přepočítat z paměti Přímka	Přímka-4,5_1 (9) Kontura (3); Rovina XY
73	Nově přepočítat z paměti Přímka	Přímka-4,5_2 (10) Kontura (3); Rovina XY
74	Vzdálenost	Vzdálenost (5)
75	Tolerance - Vzđálenost Vzdálenost (5)	Vzdálenost 50.000 0.300 -0.300 >> #1_3
76	Nově přepočítat z paměti Kružnice	Kružnice3 (5) Kontura (3); Rovina XY
77	Tolerance - Kružnice Kružnice3 (5)	Rádus 25.000 0.200 -0.200 >> #2_3
78	Min. a max. z kontury Bod	Kontura (3) Bod3 (3); Max. 1. osa
79	Nově přepočítat z paměti Přímka	Přímka-4,5_3 (11) Kontura (3); Rovina XY
80	Vzdálenost	Vzdálenost (6)
81	Tolerance - Vzđálenost Vzdálenost (6)	Vzdálenost 100.000 0.300 -0.300 >> #3_3
82	Přejet se strojem Absolutní pojezd	X = 0.000 Y = -30.000 Z = 5.000
83	Přejet se strojem Absolutní pojezd	X = 0.000 Y = 0.000 Z = 5.000
84	Přejet v jedné ose	Osa Z = -1.500
85	Kružnice	Kružnice25_1 (6) Gauss
86	Automatické měření kružnice	Počet bodů = 6 Rovina projekce = Rovina XY X = 0.000 Y = 0.000 Z = -1.500 Průměr = 25.000
87	Element hotov	
88	Tolerance - Kružnice Kružnice25_1 (6)	Průměr 25.000 0.200 -0.200 >> #4_1
89	Učitelné příkazy grafiky	
90	Tolerance Kruhovitost	Element = Kružnice25_1 (6) Šířka tolerance = 0.100 >> #5_1
91	Přejet se strojem Absolutní pojezd	X = 0.000 Y = 0.000 Z = -3.000
92	Kružnice	Kružnice25_2 (7) Gauss
93	Automatické měření kružnice	Počet bodů = 6 Rovina projekce = Rovina XY X = 0.000 Y = 0.000 Z = -3.000 Průměr = 25.000

94	Element hotov	
95	Tolerance - Kružnice Kružnice25_2 (7)	Průměr 25.000 0.200 -0.200 >> #4_2
96	Tolerance Kruhovitost	Element = Kružnice25_2 (7) Šířka tolerance = 0.100 >> #5_2
97	Přejet se strojem Absolutní pojezd	X = 0.000 Y = 0.000 Z = -4.500
98	Kružnice	Kružnice25_3 (8) Gauss
99	Automatické měření kružnice	Počet bodů = 6 Rovina projekce = Rovina XY X = 0.000 Y = 0.000 Z = -4.500 Průměr = 25.000
100	Element hotov	
101	Tolerance - Kružnice Kružnice25_3 (8)	Průměr 25.000 0.200 -0.200 >> #4_3
102	Tolerance Kruhovitost	Element = Kružnice25_3 (8) Šířka tolerance = 0.100 >> #5_3
103	Přejet se strojem Absolutní pojezd	X = 0.000 Y = 0.000 Z = 100.000
104	Přejet se strojem Absolutní pojezd	X = 0.000 Y = 100.000 Z = 100.000
105	Spojovací element Válec	Válec (1); Gauss Naměřené body; Bez projekce
106	Podprogram	Ukládání Knihovna = Ano (Celkový)

Příloha 2

Protokol o měření vzorku řeznou rychlostí 300 mm/min

KOVO-PLAZMA s.r.o.		PROTOKOL O MĚŘENÍ MITUTOYO CRYSTA-APEX S 7106				KOVO-PLAZMA s.r.o. Brněnská 537 664 42 Modřice e-mail: obchod@kovoplazma.cz www.kovoplazma.cz			
Výrobek	Projekt				Zakázka				
Výkres	1				Průvodka				
Firma	Škola				Číslo kusu	300			
Název	Kovo Plazma				Měří	Jakub Chromý			
Datum / Čas	19.04.2022 / 11:28				Poz.				
	Pos. č.	Rádek č. Elm. č.	Jméno elementu Charakteristika	Jm. hodnota	HT DT	Naměřeno	Odhylka Překročenítol.	Grafika	
	1_1	47 1	Vzdálenost Vzdálenost V	50.000	0.300 -0.300	49.572	-0.428 -0.128		
	1_2	61 3	Vzdálenost Vzdálenost XY ST	50.000	0.300 -0.300	49.541	-0.459 -0.159		
	1_3	75 5	Vzdálenost Vzdálenost XY S	50.000	0.300 -0.300	49.504	-0.496 -0.196		
	2_1	49 3	Kružnice1 Rádus	25.000	0.200 -0.200	24.744	-0.256 -0.056		
	2_2	63 4	Kružnice2 Rádus	25.000	0.200 -0.200	24.730	-0.270 -0.070		
	2_3	77 5	Kružnice3 Rádus	25.000	0.200 -0.200	24.718	-0.282 -0.082		
	3_1	53 2	Vzdálenost Vzdálenost XY V	100.000	0.300 -0.300	99.773	-0.227		
	3_2	67 4	Vzdálenost Vzdálenost XY ST	100.000	0.300 -0.300	99.752	-0.248		
	3_3	81 6	Vzdálenost Vzdálenost XY S	100.000	0.300 -0.300	99.718	-0.282		
	4_1	88 6	Kružnice25_1 Průměr V	25.000	0.200 -0.200	25.519	0.519 0.319		
	4_2	95 7	Kružnice25_2 Průměr ST	25.000	0.200 -0.200	25.529	0.529 0.329		
	4_3	101 8	Kružnice25_3 Průměr S	25.000	0.200 -0.200	25.550	0.550 0.350		
	5_1	90 6	Kružnice25_1 Kruhovitost		0.100 0.000		0.076		
	5_2	96 7	Kružnice25_2 Kruhovitost		0.100 0.000		0.052		
	5_3	102 8	Kružnice25_3 Kruhovitost		0.100 0.000		0.071		

Příloha 3

Protokol o měření vzorku řeznou rychlostí 600 mm/min

KOVO-PLAZMA s.r.o.		PROTOKOL O MĚŘENÍ				KOVO-PLAZMA s.r.o.			
		MITUTOYO CRISTA-APEX S 7106				Brněnská 537 664 42 Mořice e-mail: obchod@kovoplazma.cz www.kovoplazma.cz			
Výrobek	Projekt			Zakázka					
Výkres	1			Průvodka					
Firma	Škola			Číslo kusu	600				
Název	Kovo Plazma			Měřil	Jakub Chromý				
Datum / Čas	19.04.2022 / 11:40			Poz.					
	Pos. č.	Řádek č. Elm. č.	Jméno elementu Charakteristika	Jm. hodnota	HT DT	Naměřeno	Odchyka Překročení tol.	Grafika	
	1_1	47 1	Vzdálenost Vzdálenost	50.000	0.300 -0.300	49.594	-0.406 -0.106		
	1_2	61 3	Vzdálenost Vzdálenost XY	50.000	0.300 -0.300	49.664	-0.336 -0.036		
	1_3	75 5	Vzdálenost Vzdálenost XY	50.000	0.300 -0.300	49.725	-0.275		
	2_1	49 3	Kružnice1 Rádus	25.000	0.200 -0.200	24.773	-0.227 -0.027		
	2_2	63 4	Kružnice2 Rádus	25.000	0.200 -0.200	24.799	-0.201 -0.001		
	2_3	77 5	Kružnice3 Rádus	25.000	0.200 -0.200	24.823	-0.177		
	3_1	53 2	Vzdálenost Vzdálenost XY	100.000	0.300 -0.300	99.670	-0.330 -0.030		
	3_2	67 4	Vzdálenost Vzdálenost XY	100.000	0.300 -0.300	99.730	-0.270		
	3_3	81 6	Vzdálenost Vzdálenost XY	100.000	0.300 -0.300	99.770	-0.230		
	4_1	88 6	Kružnice25_1 Průměr	25.000	0.200 -0.200	25.372	0.372 0.172		
	4_2	95 7	Kružnice25_2 Průměr	25.000	0.200 -0.200	25.340	0.340 0.140		
	4_3	101 8	Kružnice25_3 Průměr	25.000	0.200 -0.200	25.319	0.319 0.119		
	5_1	90 6	Kružnice25_1 Kruhovitost		0.100 0.000		0.040		
	5_2	96 7	Kružnice25_2 Kruhovitost		0.100 0.000		0.049		
Výrobek		Projekt			Zakázka				
Výkres		1			Průvodka				
Firma		Škola			Číslo kusu		600		
Název		Kovo Plazma			Měřil		Jakub Chromý		
Datum / Čas		19.04.2022 / 11:40			Poz.				
	Pos. č.	Řádek č. Elm. č.	Jméno elementu Charakteristika	Jm. hodnota	HT DT	Naměřeno	Odchyka Překročení tol.	Grafika	
	5_3	102 8	Kružnice25_3 Kruhovitost		0.100 0.000		0.049		

Příloha 4

Protokol o měření vzorku řeznou rychlostí 1000 mm/min

KOVO-PLAZMA s.r.o.		PROTOKOL O MĚŘENÍ				KOVO-PLAZMA s.r.o.		
		MITUTOYO CRYSTA-APEX S 7106				Bimšnská 537 664 42 Modřice e-mail: obchod@kovoplazma.cz www.kovoplazma.cz		
Výrobek	Projekt			Zakázka				
Výkres	1			Průvodka				
Firma	Škola			Číslo kusu	1000			
Název	Kovo Plazma			Měřil	Jakub Chromý			
Datum / Čas	19.04.2022 / 11:06			Poz.				
	Pos. č.	Rádek č. Elm. č.	Jméno elementu Charakteristika	Jm.hodnota	HT DT	Naměřeno	Odhýlka Překročení tol.	Grafika
	1_1	47 1	Vzdálenost Vzdálenost	50.000	0.300 -0.300	49.798	-0.202	
	1_2	61 3	Vzdálenost Vzdálenost XY	50.000	0.300 -0.300	49.705	-0.295	
	1_3	75 5	Vzdálenost Vzdálenost XY	50.000	0.300 -0.300	49.595	-0.405 -0.105	
	2_1	49 3	Kružnice1 Rádus	25.000	0.200 -0.200	24.892	-0.108	
	2_2	63 4	Kružnice2 Rádus	25.000	0.200 -0.200	24.846	-0.154	
	2_3	77 5	Kružnice3 Rádus	25.000	0.200 -0.200	24.798	-0.202 -0.002	
	3_1	53 2	Vzdálenost Vzdálenost XY	100.000	0.300 -0.300	99.851	-0.149	
	3_2	67 4	Vzdálenost Vzdálenost XY	100.000	0.300 -0.300	99.757	-0.243	
	3_3	81 6	Vzdálenost Vzdálenost XY	100.000	0.300 -0.300	99.665	-0.335 -0.035	
	4_1	89 6	Kružnice25_1 Průměr	25.000	0.200 -0.200	25.285	0.285 0.085	
	4_2	95 7	Kružnice25_2 Průměr	25.000	0.200 -0.200	25.353	0.353 0.153	
	4_3	101 8	Kružnice25_3 Průměr	25.000	0.200 -0.200	25.424	0.424 0.224	
	5_1	90 6	Kružnice25_1 Kruhovitost		0.100 0.000		0.052	
	5_2	96 7	Kružnice25_2 Kruhovitost		0.100 0.000		0.051	
Výrobek		Projekt			Zakázka			
Výkres		1			Průvodka			
Firma		Škola			Číslo kusu	1000		
Název		Kovo Plazma			Měřil	Jakub Chromý		
Datum / Čas		19.04.2022 / 11:06			Poz.			
	Pos. č.	Rádek č. Elm. č.	Jméno elementu Charakteristika	Jm.hodnota	HT DT	Naměřeno	Odhýlka Překročení tol.	Grafika
	5_3	102 8	Kružnice25_3 Kruhovitost		0.100 0.000		0.054	

Příloha 5
 Protokol o měření vzorku řeznou rychlostí 2000 mm/min

KOVO-PLAZMA s.r.o.		PROTOKOL O MĚŘENÍ				KOVO-PLAZMA s.r.o.		
		MITUTOYO CRYSTA-APEX S 7106				Břeměnská 537 664 42 Modřice e-mail: obchod@kovoplazma.cz www.kovoplazma.cz		
Výrobek	Projekt			Zakázka				
Výkres	1			Průvodka				
Firma	Škola			Číslo kusu	2000			
Název	Kovo Plazma			Měřil	Libor Pěček			
Datum / Čas	19.04.2022 / 10:54			Poz.	1			
Pos. č.	Řádek č. Elm. č.	Jméno elementu Charakteristika	Jm. hodnota	HT DT	Naměřeno	Odchyka Překročení tol.	Grafika	
	1_1 47 1	Vzdálenost Vzdálenost	50.000	0.300 -0.300	49.973	-0.027		
	1_2 61 3	Vzdálenost Vzdálenost XY	50.000	0.300 -0.300	49.887	-0.113		
	1_3 75 5	Vzdálenost Vzdálenost XY	50.000	0.300 -0.300	49.735	-0.265		
	2_1 49 3	Kružnice1 Rádus	25.000	0.200 -0.200	24.957	-0.043		
	2_2 63 4	Kružnice2 Rádus	25.000	0.200 -0.200	24.917	-0.083		
	2_3 77 5	Kružnice3 Rádus	25.000	0.200 -0.200	24.852	-0.148		
	3_1 53 2	Vzdálenost Vzdálenost XY	100.000	0.300 -0.300	100.174	0.174		
	3_2 67 4	Vzdálenost Vzdálenost XY	100.000	0.300 -0.300	100.086	0.086		
	3_3 81 6	Vzdálenost Vzdálenost XY	100.000	0.300 -0.300	99.942	-0.058		
	4_1 88 6	Kružnice25_1 Průměr	25.000	0.200 -0.200	25.132	0.132		
	4_2 95 7	Kružnice25_2 Průměr	25.000	0.200 -0.200	25.200	0.200		
	4_3 101 8	Kružnice25_3 Průměr	25.000	0.200 -0.200	25.302	0.302 0.102		
	5_1 90 6	Kružnice25_1 Kruhovitost		0.100 0.000		0.100		
	5_2 96 7	Kružnice25_2 Kruhovitost		0.100 0.000		0.109 0.009		
Výrobek	Projekt			Zakázka				
Výkres	1			Průvodka				
Firma	Škola			Číslo kusu	2000			
Název	Kovo Plazma			Měřil	Libor Pěček			
Datum / Čas	19.04.2022 / 10:54			Poz.	1			
Pos. č.	Řádek č. Elm. č.	Jméno elementu Charakteristika	Jm. hodnota	HT DT	Naměřeno	Odchyka Překročení tol.	Grafika	
	5_3 102 8	Kružnice25_3 Kruhovitost		0.100 0.000		0.087		

Příloha 6
 Protokol o měření vzorku řeznou rychlostí 3000 mm/min

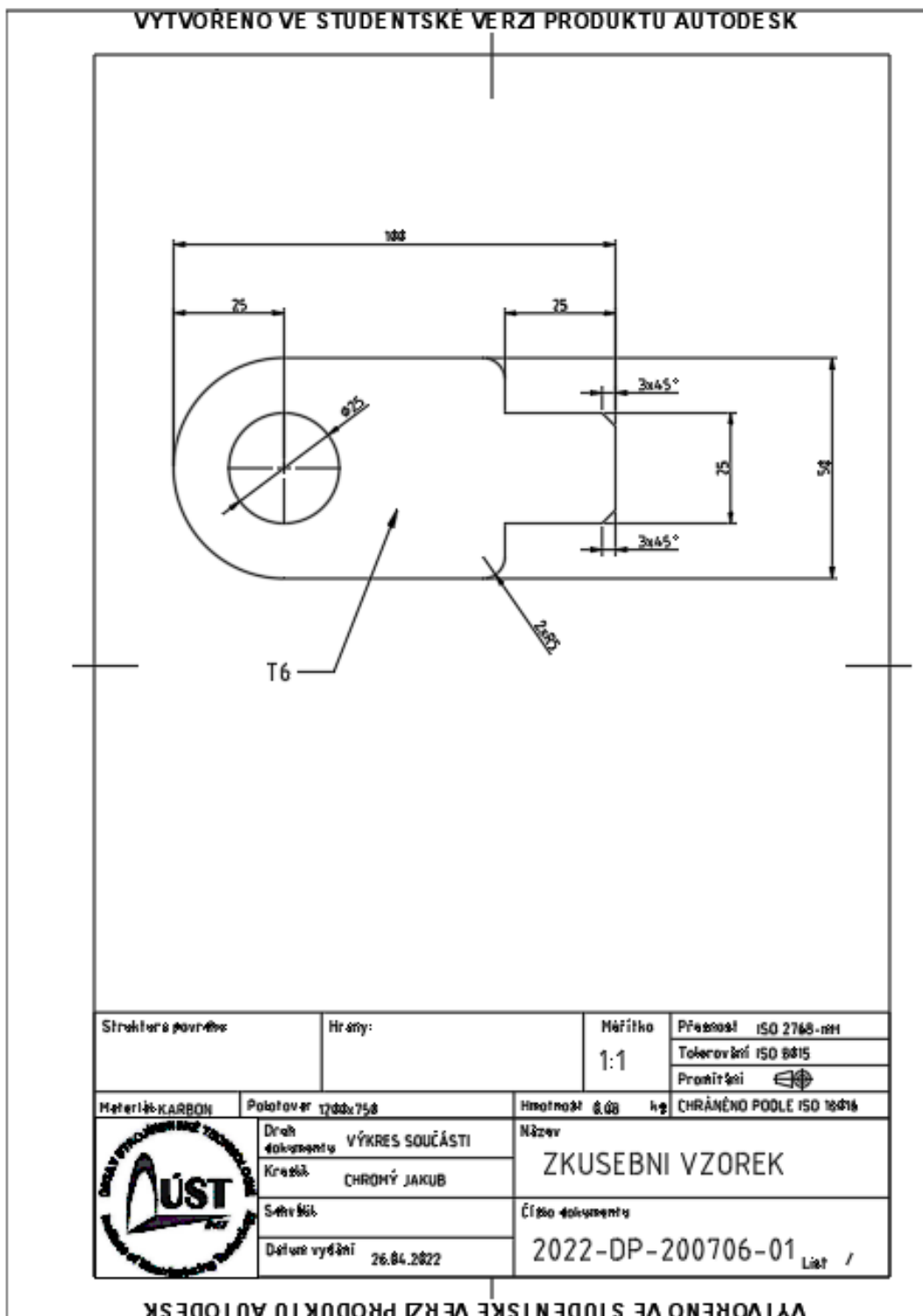
KOVO-PLAZMA s.r.o.		PROTOKOL O MĚŘENÍ			KOVO-PLAZMA s.r.o.			
		MITUTOYO CRYSTA-APEX S 7106			Brněnská 637 664 42 Mošnice e-mail: obchod@kovoplazma.cz www.kovoplazma.cz			
Výrobek	Projekt		Zakázka					
Výkres	1		Průvodka					
Firma	Škola		Číslo kusu	3000				
Název	Kovo Plazma		Měřil	Jakub Chromý				
Datum / Čas	19.04.2022 / 11:17		Poz.					
	Pos. č.	Řádek č. Elm. č.	Jméno elementu Charakteristika	Jm.hodnota	HT DT	Naměřeno	Odhylka Přeobrazení	Grafika
	1_1	47 1	Vzdálenost Vzdálenost	50.000	0.300 -0.300	50.042	0.042	
	1_2	61 3	Vzdálenost Vzdálenost XY	50.000	0.300 -0.300	49.960	-0.040	
	1_3	75 5	Vzdálenost Vzdálenost XY	50.000	0.300 -0.300	49.781	-0.219	
	2_1	49 3	Kružnice1 Rádus	25.000	0.200 -0.200	25.010	0.010	
	2_2	63 4	Kružnice2 Rádus	25.000	0.200 -0.200	24.964	-0.036	
	2_3	77 5	Kružnice3 Rádus	25.000	0.200 -0.200	24.881	-0.119	
	3_1	53 2	Vzdálenost Vzdálenost XY	100.000	0.300 -0.300	100.070	0.070	
	3_2	67 4	Vzdálenost Vzdálenost XY	100.000	0.300 -0.300	99.977	-0.023	
	3_3	61 6	Vzdálenost Vzdálenost XY	100.000	0.300 -0.300	99.816	-0.184	
	4_1	88 6	Kružnice25_1 Průměr	25.000	0.200 -0.200	25.074	0.074	
	4_2	95 7	Kružnice25_2 Průměr	25.000	0.200 -0.200	25.166	0.166	
	4_3	101 8	Kružnice25_3 Průměr	25.000	0.200 -0.200	25.292	0.292 0.092	
	5_1	90 6	Kružnice25_1 Kružovitost		0.100 0.000		0.056	
	5_2	96 7	Kružnice25_2 Kružovitost		0.100 0.000		0.055	

- Strana 1 z 2 -

Výrobek	Projekt		Zakázka					
Výkres	1		Průvodka					
Firma	Škola		Číslo kusu	3000				
Název	Kovo Plazma		Měřil	Jakub Chromý				
Datum / Čas	19.04.2022 / 11:17		Poz.					
	Pos. č.	Řádek č. Elm. č.	Jméno elementu Charakteristika	Jm.hodnota	HT DT	Naměřeno	Odhylka Přeobrazení	Grafika
	5_3	102 8	Kružnice25_3 Kružovitost		0.100 0.000		0.030	

Příloha 7

Výkres součásti: Zkušební vzorek (2022-DP_200706-01)



Příloha 8
 Výkres součásti: Padformátor (2022-DP_200706-02)

