

Adaptivní frézování kompozitů se skleněnou výztuží

Tomáš Solařík

Bakalářská práce
2020

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Tomáš Solařík
Osobní číslo: T17217
Studijní program: B3909 Procesní inženýrství
Studijní obor: Technologická zařízení
Forma studia: Prezenční
Téma práce: Adaptivní frézování kompozitů se skleněnou výztuží

Zásady pro vypracování

1. teoretická studie na dané téma
2. návrh experimentu a vhodné geometrie pro CNC frézování
3. programování s využitím operace „adaptivní frézování“ v programu NX
4. diskuze a porovnání s jinými způsoby hrubovacího frézování

Forma zpracování bakalářské práce: **Tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- VOS, Patrick De. Příručka pro technology: Jak dosáhnout vysoké produktivity při frézování? *MM Průmyslové spektrum* [online]. 25 June 2013. [Accessed 26 March 2019]. Available from: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-dosahnout-vysoke-produktivity-pri-frezovani.html>
- Adaptivní frézování. *Siemens Documentation* [online]. [Accessed 26 March 2019]. Available from: https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/12.0.1/nx_help#uid:xid1128418:index_mfgmilling:xid1224260
- SMID, Peter. *CNC programming handbook: a comprehensive guide to practical CNC programming*. Industrial Press Inc., 2003.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **22. května 2020**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

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

Ve Zlíně dne 10. února 2020

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

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

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta: Tomáš Solářík

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá využitím metody adaptivního frézování pro obrábění sklolaminátu. V teoretické části je rozebráno frézování, CNC programování, kompozitní materiály a hodnocení jakosti obrobené plochy. V praktické části je popsán průběh experimentu společně s měřením a hodnocením různých kritérií. Výsledkem praktické části je určení vhodnosti jednotlivých nástrojů a porovnání metody adaptivního frézování s hrubovacím frézováním. Cílem práce je mimo jiné i určení, zdali je adaptivní frézování vhodné pro tvorbu kapes ve sklolaminátu.

Klíčová slova: frézování, kompozit, jakost obrobené plochy, řezné síly, řezné nástroje

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the use of adaptive milling method for fiberglass machining. In the theoretical part is analyzed milling, CNC programming, composite materials and evaluation of machined surface quality. The practical part describes the course of the experiment together with the measurements and evaluation of various criteria. The result of practical part in this bachelor thesis is to determine the suitability of individual tools and to compare adaptive milling method with rough milling method. The aim of the work is, among other things, to determine whether adaptive milling is suitable for creating pockets in fiberglass.

Keywords: milling, composite, quality of machined surface, cutting forces, cutting tools

Touto cestou bych chtěl poděkovat doc. Ing. Ondřeji Bílkovi Ph.D. za cenné rady a čas, který mi během vypracování bakalářské práce a mého studia věnoval. Dále děkuji Ing. Alexandru Čapkovi Ph.D. za pomoc při přípravě praktické části bakalářské práce.

„Zkušenost je učitelem všech věcí“

Gaius Julius Caesar

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 FRÉZOVÁNÍ	12
1.1 KINEMATIKA ŘEZNÉHO PROCESU	12
1.2 ŘEZNÉ PODMÍNKY	14
1.3 ŘEZNÉ SÍLY	15
1.4 TRVANLIVOST A ŽIVOTNOST BŘITU NÁSTROJE.....	16
1.5 DYNAMICKÉ FRÉZOVÁNÍ	20
1.5.1 HSC	20
1.5.2 HFM	21
1.5.3 HEM.....	22
1.5.4 Adaptivní frézování.....	23
2 CNC PROGRAMOVÁNÍ OBRÁBĚCÍCH STROJŮ	25
2.1 ROZDÍL MEZI NC A CNC	25
2.2 CNC OBRÁBĚCÍ STROJ	26
2.3 ZPŮSOBY PROGRAMOVÁNÍ	28
2.4 PROGRAMOVÁNÍ Z HLEDISKA VYTVÁŘENÍ PROGRAMOVÝCH BLOKŮ	29
3 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	31
3.1 SLOŽENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	31
3.2 VLÁKNOVÉ KOMPOZITY	32
3.2.1 Skleněná vlákna	33
3.2.2 Uhlíková vlákna	33
3.2.3 Aramidová vlákna	34
3.2.4 Přírodní vlákna	34
3.3 ČÁSTICOVÉ KOMPOZITY	35
3.4 VÝHODY A NEVÝHODY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	35
3.5 POUŽITÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	35
3.6 OBROBITELNOST A OBRÁBĚNÍ KOMPOZITŮ	36
4 HODNOCENÍ JAKOSTI OBROBENÉ PLOCHY	37
4.1 ZÁKLADNÍ POJMY	37
4.2 MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU	39
5 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI A CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI	41
II PRAKTICKÁ ČÁST	42
6 PŘÍPRAVA EXPERIMENTU	43
6.1 VOLBA NÁSTROJŮ	43

6.1.1	Nástroj 860060Z5.0-DURA	43
6.1.2	Nástroj 840060R050Z4.0-DURA	44
6.1.3	Nástroj 880060R020Z4.0-DURA	44
6.1.4	Nástroj 870060.0-DURA	45
6.1.5	Nástroj 871060.0-DURA	46
6.1.6	Nástroj JS514060D4C.0Z4-NXT	46
6.2	SKLOLAMINÁTOVÁ PRUŽINA	47
6.3	CNC STROJ.....	48
6.4	VYTVOŘENÍ MODELU VZORKU	49
7	FRÉZOVÁNÍ SKLOLAMINÁTU.....	51
7.1	PŘÍPRAVA VZORKŮ PRO ADAPTIVNÍ A HRUBOVACÍ FRÉZOVÁNÍ	51
7.1.1	Programování obráběcích úprav v programu NX 12	51
7.2	ADAPTIVNÍ FRÉZOVÁNÍ KAPSY	58
7.2.1	Programování adaptivního frézování v programu NX 12.....	58
7.3	HRUBOVACÍ FRÉZOVÁNÍ KAPSY.....	60
7.3.1	Programování hrubovacího frézování v programu NX 12.....	60
8	VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT PRO ADAPTIVNÍ FRÉZOVÁNÍ.....	63
8.1	ŘEZNÉ SÍLY	63
8.2	JAKOST OBROBENÝCH PLOCH	64
8.3	DODRŽENÍ ROZMĚRŮ FRÉZOVANÉ KAPSY	66
8.4	OTŘEPY	67
8.5	OPOTŘEBENÍ NÁSTROJŮ.....	68
8.6	ROZBOR TRÍSEK.....	69
9	VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT PRO HRUBOVACÍ FRÉZOVÁNÍ.....	70
9.1	ŘEZNÉ SÍLY	70
9.2	JAKOST OBROBENÝCH PLOCH	71
9.3	DODRŽENÍ ROZMĚRŮ FRÉZOVANÉ KAPSY	71
9.4	OTŘEPY	72
9.5	OPOTŘEBENÍ NÁSTROJE	72
9.6	ROZBOR TRÍSEK.....	73
10	CELKOVÉ SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ A JEJICH DISKUZE	74
	ZÁVĚR	80
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	82
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	86
	SEZNAM OBRÁZKŮ	88

SEZNAM TABULEK.....	91
SEZNAM PŘÍLOH.....	92

ÚVOD

Nové progresivní metody frézování jsou v dnešní době často diskutovaným tématem. V moderním průmyslu jsou stále větší nároky na efektivitu řezných procesů, zkrácení doby výroby a zlepšení kvality výrobků. Řešení se sestává z velké škály aspektů jako například správná volba nástrojů, materiálů, řezných podmínek a obráběcí strategie. Adaptivní frézování se tedy nabízí jako jedna z metod velmi vhodných pro výrobní průmysl z důvodu přizpůsobování strategie obrábění vzhledem k účelu výroby.

V teoretické části je popsána technologie frézování, CNC programování, kompozitní materiály a hodnocení jakosti obrobené plochy. Praktická část se věnuje využitím metody adaptivního frézování pro obrábění sklolaminátu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 FRÉZOVÁNÍ

Frézování je jednou z nejběžnějších metod obrábění, která disponuje vysokou kvalitou a vysokou výkonností obrábění. Obvykle je používána k výrobě dílů, které nejsou axiálně symetrické a mají mnoho funkcí, jako jsou díry, štěrbiny, kapsy a trojrozměrné povrchové obrysy. Dalším využitím může být výroba nástrojů pro jiné procesy, ozubení apod.

Frézování je obráběcí metoda, při které se materiál obrobku odebrává břity otáčejícího se nástroje. Posuv nejčastěji koná součást, převážně ve směru kolmém k ose nástroje. U moderních frézovacích strojů jsou posuvné pohyby plynule měnitelné a mohou se realizovat ve všech směrech (obráběcí centra, víceosé CNC frézky). Řezný proces je přerušovaný, každý zub frézy odřezává krátké třísky proměnné tloušťky [1,2].

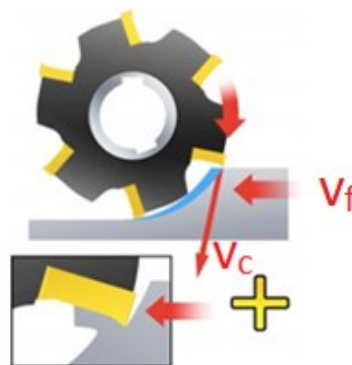
1.1 Kinematika řezného procesu

V závislosti na kinematice řezného procesu rozlišujeme frézování:

- **Sousledné frézování**

Při sousledném (sousměrném) frézování je smysl rotace nástroje ve směru posuvu obrobku. Obrobená plocha se vytváří, když zub vychází ze záběru.

Při sousledném frézování obvodem frézy se od zahájení řezu tloušťka třísky postupně snižuje, až na konci řezu dosáhne nulové hodnoty. Velká tloušťka třísky je příznivá a řezné síly mají tendenci přitahovat obrobek směrem k fréze a udržovat břit v řezu. Vzhledem k tomu, že fréza má sklon nechat se vtahovat do obrobku, musí stroj umožňovat kompenzaci vůle pohybového šroubu stolu, dovolující eliminaci zpětných pohybů. Je-li nástroj vtahován do obrobku, posuv se nežádoucím způsobem zvyšuje. To může mít za následek nepřiměřeně velkou tloušťku třísky a vést až k lomu břitu [1,3].

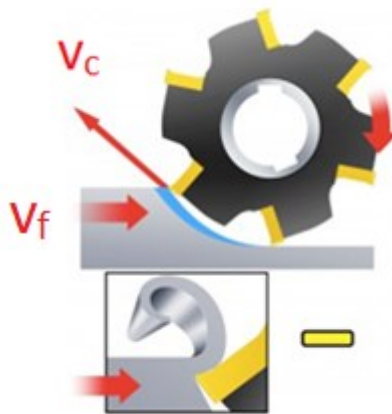


Obr. 1 Schéma sousledného frézování [3]

- **Nesousledné frézování**

Při nesousledném (nesousměrném) frézování je směr posuvu obráběcího nástroje opačný, než je směr jeho rotace. Obrobená plocha vzniká při vniknutí nástroje do obrobku.

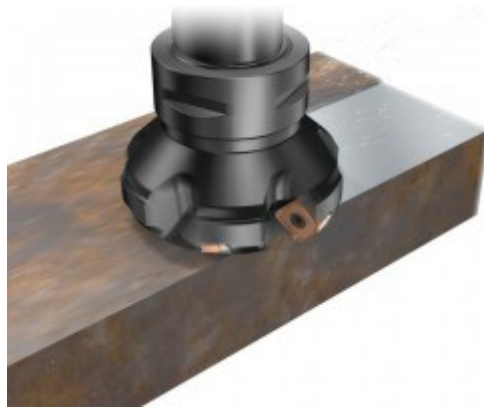
Tloušťka třísky začíná na nulové hodnotě a směrem ke konci řezu se postupně zvyšuje. Při vstupu do řezu působí na břit značně velké síly, což má za následek jeho obušování a odírání v důsledku tření. To vede k prudkému zvýšení teplot a často také dochází ke kontaktu s mechanicky zpevněným povrchem, který je vytvářen předchozím břitem. To vše má za následek zkrácení životnosti nástroje. Nesousledné frézování je doporučeno v případě použití keramických břitových destiček a pro obrábění žárovzdomných slitin, protože řezná keramika je citlivá na rázy při vstupu do řezu. Řezné síly mají tendenci tlačit frézu a obrobek směrem od sebe a radiální síly mají tendenci zvedat obrobek ze stolu. Z tohoto důvodu je nutno klást důraz na dostatečné upevnění obrobku [1,3].



Obr. 2 Schéma nesousledného frézování [3]

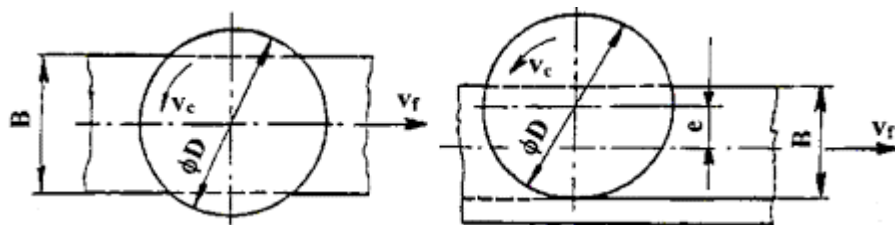
- **Čelní frézování**

Čelní frézování je metoda, při které se využívá čelních fréz, které mají břity jak na obvodu, tak i na čele nástroje. Nejčastěji se využívají frézy s úhlem nastavení 45° , ale za určitých podmínek se také používají frézy s kruhovými břitovými destičkami, rohové nebo kotoučové frézy [1,4].



Obr. 3 Čelní frézování [4]

V závislosti na poměru šířky frézované plochy B a k průměru frézy D , a také s ohledem na polohu osy frézy vzhledem k frézované ploše může být frézování symetrické nebo nesymetrické [1].



Obr. 4 Symetrické (vlevo) a nesymetrické (vpravo) čelní frézování [1]

1.2 Řezné podmínky

Volba řezných podmínek je závislá na vlastnostech nástroje, stroje, obrobku, prostředí (materiál řezného nástroje, druh stroje a obráběného materiálu, chlazení apod.) a na požadovaných vlastnostech obrobku (přesnost rozměrů a tvaru, drsnost obrobku, ovlivnění povrchové vrstvy obrobku apod.).

K základním řezným podmínkám patří řezná rychlost v_c a posuv na zub f_z . V technologické praxi se často předepisuje také posuvová rychlost v_f [1,6].

Řezná rychlost v_c se vypočítá:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1)$$

kde: D – průměr nástroje [mm]

n – otáčky nástroje [min^{-1}]

Posuv na otáčku f_n vyjadřuje, o jakou vzdálenost se nástroj posune za jednu celou otáčku. Posuv na zub f_z je základní jednotkou posuvového pohybu. Je to vzdálenost, o kterou se nástroj posune za jednu otáčku dělená počtem zubů nástroje [5].

Posuv na otáčku se vypočítá:

$$f_n = f_z \cdot z \quad [\text{mm}] \quad (2)$$

kde: z – počet zubů (břitů) nástroje [-]

f_z – posuv na zub [mm]

Vzorec pro výpočet posuvové rychlosti v_f :

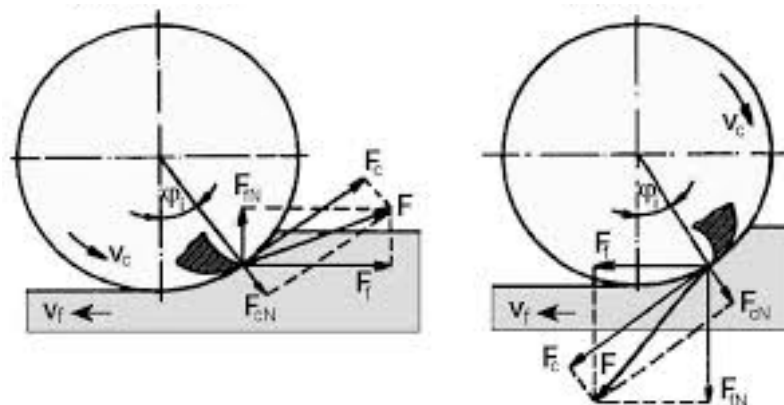
$$v_f = f_n \cdot n = f_z \cdot z \cdot n \quad [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (3)$$

kde: n – otáčky nástroje [min^{-1}]

f_n – posuv na otáčku [mm]

1.3 Řezné síly

Při specifikaci řezných sil při frézování lze vycházet ze silových poměrů na jednom břitu nástroje, který se nachází v poloze určené úhlem φ_i . Pro válcové frézování nástrojem s přímými zuby se celková řezná síla působící na břitu F_i rozkládá na složky F_{ci} a F_{cNi} , resp. na složky F_{fi} a F_{fNi} – viz Obr. 5 [1].



Obr. 5 Řezné síly na zubu válcové frézy v pracovní rovině P_{fe} pro nesousledné frézování (vlevo) a sousledné frézování (vpravo). Kde: F_i – celková řezná síla, F_{ci} – řezná síla, F_{cNi} – kolmá řezná síla, F_{fi} – posuvová síla, F_{fNi} – kolmá posuvová síla [1]

Řezná síla F_{ci} se vyjádří na základě měrné řezné síly k_{ci} a průřezu třísky A_{Di} :

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin\varphi_i \quad [\text{N}] \quad (4)$$

kde: a_p – hloubka řezu [mm]

k_{ci} – měrná řezná síla [MPa]

f_z – posuv na zub [mm]

Měrná řezná síla k_{ci} se vyjádří:

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin\varphi_i)^{1-x}} \quad [\text{MPa}] \quad (5)$$

kde: C_{Fc} – konstanta vyjadřující vliv obráběného materiálu

x – exponent vlivu tloušťky třísky

Po dosazení (5) do (4) a úpravě dostaneme:

$$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^x\varphi_i \quad [\text{N}] \quad (6)$$

1.4 Trvanlivost a životnost břítu nástroje

Při obrábění se nástroj otupuje a jeho řezivost se snižuje. To se projeví zvýšením řezného odporu, chvěním obrobku, zhoršením přesnosti a kvality obrobené plochy. Proto je nutno při určité míře otupení nástroj vyjmout a naostrit. Tuhle skutečnost lze popsat následujícími termíny:

- **Trvanlivost břítu nástroje**

Trvanlivost řezného nástroje lze definovat jako součet všech čistých (strojních) časů řezání, od začátku obrábění až po opotřebením břítu nástroje na předem stanovenou hodnotu vybraného kritéria (kritérium opotřebením a jeho hodnota musí být stanoveny tak, aby vyráběný obrobek měl požadovaný tvar, rozměry a kvalitu povrchu po celou dobu trvanlivosti nástroje). Trvanlivost nástroje, podobně jako opotřebením nástroje, závisí zejména na metodě obrábění (soustružení, frézování, vrtání, atd.), vlastnostech obráběného a nástrojového materiálu a řezných podmínkách (řezná a posuvová rychlost, šířka záběru ostří, řezné prostředí) [7].

Přímým měřením opotřebení řezného břítu v závislosti na řezné rychlosti lze získat jednoduchý Taylorův vztah, kterému odpovídá rovnice (7).

Trvanlivost břítu nástroje lze zjistit Taylorovým vztahem:

$$T = \frac{C_T}{v_c^m} \quad [\text{min}] \quad (7)$$

případně:

$$v_c = \frac{C_v}{T^{1/m}} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (8)$$

kde: C_T – konstanta [-]

$C_v = C_T^{1/m}$ – konstanta [-]

m – exponent [-]

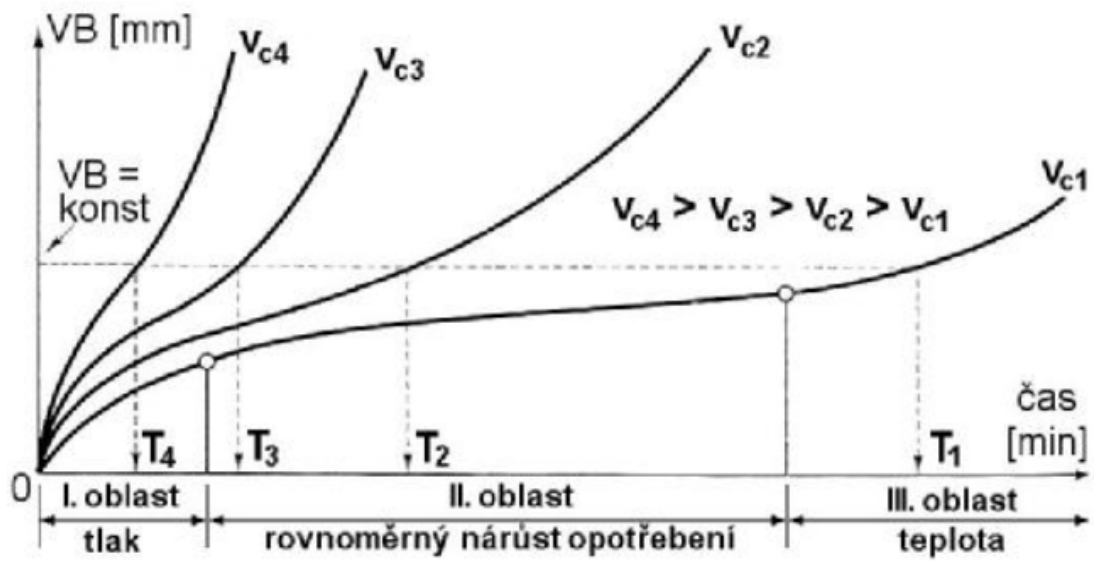
v_c – řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]

T – trvanlivost břítu [min]

Konstanta C_T závisí především na materiálu obrobku a nástroje. Nabývá hodnot 10^8 až 10^{12} . Velikost exponentu m charakterizuje především vlastnosti řezného nástroje a způsob obrábění [1].

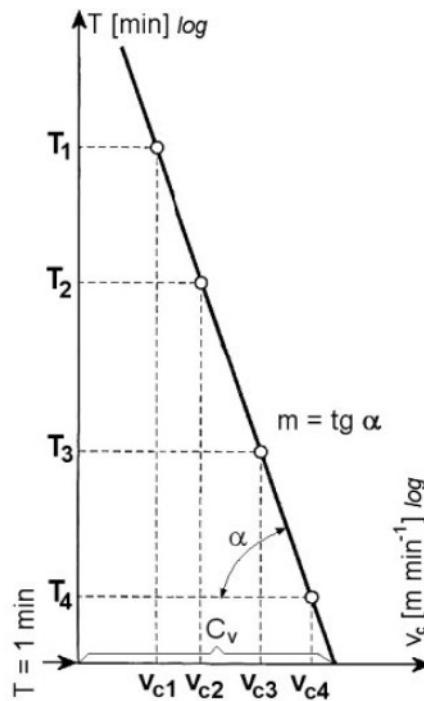
- Nástrojové oceli - $m = 10 - 8$
- Rychlořezné oceli - $m = 8 - 5$
- Slinuté karbidy - $m = 5 - 2,5$
- Řezná keramika - $m = 2,5 - 1,5$

Stanovení trvanlivosti břitu nástroje pro kritické opotřebení hřbetu VB při různých řezných rychlostech lze vidět na Obr. 6.



Obr. 6 Závislost opotřebení hřbetu na čase při různých řezných rychlostech [7]

Průběh závislosti (7) v logaritmických souřadnicích lze vidět na Obr. 7.



Obr. 7 Zlogaritmovaný diagram $T-v_c$ [7]

Nevýhodou uvedených základních vztahů T - v_c závislosti je omezení následujícími podmínkami:

- šířka záběru ostří $a_p = \text{konst.}$
- posuv na otáčku $f = \text{konst.}$
- opotřebení $VB = \text{konst.}$

V praxi jsou proto často používány rozšířené vztahy pro T - v_c závislost ve tvaru:

$$v_{cT} = \frac{c_{vT}}{a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}} [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (9)$$

kde: v_{cT} – řezná rychlost při konstantní trvanlivosti T , např. v_{c15} znamená řeznou rychlost při trvanlivosti $T = 15$ minut

nebo ve tvaru:

$$v_c = \frac{c_v}{T^{1/m} \cdot a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}} [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (10)$$

Kde: c_{vT} – konstanta [-]

x_v – exponent, vyjadřující vliv hloubky řezu [-]

y_v – exponent, vyjadřující vliv posuvu na otáčku [-]

c_v – konstanta [-]

Výhodou vztahů (9) a (10) je menší počet omezujících podmínek ($T = \text{konst.}$, $VB = \text{konst.}$) resp. ($VB = \text{konst.}$). Nevýhodou je mnohem větší rozsah zkoušek potřebných pro jejich konkrétní stanovení [7].

- **Životnost břítu nástroje**

Životnost nástroje lze definovat jako součet všech jeho trvanlivostí od prvního uvedení nástroje do činnosti až do jeho vyřazení. Přebrušovaný nástroj se vyřadí tehdy, pokud byla odbroušena celá jeho funkční část [7].

1.5 Dynamické frézování

Podstatou dynamického frézování je stanovení rezných podmínek a dráhy nástroje tak, aby bylo dosaženo maximální efektivity. Nástroj se pohybuje technologicky co nejlepším možným způsobem, a pokud by tomu mělo být z geometrického hlediska zamezeno (např. geometrie obrobku), jsou v průběhu obrábění modifikovány rezné podmínky.

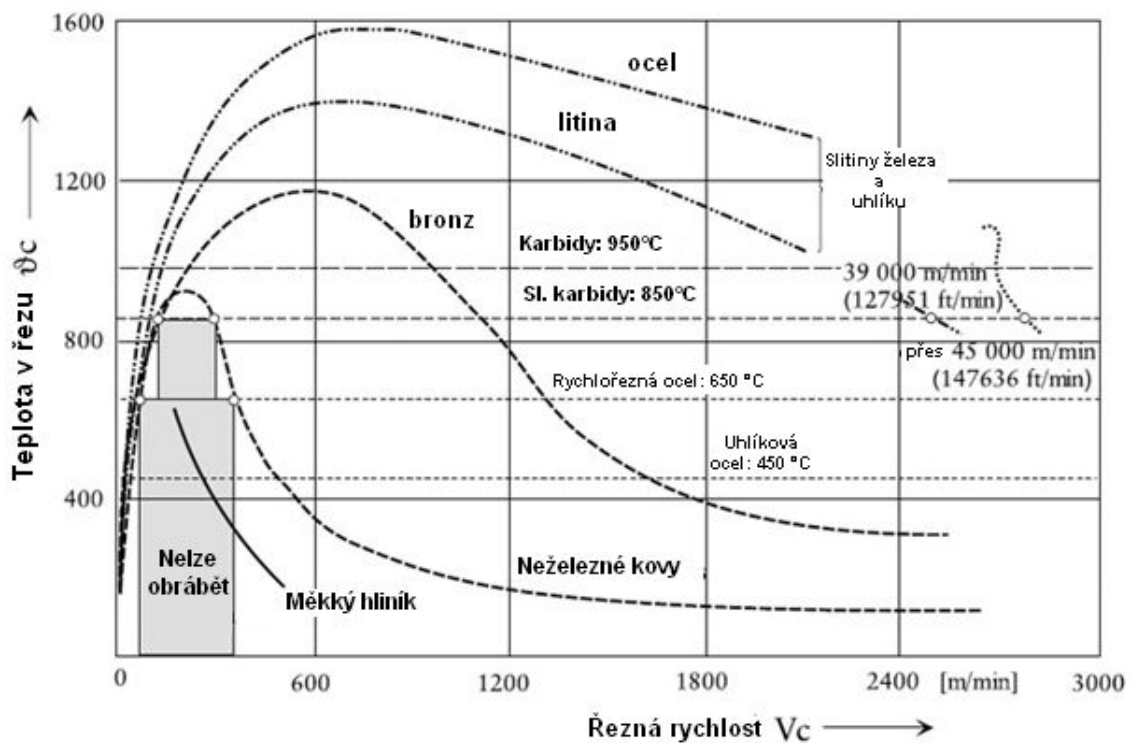
1.5.1 HSC

HSC (High Speed Cutting) případně HSM (High Speed Machining) je technologie, kdy je větších úběrů materiálu dosaženo zvýšením rezné rychlosti. Řezná rychlost je zde použita jako kompenzační faktor zejména pro malé radiální hloubky řezu (malý úhel záběru a tím i nižší rezné teploty). Pokud jsou radiální hloubky řezu nízké, lze zvýšit reznou rychlost, aby nástroj pracoval efektivně. Pro vysokorychlostní frézování jsou typické dvě aplikace, a to velké úběry měkkých materiálů obrobku a dokončovací operace ve tvrdších obráběných materiálech [9].

Když se rezná rychlost zvyšuje, rezná síla se snižuje v důsledku jevu zvaného tixotropie – materiál je „změkčen“ v důsledku střížného namáhání způsobeného působením rezné hrany nástroje a po dokončení rezného procesu se tvrdost materiálu vrací zpátky do původního stavu. Tato vlastnost platí především pro slitiny hliníku, které jsou proto ideálním materiálem pro vysokorychlostní obrábění.

Třecí teplo je v procesu frézování generováno rovnoměrně na každé straně rezné hrany, což představuje přibližně 80 % veškerého třecího tepla. Další 20 % je generováno deformacemi nebo ohýbáním třísky. Při vysokorychlostním obrábění dochází k odebrání třísky z místa řezu tak velkou rychlostí, že přibližně 60 % tepla v závislosti na tření nemá dostatek času na vedení tepla do obrobku nebo do samotného nástroje – viz *Obr. 8*. Výsledkem je tedy výborná kvalita povrchu se znatelnou redukcí degradace materiálu vyvolaného teplotou [10].

HSC obrábění je také možno kombinovat s obráběním bez chlazení. Musí však být splněna podmínka, že doba obrábění, trvanlivost nástroje a jakost obrobené plochy bude stejná, nebo lepší než při chlazením. U některých materiálů je chlazení nevhodné. Například nástroje ze slinutých karbidů jsou náchylné na teplotní šoky a může dojít k poškození nástrojové destičky [11].



Obr. 8 Závislost teploty na řezné rychlosti při vysokorychlostním obrábění pro různé druhy materiálů [12]

1.5.2 HFM

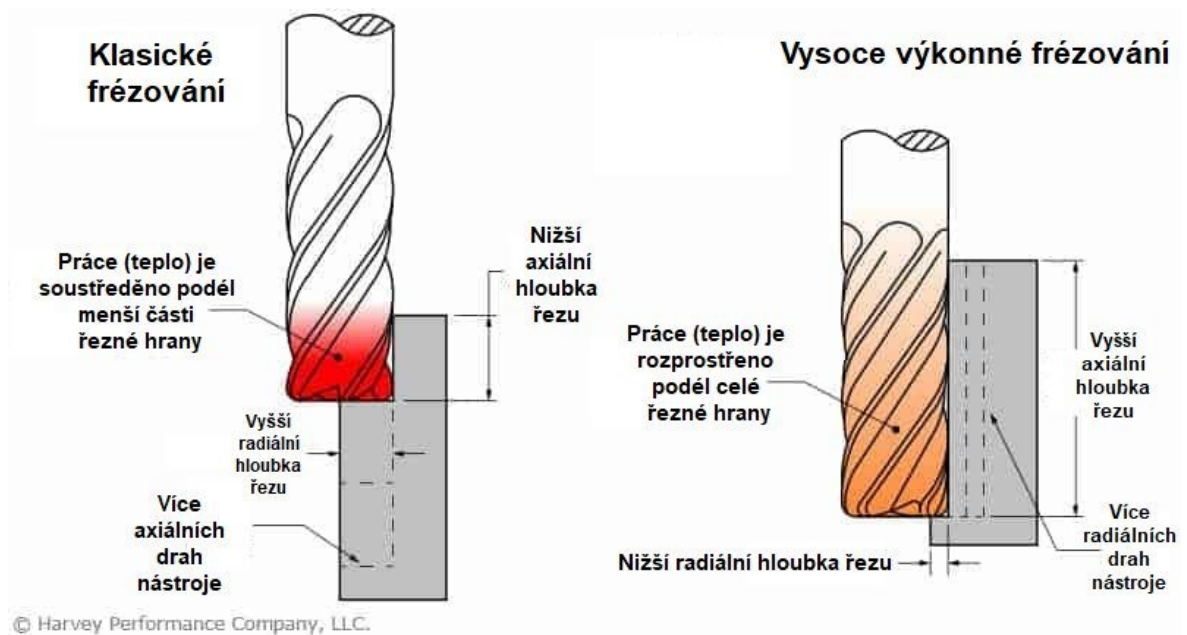
HFM (High Feed Milling) je technologie frézování vysokým posuvem, kde je velkého úběru materiálu dosaženo velkými až velmi velkými posuvy na zub kombinovanými s malými axiálními hloubkami řezu a středními řeznými rychlostmi. Řezné síly směřují do vřetena stroje v axiálním směru, což přináší vyšší stabilitu, snížení vibrací a prodloužení životnosti nástroje. Nástroje pro frézování vysokým posuvem také šetří čas, protože umožňují vyloučit polo-dokončovací operace a omezit tak výměny nástrojů. Čelní frézování při použití HFM je výhodné pro další obráběcí operace nebo dokončování. HFM je také velmi praktické pro kopírovací frézování nerovných povrchů a je vysoce efektivní při frézování dutin. U většiny aplikací lze často získat tak malé tolerance, že nebude nutné závěrečné dokončovací obrábění. Předpokladem úspěšného obrábění strategií HFM je volba správného nástroje s vhodnými vlastnostmi [9,13].



Obr. 9 HFM obrábění [26]

1.5.3 HEM

HEM (High Efficiency Milling) je technologie vysoce výkonného obrábění, vhodného pro hrubování, využívající nižší radiální hloubky řezu a vyšší axiální hloubky řezu. Dochází k rovnoměrnému opotřebení řezné hrany, odvodu tepla celou řeznou částí nástroje a tím se snižuje pravděpodobnost selhání nástroje. Tradiční frézování obvykle vyžaduje vysokou radiální hloubku řezu a malou axiální hloubku řezu. Tím je způsobeno soustředění tepla v jedné malé části nástroje, což urychluje proces opotřebení. Tato strategie frézování nás vrací zpět k základnímu záměru v obrábění kovů, kterým je dosažení maximální produktivity při co nejnižších nákladech [9,14].

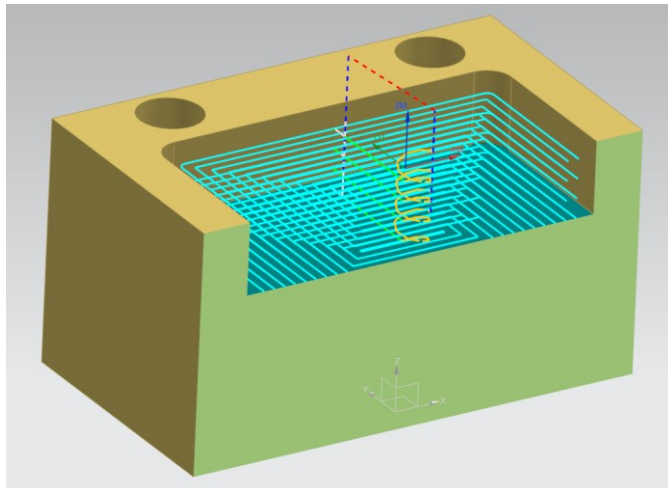


Obr. 10 Porovnání klasického frézování (vlevo) a vysoce výkonného frézování (vpravo) [14]

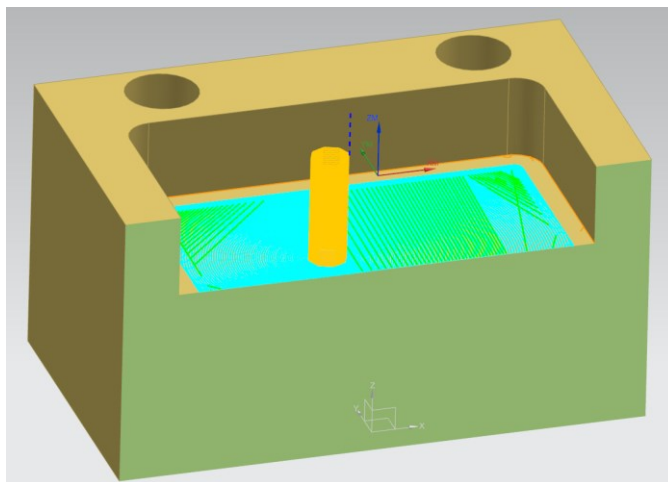
1.5.4 Adaptivní frézování

Adaptivní frézování spadá pod nové metody dynamického frézování, díky kterému můžeme snížit čas obrábění až o 60 %. Tato metoda využívá hluboké řezy a menší boční krok, přičemž zatížení nástroje je konzistentní po celou dobu obrábění. Díky tomu se zvyšuje produktivita a zároveň se prodlužuje životnost nástroje. Tato inovativní strategie řezání udržuje konstantní tloušťku třísky dynamickým přizpůsobováním parametrů obrábění, včetně šířky záběru a posuvu. Udržováním konstantní tloušťky třísky během celého řezného procesu lze výrazně snížit řezné síly, což umožňuje využít vysoké rychlosti a posuvy po celé délce nástroje. To dává výhodu oproti hrubovacímu frézování, kde můžeme pro řezání použít jen malou část délky nástroje [15,16].

- Porovnání postupu při odebrání materiálu pro hrubovací a adaptivní frézování:



Obr. 11 Dráha nástroje při hrubovacím frézování



Obr. 12 Dráha nástroje při adaptivním frézování

Z *Obr. 12* je patrné, že je využito maximální hloubky řezu. Přizpůsobením šířky záběru a posuvu je udrženo konstantní zatížení nástroje a rovnoměrné odebrání třísky.

Operace adaptivního frézování je dobrou volbou při frézování tvrdých materiálů, ale lze ji využít i pro jiné materiály, jako například při obrábění hliníkových součástí. Jednou z velmi výhodných aplikací adaptivního frézování je frézování dutin [16].

2 CNC PROGRAMOVÁNÍ OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

Pojmy jako NC a CNC jsou známé už několik desetiletí a lze říct, že s jejich příchodem nastala revoluce ve strojírenství. Využití těchto systémů je jedním z předpokladů vysoké produktivity výroby. Princip těchto systémů vychází z jednoduché definice:

NC (Numerical Control) lze definovat jako ovládání provozu obráběcích strojů pomocí specificky kódovaných pokynů do řídicího systému stroje.

Pod pojmem „specificky kódovaných pokynů“ si můžeme představit kombinace písmen, čísel a symbolů (např. desetinná čárka, znak procenta, závorky) [17].

2.1 Rozdíl mezi NC a CNC

Oba systémy plní stejné úkoly, a to manipulaci s daty za účelem obrábění součástí. V obou případech obsahuje vnitřní řídicí systém veškeré logické instrukce, a tím pádem zpracovává vstupní data. V tomto okamžiku podobnost končí.

- **NC**

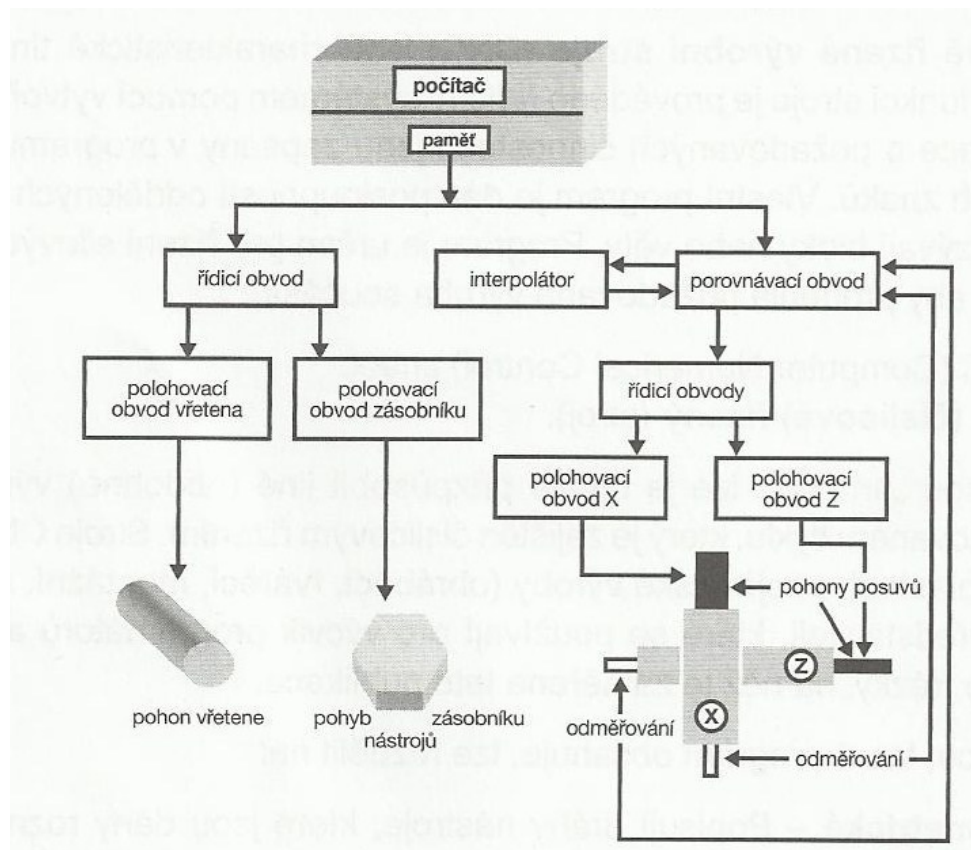
NC systém (na rozdíl od CNC systému) používá fixní logické funkce, které jsou zabudovány a trvale zapojeny do řídicí jednotky. Tyto funkce nemůže programátor ani obsluha stroje změnit. Systém neumožňuje žádné změny programu pomocí ovládacích prvků stroje. Všechny požadované změny programu musí být provedeny mimo řídicí jednotku, obvykle v kancelářském prostředí. NC systém obvykle vyžaduje použití děrovaných pásek pro zadávání programových informací [17].

- **CNC**

Moderní CNC systém používá interní mikroprocesor (tj. počítač). Tento počítač obsahuje paměťové registry ukládající různé postupy, které jsou schopné manipulovat s logickými funkcemi. To znamená, že programátor nebo obsluha stroje může měnit jakýkoliv program přímo v řídicí jednotce stroje s okamžitými výsledky. Tato možnost je největší výhodou CNC systémů a jedním z klíčových prvků, který přispěl k tak širokému využití technologie v moderní výrobě. Programy CNC a logické funkce se obvykle ukládají na speciálních počítačových čípech [17].

2.2 CNC obráběcí stroj

CNC obráběcích strojů je na trhu celá škála a lze je využít na velké množství aplikací. Základní rozdělení obráběcích strojů je na soustružnické, frézovací, multifunkční, kombinované popř. na stroje na speciální technologie. Schéma CNC obráběcího stroje a jeho řízení je na *Obr. 13*.



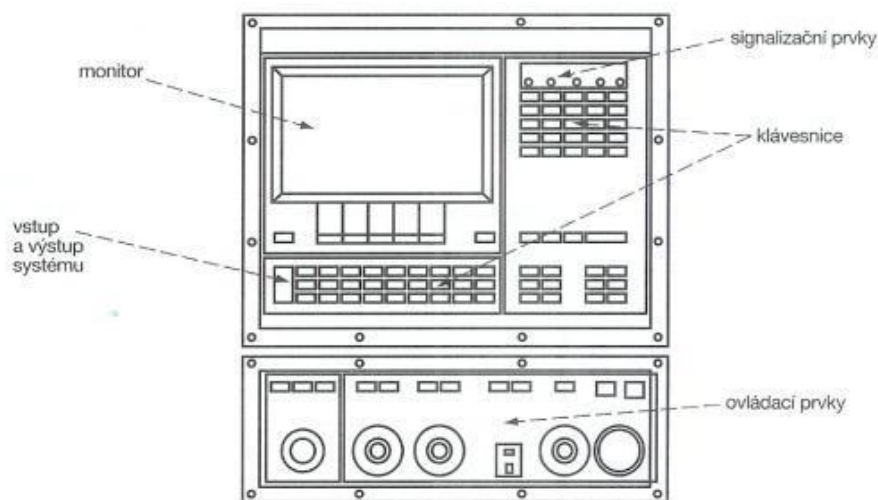
Obr. 13 Zjednodušené blokové schéma CNC soustružnického obráběcího stroje [18]

Popis základních částí:

- **Počítač** – Jedná se o průmyslový počítač, do kterého je nahrán řídicí systém, který musí vyhovovat možnostem stroje, počítače a požadavkům technologie výroby. Z hlediska obsluhy je dán obrazovkou a ovládacím panelem. Pomocí ovládacího panelu můžeme provádět příkazy potřebné při ruční obsluze, pro seřizování a pro práce v jiných režimech. CNC program lze vytvořit i mimo stroj a poté jej nahrát do řídicího systému. Program se ukládá v paměti a vyvolá se příkazem.
- **Řídící obvody** – V řídicích obvodech se logické signály převádí na elektrické signály, kterými se přímo ovládají jednotlivé části stroje jako: motory vřetene, posuvů apod.

- **Interpolátor** – Řeší dráhu nástroje, která je zadaná geometrií. Zahrnuje tedy zadané délkové korekce a korekce na průměr nástroje. Vypočítává elementy dráhy mezi bloky ze startovacího do cílového bodu. Dráha může být přímková (lineární interpolace), kruhová (rádiusová interpolace) a u vyspělejších řídicích systémů také ve šroubovici, popř. obecná (spline). Jednoduše řečeno, interpolátor zaručuje geometrickou přesnost výrobku.
- **Porovnávací obvod** – Nejedná-li se o jednoduchý CNC stroj pro základní výcvik obsluhy, měl by být stroj vybaven tzv. zpětnou vazbou, která přenáší informace o dosažených geometrických hodnotách. Tyto souřadnice se porovnávají s hodnotami zadanými v programu, a pokud je zjištěn rozdíl, pohony posuvů dostanou příkaz k dosažení požadovaných souřadnic. Tímto lze zajistit vyšší stupeň přesnosti výroby [18].

Řídicí panel bývá řešen různými způsoby – podle výrobce. Dělí se na několik částí, které se liší svým významem – viz *Obr. 14*.



Obr. 14 Řídicí panel CNC stroje [18]

- **Vstup dat** – Alfnumerická část, díky níž se ručně zapisuje program, informace o nástroji, seřízení stroje apod.
- **Ovládací prvky** – Speciální část, pomocí které se pohybuje s nástrojem nebo obrobkem, spouští se otáčky vřeteníku, popřípadě ruční ovládání velikostí posuvů, rychloposuvů a otáček.
- **Volba režimu práce** – Je možné zvolit ruční režim, automatický režim, blok po bloku a další. Je možné vyvolat editaci programu, uložených programů apod.

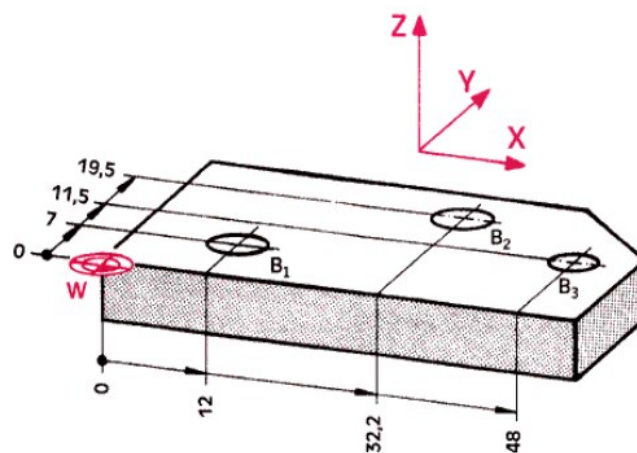
- **Aktivace paměti** – Vyvolání či přepnutí pamětí (archiv, editace programu).
- **Aktivace testů** – Simulace programů, testy programů a stroje.
- **Obrazovka** – Slouží ke kontrole prováděných činností.
- **Přenosný panel** – Je spojen kabelem s řídicím panelem a slouží k ovládání základních pohybových funkcí [18].

2.3 Způsoby programování

Při tvorbě programu se snažíme, aby byl popis dráhy nástroje pokud možno co nejjednodušší. Většinou se používají dva způsoby programování: absolutní nebo přírůstkový.

- **Absolutní programování (G 90)**

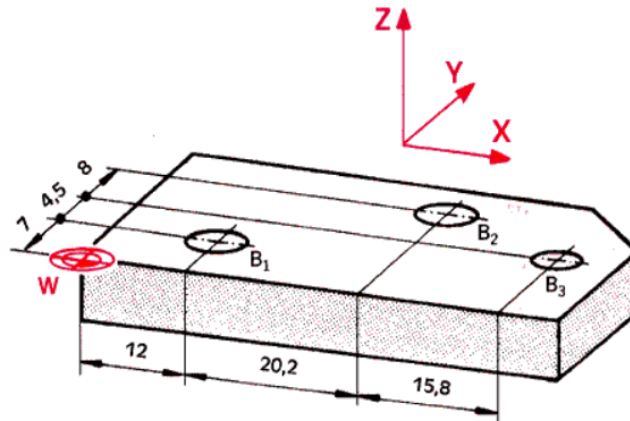
Všechny programované body dráhy nástroje nejsou vztaženy k předem zvolenému bodu – nulového bodu programu (W) – tuto polohu volí programátor. Pro absolutní programování je vhodné využít kótování od základny. Při programování se programuje poloha koncového bodu pohybu. Základní otázka při absolutním programování a zadávání souřadnic (X, Y, Z.) je: Do jaké vzdálenosti od nulového bodu programu má nástroj dojet (v jednotlivých osách) [21]?



Obr. 15 Absolutní programování [21]

- **Přírůstkové programování (G 91)**

Souřadnice všech programovaných bodů se udávají vzhledem k předchozímu bodu, který je považován za výchozí. Pro potřeby přírůstkového programování logicky odpovídá použití řetězových kót. Základní otázka při přírůstkovém programování a zadávání souřadnic (X, Y, Z.) je: O kolik má nástroj od koncového bodu předcházejícího pohybu popojet (v jednotlivých osách) [21]?



Obr. 16 Přírůstkové programování [21]

2.4 Programování z hlediska vytváření programových bloků

- **Manuální (ISO)**

ISO programování představuje programování pomocí přípravného příkazu, často nazývaného G-kód. Tato adresa má jediný cíl, a to přednastavit nebo připravit řídicí systém na požadovaný provozní stav, popřípadě do určitého režimu. G-kód tedy připraví řídicí jednotku tak, aby přijala programovací pokyny právě podle G-kódu. Dále se pro manuální programování využívají M-kódy. Ty jsou konfigurovatelné a lze je popsat jako funkce strojní. Mezi ně patří například výměna nástroje, řízení chladicí kapaliny a jiné. Funkce G je přípravná a M pomocná. Obecně lze říct, že kódy M a G řídí činnost stroje [17,18].

- **CAM (softwarové)**

Programování využitím CAM/CAD nachází velké uplatnění v praxi zejména kvůli rychlosti vytvoření programu. Pro některé tvary výrobků (formy) je využití CAM/CAD vhodné, protože ruční programování by bylo velmi obtížné. Pomocí slovních příkazů, ale také graficky a číselně určíme, které prvky budeme obrábět, jakou technologií, jakým nástrojem

apod. Výhodou softwarového programování je převzetí dat přímo z CAD programů (2D, 3D model). Na opačnou stranu je nutno mít znalost používaného softwaru, což může v začátcích způsobit potíže, co se týče správné volby obráběcí strategie ve spojení s použitou technologií a postprocesorem [18].

- **Dílenské (dialogové, symbolické)**

Dílenské programování umožňuje programování přímo na stroji a z obsluhy stroje se stává externí programátorské pracoviště. Lze vytvořit jednoduché programy využitím grafické podpory, které lze kontrolovat na simulátoru po jednotlivě napsaných blocích. Softwarové vybavení řídicího systému je dostatečně vyspělé, aby obsluha dokázala vytvořit program v krátkém čase, jednoduše, a bez hlubokých znalostí programování. Jedním z hlavních představitelů dílenského programování je řídicí systém FANUC [18].

3 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiály jsou složeny ze dvou nebo více odlišných složek (fází). Pevnější, tvrdší a tužší nespojitá složka se nazývá výztuž. Složka, která funguje jako pojivo výztuže, se nazývá matrice. Kompozitní materiály mohou obsahovat výztuže různých rozměrů. Ve strojírenství mají největší význam mikrokompozity, u kterých se příčný rozměr výztuže pohybuje v rozmezí $10^0 - 10^2$ μm . Makrokompozity se hodně využívají ve stavebnictví (železobeton vyztužený ocelovými pruty). Nanokompozity obsahují částice, jejichž největší rozměr je v nm [19].

3.1 Složení kompozitních materiálů

Mezi základní složení kompozitů patří matrice a výztuž. Matric a výztuží je velké množství, přičemž každý druh má své specifické využití a lze je různě kombinovat. Uvedme si základní charakteristiky těchto jednotlivých složek.

- **Výztuž**

Vlákna jsou vždy mnohem pevnější než stejné materiály v kompaktní podobě – viz *Tab. 1*. Většina vyráběných vláken má kruhový průřez v rozmezí mezi 5 a 20 μm . Menší průměry než uvedené se nepoužívají z důvodu špatného prosycení matricí. Polymerní matrice se nevyztužují kovovými nebo keramickými vlákny nejen z důvodu vysoké ceny, ale hlavně z důvodu vysoké hustoty. Naopak pro keramické a kovové matrice se nepoužívají vlákna s malou chemickou a tepelnou odolností. Jako výztuž se používají i částice. Částice sférického (kulového) tvaru by neměli být příliš velké, protože pak negativně ovlivňují pevnost. Nesmí být však ani příliš jemné, protože by bylo velice obtížné dosáhnout jejich rovnoměrného rozptýlení [19].

Tab. 1 Porovnání mechanických vlastností vláken a kompaktních materiálů [19]

Materiál	modul pružnosti [GPa]	pevnost v tahu [MPa]
skleněné vlákno typu E	73	2500
sklovina E	73	100
uhlíkové vlákno	230 až 950	2000 až 6000
polykrystalický grafit	10	20
keramické vlákno SiC	300	3000
SiC monolitický	410	500
UHMW polyethylenové vlákno	90 až 170	3000
lineární polyethylen	0,4	26

- **Matrice**

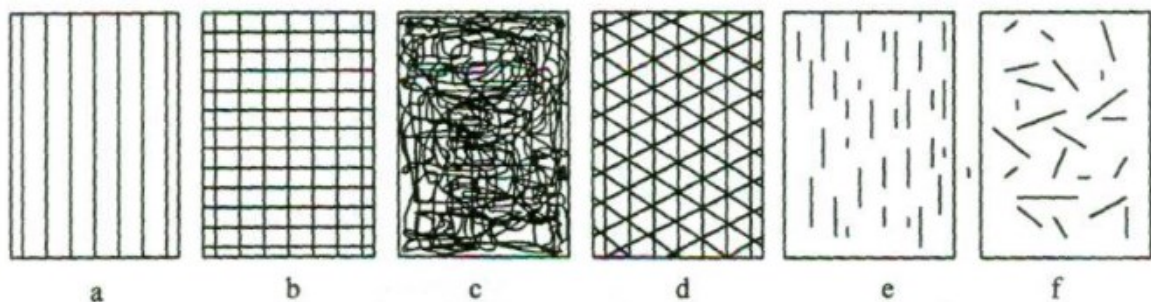
Hlavní úlohou matrice je spojit výztuž a chránit ji před okolními vlivy. Matrice by měla udržovat svou funkci i po porušení výztuže. Mezní poměrné prodloužení matrice při tahovém namáhání by mělo být větší než mezní prodloužení vláken. Tento požadavek splňují polymerní a kovové matrice. Matrice musí mít vhodnou viskozitu a povrchové napětí, aby vyztužující fázi dokonale smočilo [19].



Obr. 17 Závislost napětí na poměrném prodloužení pro uhlíkové vlákno a různé druhy matric [19]

3.2 Vlákňové kompozity

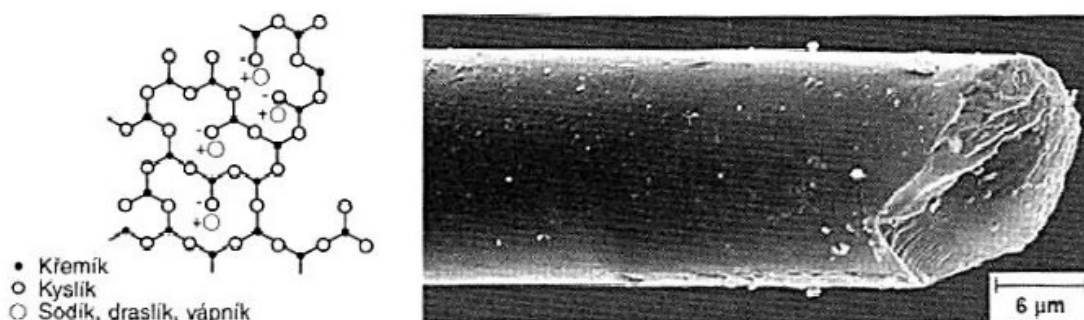
Vlákňové kompozity mohou mít výztuž různě uspořádanou – jednosměrně, dvouosé, víceosé nebo nahodile. Významnou vlastností vlákňových kompozitů je fakt, že negativní vlastnosti jednotlivých složek se u výsledného materiálu neprojevují. Kompozit obsahující křehká vlákna uložená v křehké matrici má dobrou odolnost proti křehkému lomu. Kompozit tedy dosahuje lepších vlastností, než by odpovídalo průměru odvozenému z vlastností složek. Jde o tzv. synergický efekt, tj. spolupůsobení několika složek vedoucí k zesílení účinku [19].



Obr. 18 Uspořádání vlákňové výztuže: a) jednosměrné, b) tkanina, c) rohož, d) víceosá, e) krátká vlákna jednosměrně orientována, f) krátká vlákna nahodile orientována [19]

3.2.1 Skleněná vlákna

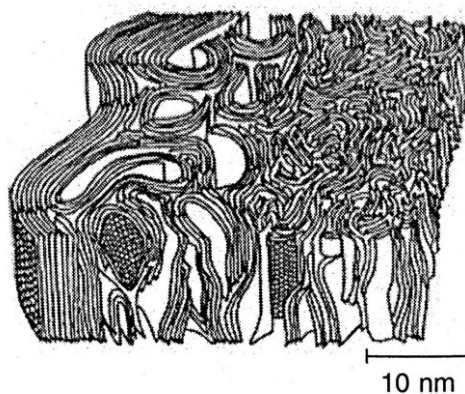
Textilní skleněná vlákna (GF – Glass Fiber) je společný název pro tenká vlákna ($\varnothing 3,5$ až $24 \mu\text{m}$) s pravidelným kruhovým průřezem, která jsou tažená z roztavené skloviny. Skleněná vlákna jsou amorfní a jejich vlastnosti v podélném a příčném směru se předpokládají shodné, tj. jde o izotropní materiál. Relativně vysoké hodnoty pevnosti a E-modulu jsou způsobeny silnými kovalentními vazbami mezi křemíkem a kyslíkem v trojrozměrné síti skloviny [19,20].



Obr. 19 Chemická struktura a snímek skleněného vlákna [20]

3.2.2 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna (CF – Carbon Fiber) jsou krystalická s velmi vysokou pevností a tuhostí, ale s nízkou tažností. Pro zvýšení odolnosti vláken proti vzájemnému poškozování při dalším zpracování a zlepšení soudržnosti s matricí se uhlíková vlákna povrchově upravují. Nejčastěji se využívá elektrochemická úprava povrchu. V porovnání se skleněnými vlákny jsou uhlíková vlákna křehčí a silně anizotropní. Mezi výhody patří například snášenlivost s lidskou tkání nebo vysoká odolnost proti korozi. Uhlíkové vlákna se vyrábí z celulózy, polyakrylonitrilu nebo smoly [20].



Obr. 20 Mikrostruktura uhlíkového vlákna [20]

3.2.3 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna (AF – Aramid Fiber) jsou vlákna na bázi lineárních organických polymerů, jejichž kovalentní vazby jsou orientovány ve směru osy vlákna. Velkou výhodou aramidových vláken je vysoká pevnost a tuhost. Teoretická pevnost je kolem 200 000 N/mm². Jediná vlákna blíží se podobným vlastnostem jsou vlákna na bázi aromatických polyamidů, která dosahují při průměru 12 μm hodnot pevnosti v tahu 3 600 N/mm² a E-modulu 125 000 N/mm². Aramidová vlákna jsou nejlehčí vyztužující vlákna, a z důvodu vyšší meze pevnosti v tahu než v tlaku jsou aramidové kompozity vhodné pro lehké konstrukce zatěžovány na tah [20].

Tab. 2 Porovnání vlastností aramidového vlákna v závislosti na směru vláken [20]

Vlastnosti	Ve směru vláken ()		Kolmo na vlákno (⊥)	
	Tah	Tlak	Tah	Tlak
E-modul (N·mm ⁻²)	80 000	80 000	6 500	5 100
Pevnost (N·mm ⁻²)	1 800	230	8	53
Tažnost (%)	2,2	0,5	0,16	1,4
Příčné smrštění	0,3	0,3	0,025	0,02
Součinitel teplotní roztažnosti (K ⁻¹)	-2 · 10 ⁻⁶		70 · 10 ⁻⁶	
Vodivost (S·m ⁻¹)	~ 2 · 10 ⁻¹³		-	

3.2.4 Přírodní vlákna

Z přírodních vláken jsou vhodná pouze rostlinná vlákna z důvodu obsahu celulózy. Mezi ně patří len, konopí, sisal, juta, ramie a bavlna. Mezi přednosti přírodních vláken patří nízká hustota, malá abrazivita při mechanickém opracování, dostatečná pevnost v tahu a měrná hmotnost. Proto jsou přírodní vlákna jednou z alternativ pro lehké konstrukce [20].

Tab. 3 Porovnání vlastností skleněného vlákna a přírodních vláken [20]

Vlastnosti \ Vlákno	Sklo	Konopí	Len	Juta	Sisal
E-modul (N·mm ⁻²)	75 000	70 000	30 000	55 000	20 000
Mez pevnosti v tahu (N·mm ⁻²)	3 500	600	750	550	600
Tažnost (%)	4	1,6	2,0	2,0	2,0
Hustota (g·cm ⁻³)	2,54	1,45	1,48	≈ 1,4	1,45

3.3 Částicové kompozity

Polymerní matrice se vyztužují především anorganickými částicemi. Takový kompozit má oproti polymeru větší tvarovou stálost za tepla, menší smrštitivost, větší tepelnou vodivost a menší tepelnou roztažnost. Jako částice se používají mikromleté minerály, tj. hlinitokřemičitany (mastek, kaolin), vrstevnaté hlinitokřemičitany (slídy) a uhličitany (vápenec a těživec) [19].

3.4 Výhody a nevýhody kompozitních materiálů

Tak jako každý materiál, mají i kompozitní materiály své stinné stránky. Uvedme si tedy pár výhod a nevýhod.

Výhody:

- Velká pružnost při deformaci.
- Vysoká pevnost a tuhost.
- Nízký součinitel teplotní délkové roztažnosti.
- Velké množství kombinací matrice a vláken.

Nevýhody:

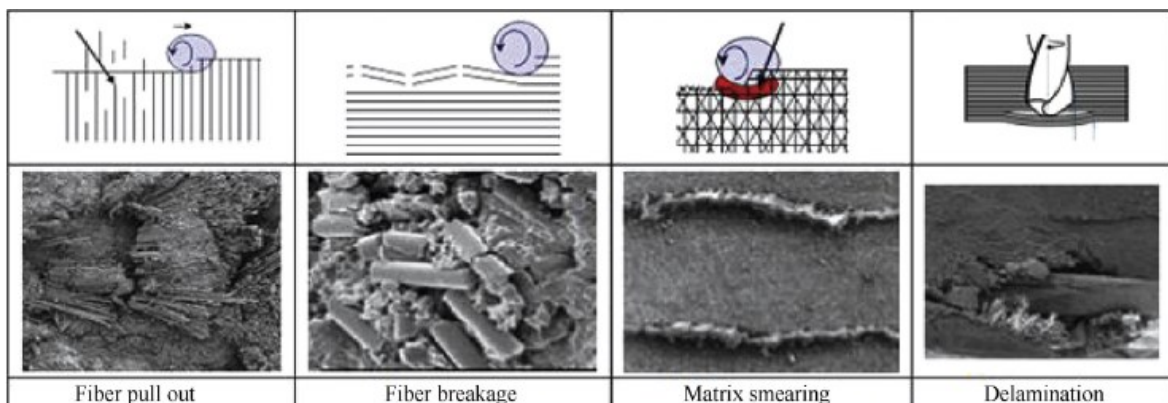
- Vysoké náklady pro dimenzování složitých konstrukcí.
- Malá pevnost v tahu v kolmém směru na uložení vláken.
- Složitá oprava např. při nárazu [20].

3.5 Použití kompozitních materiálů

Klasickým příkladem použití kompozitů jsou letecké vrtule a další části letadel jako např. části křídel nebo konstrukční části kosmických dopravních prostředků. Aramidová vlákna (obchodní název Kevlar) mají význam, pokud klademe nárok na dobrou funkci velmi zatěžovaných výrobků. Jejich hlavní využití je v leteckém, kosmickém a obranném průmyslu. Kromě vláken jsou dodávány i aramidové výtzuže ve formě tkaných látek, např. pro výrobu neprůstřelných vest. Tyto kompozity jsou obtížně obrobitelné běžnými nástroji, a proto jsou často obráběny vodním paprskem nebo laserem [20].

3.6 Obrobitelnost a obrábění kompozitů

Kompozitní materiály jsou vzhledem ke své heterogenní struktuře hodnoceny jako materiály těžkoobrobitelné. V důsledku anizotropních a heterogenních struktur mají konvenční metody obrábění často za následek poruchy materiálu jako je praskání matrice, vytažení vláken, bobtnání nebo delaminace – viz *Obr. 21*. Takové poruchy mohou mít velmi nepříznivé účinky na kvalitu povrchu výrobku, přičemž toto chování není způsobeno pouze heterogenní a anizotropní strukturou, ale také způsobem obrábění a její optimalizace. Ve studiích zaměřených na tuto problematiku je uvedeno, že kvalita povrchu závisí na řezných parametrech, geometrii nástroje a řezných silách. Pro obrábění se používají běžné metody jako je soustružení, frézování, vrtání apod.



Obr. 21 Příklady poruch kompozitního materiálu při obrábění – vytažení vláken (fiber pull out), rozbití vláken (fiber breakage), tavení matrice (matrix smearing) a delaminace (delamination) [27]

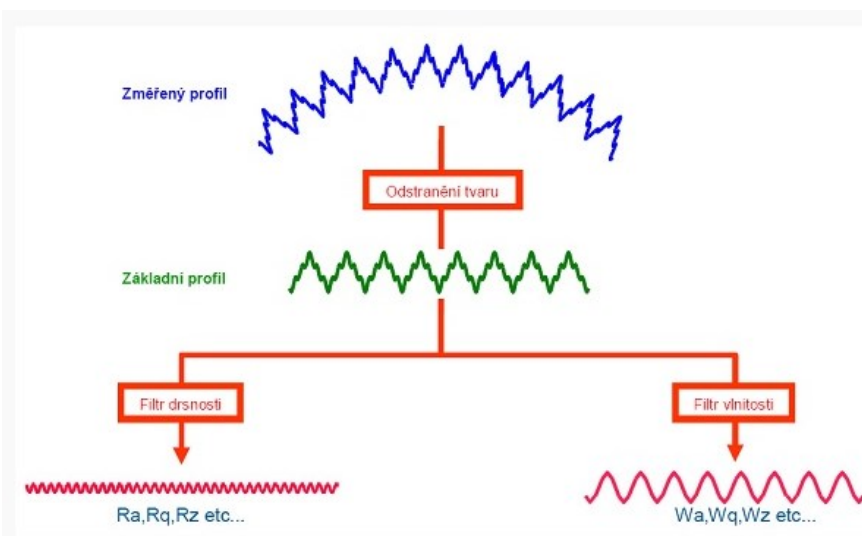
Drsnost povrchu se zlepšuje se zvyšující se řeznou rychlostí, zatímco se zvyšujícím se posuvem se zhoršuje (uvedl ve své práci Erkan a Isık [30]). Při měření drsnosti povrchu při obrysovém frézování bylo zjištěno, že největší efekt na průměrnou drsnost povrchu má počet řezných hran nástroje, po kterém následuje řezná rychlost a pak hloubka řezu (uvedl ve své práci Takmaz a spol. [31]) [27].

4 HODNOCENÍ JAKOSTI OBROBENÉ PLOCHY

Pod pojmem „jakost“ z hlediska technologie výroby je třeba chápat přesnost rozměrů, přesnost geometrického tvaru, polohy a drsnosti povrchu. K těmto hodnotám přistupuje ještě sledování chemických a fyzikálních změn vlastností materiálu v povrchové vrstvě obrobené součásti, vzniklých v důsledku vlastního procesu řezání. Jakost povrchu a vlastnosti povrchové vrstvy ovlivňují velmi výrazně životnost a spolehlivost provozu součástí [23].

4.1 Základní pojmy

Základní definice dle ČSN EN ISO 4287 (popisující termíny, definice a parametry povrchu) stanovuje, že drsnost je souhrn nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, které nevyhnutelně vznikají při výrobě nebo jejím vlivem. Na reálném povrchu se překrývají mikronerovnosti (stopy po řezném nástroji), makronerovnosti (vlnitost povrchu způsobena často vibrační soustavou Stroj – Nástroj – Obrobek – Prostředí) a je nutné je rozdělit na drsnost a vlnitost povrchu (odfiltrovat). Do hodnocení povrchu se nepočítají vady, tj. praskliny, škrábance apod. [24].

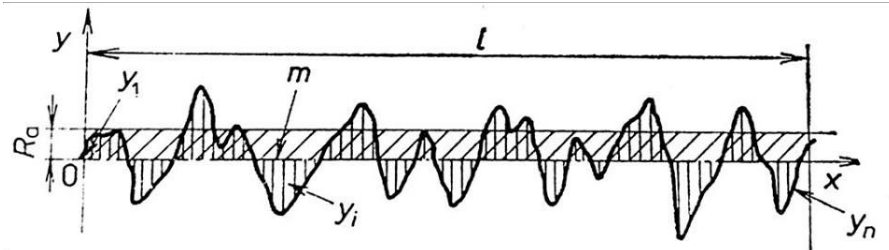


Obr. 22 Dělení povrchu na drsnost a vlnitost [24]

Nejvíce využívané parametry drsnosti (tzv. 2D parametry) :

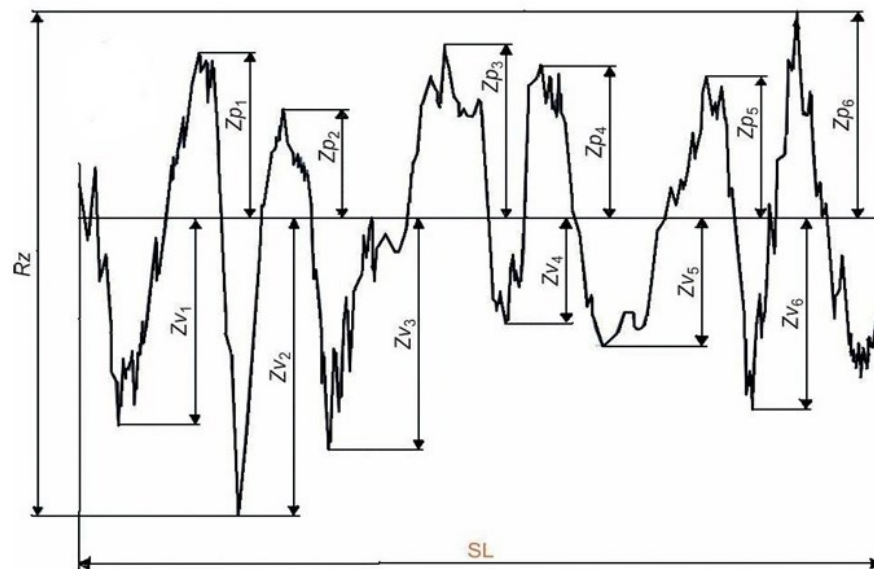
- **R_a – střední aritmetická úchylka profilu**

Je to střední aritmetická hodnota absolutních úchylek profilu v rozsahu základní délky. Geometricky se tento parametr vyjadřuje jako výška obdélníku o stejné ploše jako nerovnosti profilu. Parametr R_a však nevypovídá o tom, jak povrch vypadá, ale je základní pro popis mikrogeometrie povrchu [22].

Obr. 23 Vyjádření hodnoty R_a [22]

- **R_z – maximální výška profilu**

Je to výšková charakteristika drsnosti povrchu. Je určena vzdáleností mezi maximální prohlubní profilu a maximálním výstupkem profilu [22].

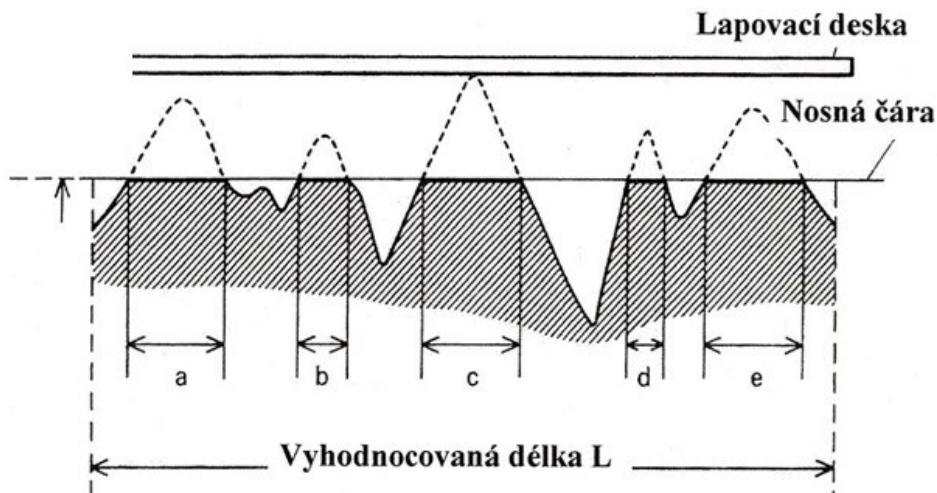
Obr. 24 Vyjádření hodnoty R_z [24]

- **R_q – střední kvadratická úchylka profilu**

Parametr R_q se využívá pro výškové zhodnocení profilu povrchu. Často se uvádí, že hodnoty R_a a R_q jsou v podstatě rovnocenné. Běžně se uvažuje $R_q \approx 1,1R_a$. Konstanta uvedeného poměru však může vzrůst až na hodnotu 1,5 (hodnota 1,1 odpovídá soustruženým povrchům, broušené povrchy odpovídají hodnotě 1,2 – 1,3 a povrchy lapované, superfinišované mají hodnoty koeficientu vyšší) [22].

- **R_{mr} – materiálový poměr**

Je poměrem délky nosné plochy v kterékoliv hloubce profilu k celkové délce profilu. Vyjadřuje se nejčastěji v procentech a je hojně využíván v praxi [24].



Obr. 25 Vyjádření parametru R_{mr} [24]

4.2 Měření drsnosti povrchu

Pro měření drsnosti povrchu existuje mnoho kontrolních metod a měřících přístrojů fungujících na různých fyzikálních principech. Základní rozdělení měření drsnosti povrchu je následující:

- **Metoda kvalitativní**

Při kvalitativním posuzování se drsnost povrchu určuje pomocí lidských smyslů. Kontrolovaný povrch se porovnává se vzorovými plochami (vzorkovnice) zrakem a hmatem. Lze také využít optické pomůcky jako je například lupa nebo komparační mikroskop [22].



Obr. 26 Vzorkovnice [24]

- **Metoda kvantitativní**

Při této metodě se využívá matematický popis parametrů povrchu. V praxi se používají tzv. profilometry. Často se však profilometrům říká drsnoměry. Tento název je však zavádějící kvůli tomu, že tyto stroje dokážou měřit i vlnitost popřípadě tvar [25].

Dále lze rozdělit měřicí přístroje na dvě základní kategorie:

- **Přístroje kontaktní**

Kontaktní přístroj znamená, že speciálně upravený hrot snímá souřadnice vyhodnocovaného povrchu, které jsou potom počítačově zpracovány. Jedná se o jednu z nejstarších metod hodnocení, která bývala využívána již ve dvacátých letech minulého století. Kontaktní přístroj se skládá z části mechanické a elektronické. Mechanická část se skládá ze stolku, kde je umístěn měřený objekt a ramena se snímacím hrotem. Elektronická část slouží k transformaci mechanického signálu generovaného snímacím hrotem na elektrický signál [25].

- **Přístroje bezkontaktní**

V laboratorním a vědeckém prostředí se využívají přístroje, které pracují bezkontaktně (pracují na principu bezkontaktních snímačů). Nejznámější jsou snímače laserové, popř. CLA snímače [25].

5 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI A CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

V první kapitole teoretické části jsem se zabýval frézováním, jeho aspekty a inovativními technologiemi tohoto odvětví. Další kapitola se zabývá programováním CNC strojů. Následující část má seznámit čtenáře s kompozitními materiály. V poslední kapitole je rozebrána problematika hodnocení jakosti obrobenej plochy.

Jedním z cílů praktické části je zhodnocení šesti druhů nástrojů od firmy SECO při obrábění sklolaminátu využitím metody adaptivního frézování. Dalším cílem je určení, zdali je adaptivní frézování vhodné pro tvorbu kapes ve sklolaminátu. Hodnoceny budou řezné síly, jakost obrobenej ploch, schopnost nástroje dodržet rozměr zadané geometrie, velikost otřepů, opotřebenj nástrojů a rozbor třísek. Následně je porovnána metoda adaptivního frézování s klasickým hrubovacím frézováním.

Experiment se sestává z volby šesti nástrojů pro obrábění, CNC obráběcího stroje a přípravy vzorků sklolaminátu. Následně je vytvořen program pro CNC v softwaru NX 12. Samotný experiment bude proveden v dílně na budově U5.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 PŘÍPRAVA EXPERIMENTU

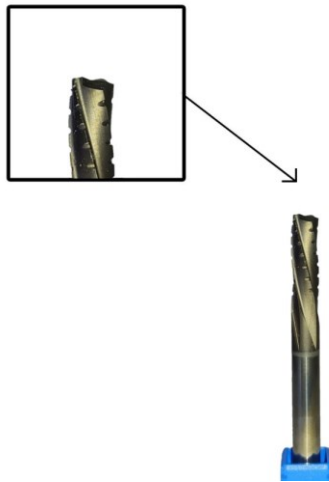
Před začátkem experimentu bylo nutno učinit volbu nástrojů pro obrábění, zvolit sklolaminát a vybrat CNC stroj.

6.1 Volba nástrojů

Frézy k provedení experimentu musely být vhodné pro obrábění kompozitů. Z toho důvodu bylo vybráno následujících šest nástrojů firmy SECO (jeden typ nástroje byl využit pro obě obráběcí strategie – tedy celkem sedm nástrojů). Každá z uvedených fréz má průměr 6 mm a je povlakována. Pět nástrojů disponuje povlakem DURA (diamant) a jeden nástroj povlakem NXT (Titan Aluminium Nitrid - TiAlN).

6.1.1 Nástroj 860060Z5.0-DURA

Z důvodu přehlednosti bude fréza 860060Z5.0-DURA dále uváděna jako T1.



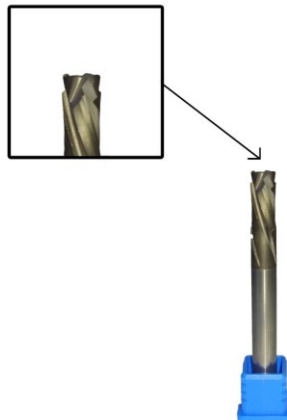
Obr. 27 Fotografie a detail řezné hrany nástroje T1

Tab. 4 Parametry nástroje T1 [28]

Obráběcí průměr [mm]	6,000
Max. hloubka řezu v bočním směru posuvu [mm]	18,0
Celková délka [mm]	70,0
Rohový rádius [mm]	0
Počet břitů [-]	5
Povlak	DURA
Cena [Kč]	3464

6.1.2 Nástroj 840060R050Z4.0-DURA

Z důvodu přehlednosti bude fréza 840060R050Z4.0-DURA dále uváděna jako T2.



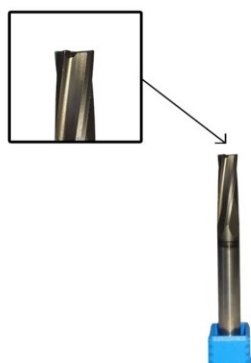
Obr. 28 Fotografie a detail řezné hrany nástroje T2

Tab. 5 Parametry nástroje T2 [28]

Obráběcí průměr [mm]	6,000
Max. hloubka řezu v bočním směru posuvu [mm]	12,0
Celková délka [mm]	65,0
Rohový rádius [mm]	0,50
Počet břitů [-]	4
Povlak	DURA
Cena [Kč]	3345

6.1.3 Nástroj 880060R020Z4.0-DURA

Z důvodu přehlednosti bude fréza 880060R020Z4.0-DURA dále uváděna jako T3 při adaptivním frézování a T7 při hrubovacím frézování.



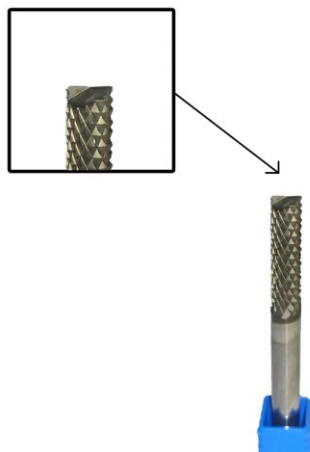
Obr. 29 Fotografie a detail řezné hrany nástroje T3 / T7

Tab. 6 Parametry nástroje T3 / T7 [28]

Obráběcí průměr [mm]	6,000
Max. hloubka řezu v bočním směru posuvu [mm]	18,0
Celková délka [mm]	65,0
Rohový rádius [mm]	0,20
Počet břitů [-]	4
Povlak	DURA
Cena [Kč]	3041

6.1.4 Nástroj 870060.0-DURA

Z důvodu přehlednosti bude fréza 870060.0-DURA dále uváděna jako T4.



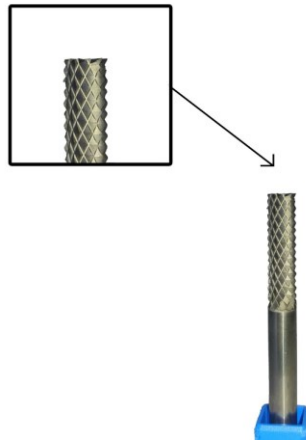
Obr. 30 Fotografie a detail řezné hrany nástroje T4

Tab. 7 Parametry nástroje T4 [28]

Obráběcí průměr [mm]	6,000
Max. hloubka řezu v bočním směru posuvu [mm]	18,0
Celková délka [mm]	65,0
Rohový rádius [mm]	0
Počet břitů [-]	2
Povlak	DURA
Cena [Kč]	2560

6.1.5 Nástroj 871060.0-DURA

Z důvodu přehlednosti bude fréza 871060.0-DURA dále uváděna jako T5.



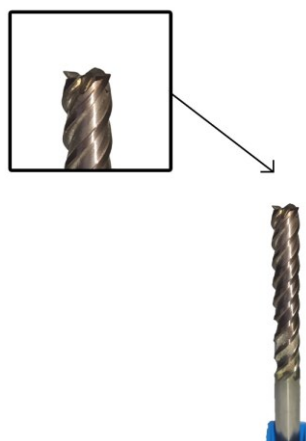
Obr. 31 Fotografie a detail řezné hrany nástroje T5

Tab. 8 Parametry nástroje T5 [28]

Obráběcí průměr [mm]	6,000
Max. hloubka řezu v bočním směru posuvu [mm]	18,0
Celková délka [mm]	65,0
Rohový rádius [mm]	0
Počet břitů [-]	2
Povlak	DURA
Cena [Kč]	2560

6.1.6 Nástroj JS514060D4C.0Z4-NXT

Z důvodu přehlednosti bude fréza JS514060D4C-NXT dále uváděna jako T6.



Obr. 32 Fotografie a detail řezné hrany nástroje T6

Tab. 9 Parametry nástroje T6 [28]

Obráběcí průměr [mm]	6,000
Max. hloubka řezu v bočním směru posuvu [mm]	35,0
Celková délka [mm]	75,0
Rohový rádius [mm]	0
Počet břitů [-]	4
Povlak	NXT
Cena [Kč]	935

6.2 Sklolaminátová pružina

Pro experiment byl použit sklolaminát v podobě pružiny. Důvodem výběru je nutnost obrábění těchto materiálů v případě výroby otvorů, kapes, bočních vybrání apod. Pružina byla vyrobena z jednosměrného prepregu + plátna a matrice DT 806. Základní informace o prepregu je v Tab. 10 a materiálový list matrice je v příloze P I.

Tab. 10 Základní informace o složení sklolaminátové pružiny

Jednosměrný prepreg	
Osnova tkaniny	Plátnová
Plošná hmotnost [g/m ²]	425
Hmotností poměr k ose x a y [%]	90/10
Typ vláken	EC95x136 tex/EC9 68 tex



Obr. 33 Sklolaminátová pružina

Pružina byla před obráběním nařezána kotoučovou pilou na kostky o přibližné velikosti 76×76×40 mm.

6.3 CNC stroj

K obrábění byl použit stroj DMU 50 společnosti DMG MORI, který se nachází v dílnách budovy U5. Veškeré technické parametry jsou uvedeny pod Obr. 34 – viz Tab. 11.



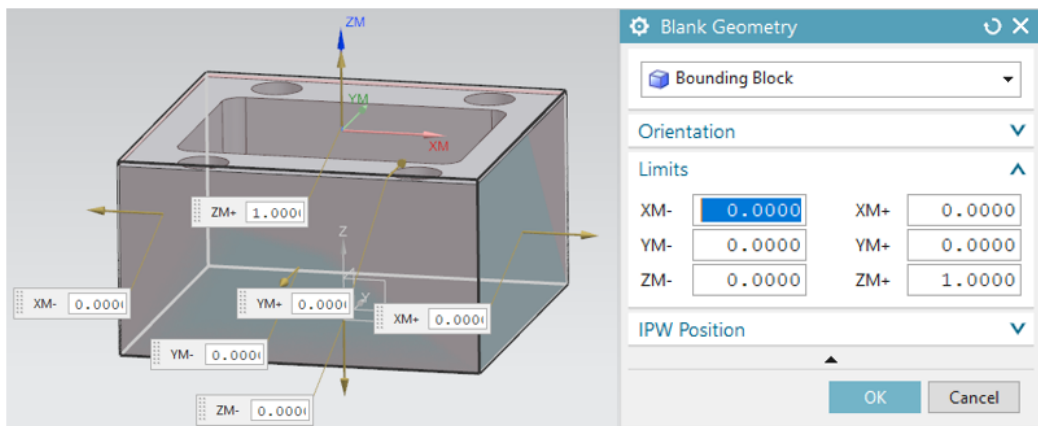
Obr. 34 CNC stroj DMU 50

Tab. 11 Technické parametry DMU 50 [29]

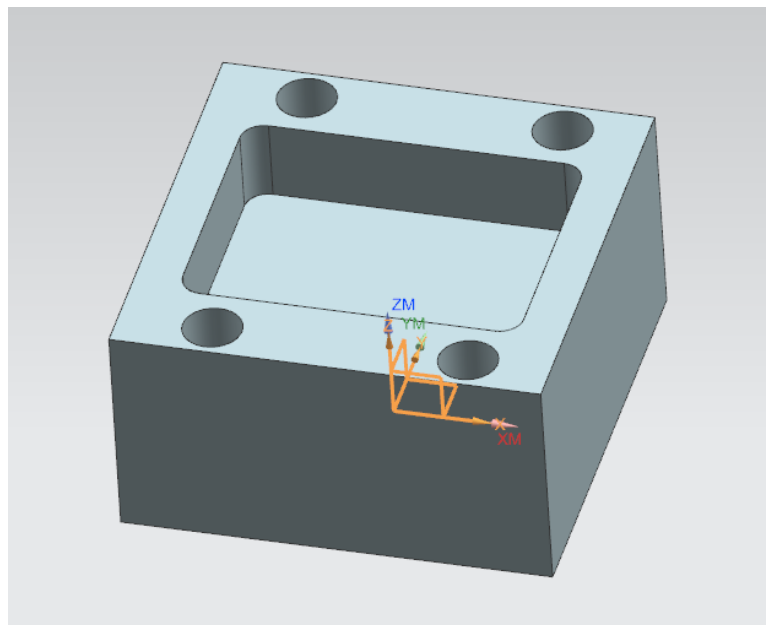
Pracovní prostor	↓
Maximální pojezd v ose X [mm]	500
Maximální pojezd v ose Y [mm]	450
Maximální pojezd v ose Z [mm]	400
Rozměry stolu	↓
Maximální zatížitelnost stolu [kg]	300
Průměr stolu [mm]	630
Rozměry obrobku	↓
Maximální výška obrobku [mm]	300
Vřeteno	↓
Standardní otáčky [ot/min]	14 000
Maximální otáčky (volitelně) [ot/min]	18 000
Výkon pohonu (100 % DC) [kW (AC)]	14
Točivý moment (100 % DC) [Nm]	84
Zásobník nástrojů	↓
Kapacita [-]	16
Maximální kapacita [-]	60
Rychloposuv	↓
Maximální pojezd v ose X [m/min]	30
Maximální pojezd v ose Y [m/min]	30
Maximální pojezd v ose Z [m/min]	30

6.4 Vytvoření modelu vzorku

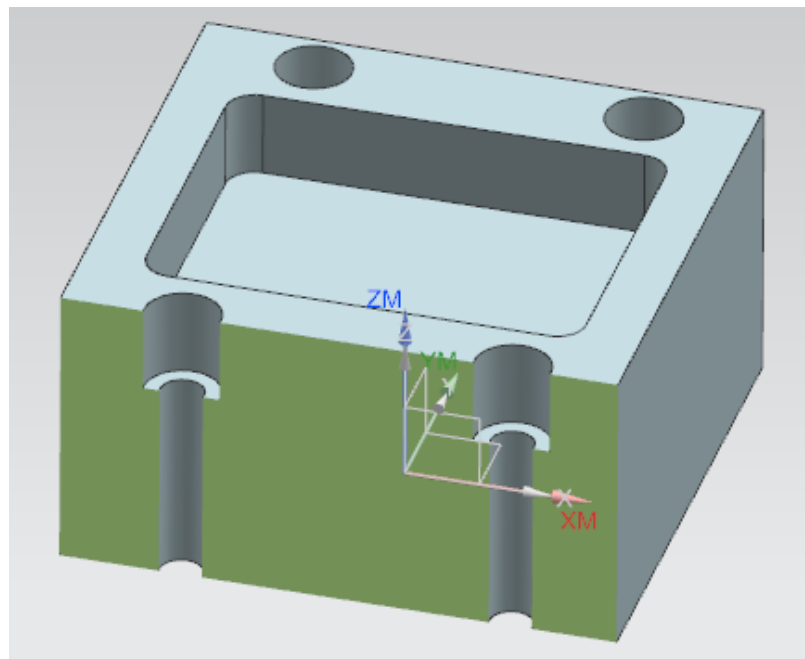
Základní model byl vytvořen v programu NX 12 o rozměrech 76×76×40 mm. Celkem však bylo vytvořeno šest modelů s rozdílnou výškou (tloušťkou) z důvodu, který je uveden v kapitole 7.1.1. Model polotovaru byl v programu NX 12 zvětšen o 1 mm, viz *Obr. 35*. Kapsu pro adaptivní a hrubovací frézování bylo nutno vycentrovat a přizpůsobit rozměrům modelu. V neposlední řadě byly vytvořeny díry pro šrouby, které celý vzorek upnou k dynamometru. Díry byly přizpůsobeny vzhledem k rozteči závitů na dynamometru – rozteč je uvedena v příloze P II.



Obr. 35 Polotovaz zvýšený v ose Z o 1 mm



Obr. 36 3D model vzorku



Obr. 37 3D model vzorku s řezem skrz díry

7 FRÉZOVÁNÍ SKLOLAMINÁTU

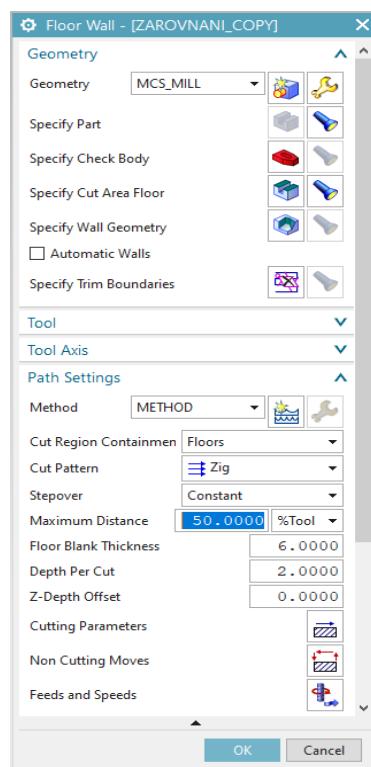
Provedení experimentu se sestává z frézování čela vzorku, zahloubení, vrtání děr a poté adaptivní a hrubovací frézování kapsy. Jednotlivé kroky budou popsány v podkapitolách níže.

7.1 Příprava vzorků pro adaptivní a hrubovací frézování

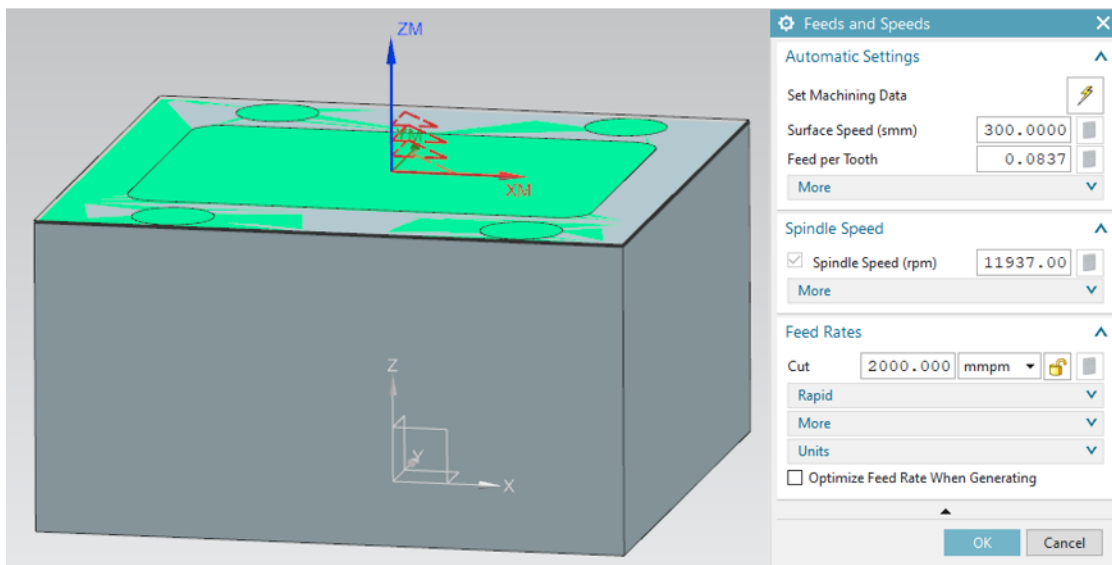
Aby byl experiment proveden podle plánu, bylo nutno podniknout určitá opatření. Jako první bylo zarovnáno čelo vzorků, aby se frézovalo do rovny plochy. Následně byly vyvrtány díry a vyfrézováno zahloubení z důvodu upnutí vzorku pomocí šroubů na dynamometr.

7.1.1 Programování obráběcích úprav v programu NX 12

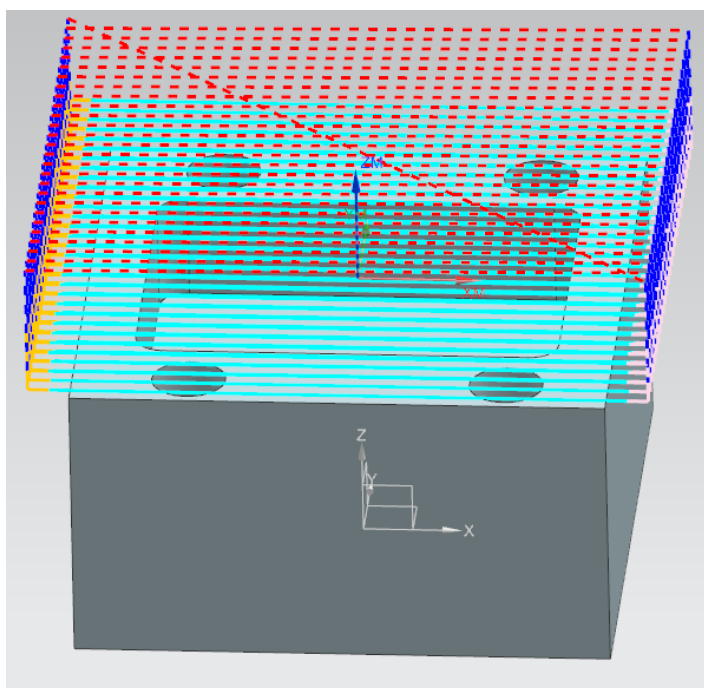
První programovanou úpravou bylo frézování čela vzorků tak, aby výsledná výška (tloušťka) vzorku byla od 40 mm do 30 mm po 2 mm. Z Obr. 33 je zjevné, že tloušťka není po celé délce pružiny stejná, a proto se tloušťky vzorků po frézování čela pohybují ve zmíněném rozmezí. K zarovnání čela byla použita funkce Floor Wall – viz Obr. 38. Ve Specify Cut Area Floor je potřeba vybrat plochu kterou chceme obrobit. Zbytek parametrů lze nastavit v sekci Path Settings a Feeds and Speeds.



Obr. 38 Dialogové okno funkce Floor Wall



Obr. 39 Řezné podmínky a obráběná plocha využitím funkce Floor Wall

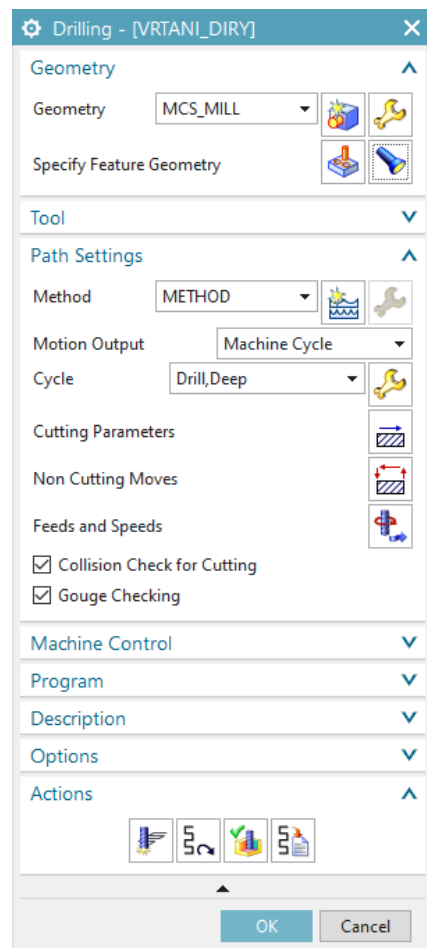


Obr. 40 Dráha nástroje při zarovnání čela

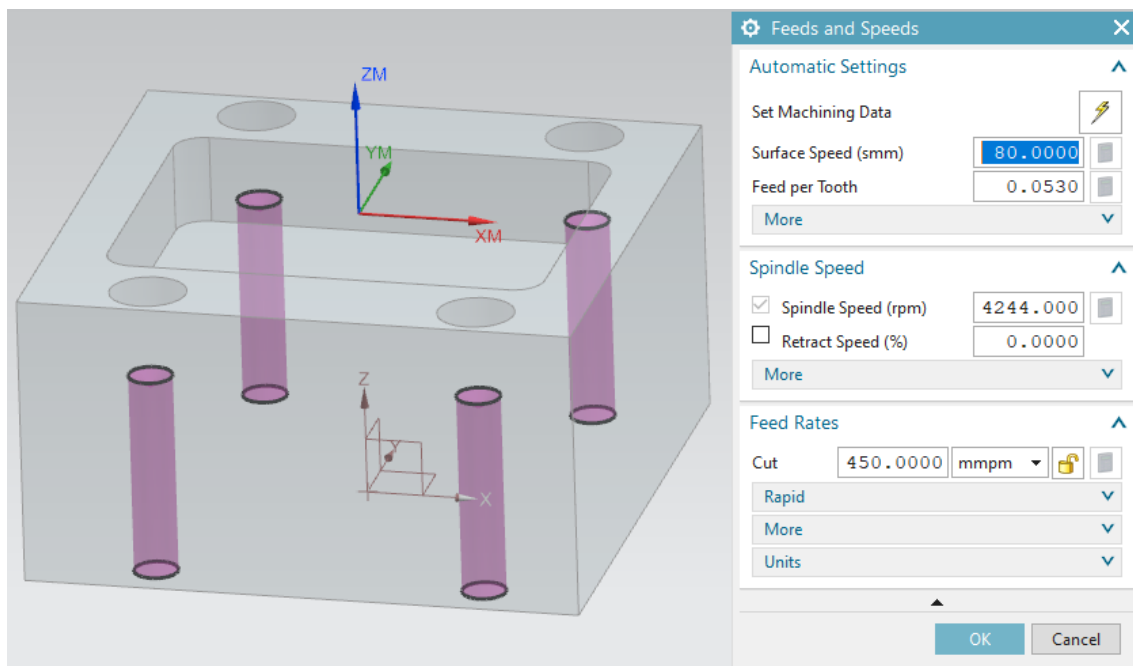
Tab. 12 Řezné podmínky funkce Floor Wall

Floor Wall	
Řezná rychlost [m/min]	300
Posuv na zub [mm]	0,0837
Otáčky [1/min]	11 937
Posuvová rychlost [mm/min]	2000
Hloubka řezu [mm]	2
Šířka záběru [% průměru nástroje]	50
Šířka záběru [mm]	3

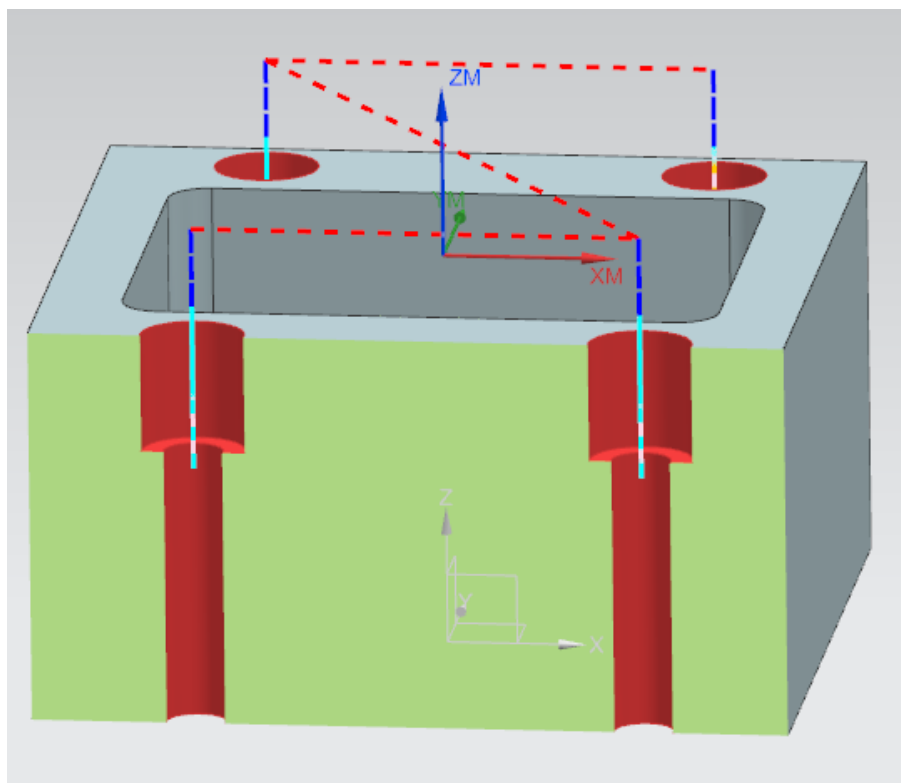
Druhou operací bylo vyvrtání děr umístěných v závislosti na rozteči závitových děr v dynamometru. K vrtání děr byla využita funkce Drilling – viz *Obr. 41*. Ve Specify Feature Geometry je nutno označit díry, které chceme vrtat a zbytek parametrů nastavíme ve Feeds and Speeds.



Obr. 41 Dialogové okno funkce Drilling



Obr. 42 Řezné podmínky a označení vrtaných děr pomocí funkce Drilling

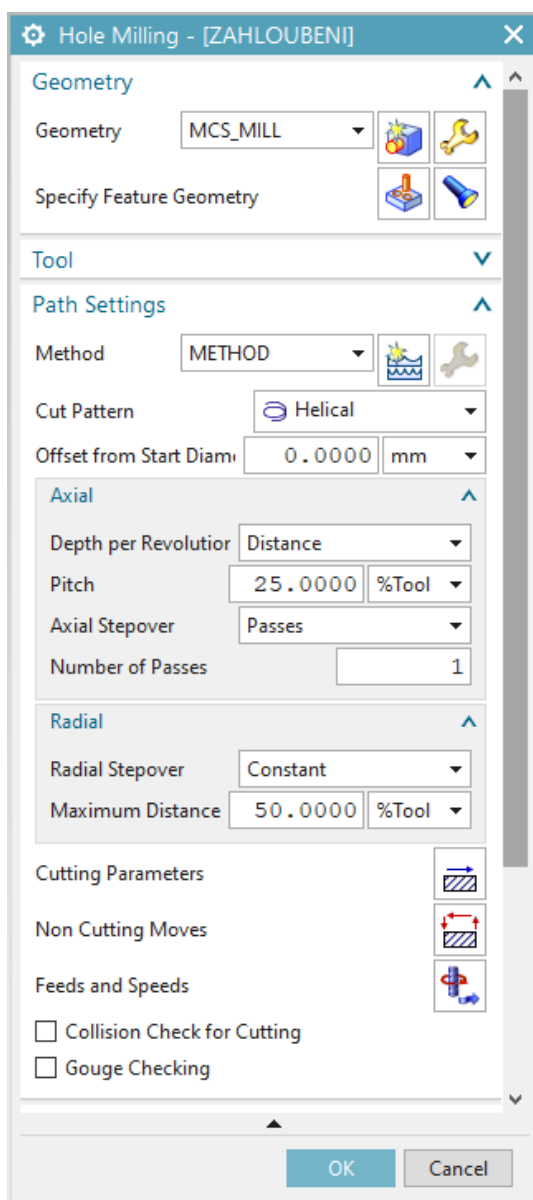


Obr. 43 Dráha nástroje při vrtání děr (pohled v řezu)

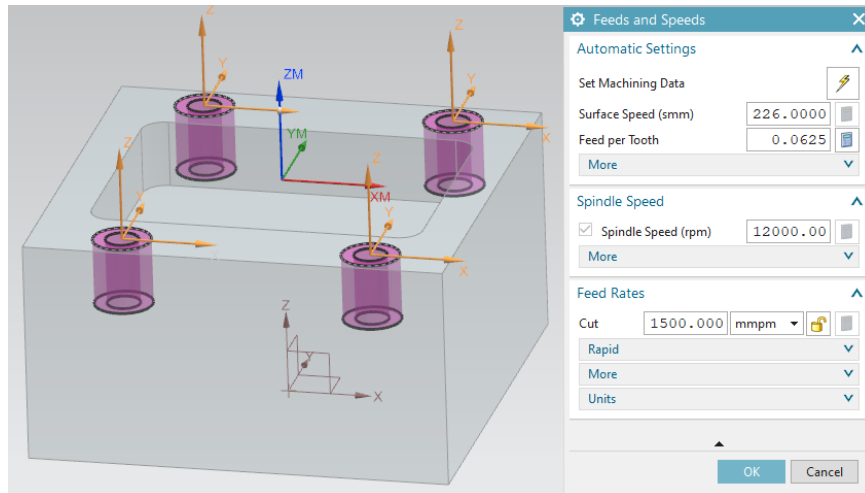
Tab. 13 Řezné podmínky funkce Drilling

Drilling	
Řezná rychlost [m/min]	80
Posuv na zub [mm]	0,0530
Otáčky [1/min]	4 244
Posuvová rychlost [mm/min]	450

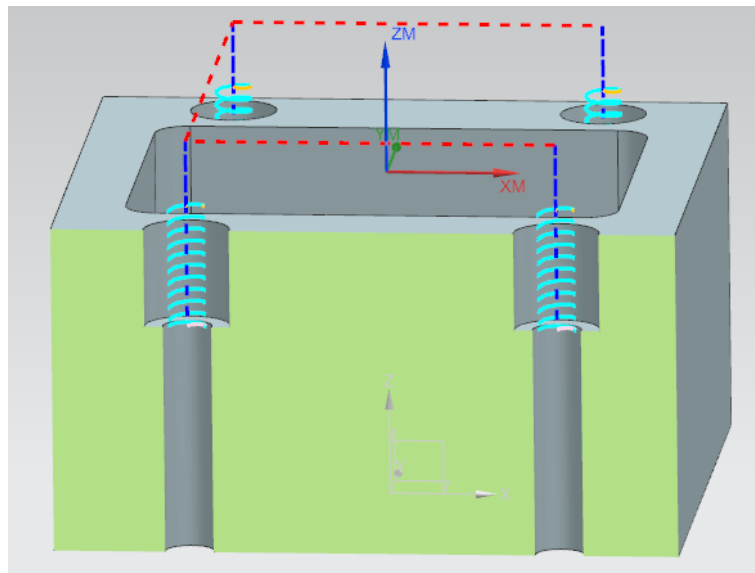
Poslední operací před programováním adaptivního frézování bylo vytvoření zahloubení pro hlavy šroubů. K zahloubení byla použita funkce Hole Milling – viz Obr. 44. Ve Specify Feature Geometry je potřeba označit místo zahloubení a zbylé parametry lze nastavit v okně Path Settings a Feeds and Speeds.



Obr. 44 Dialogové okno funkce Hole Milling



Obr. 45 Řezné podmínky a označené otvory pro zahloubení

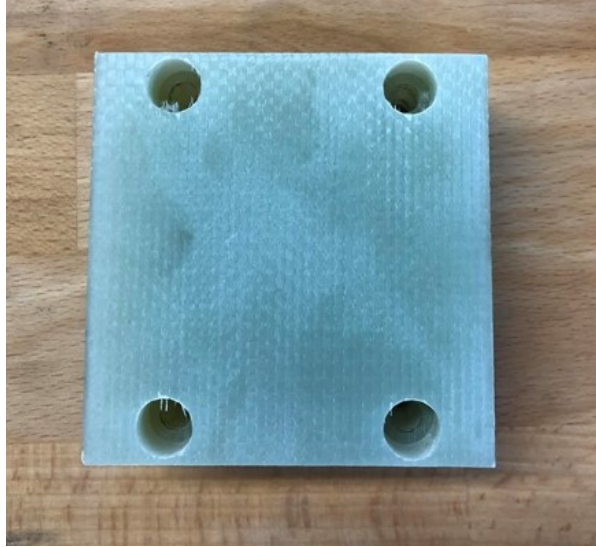


Obr. 46 Dráha nástroje při vytváření zahloubení v místě děr (pohled v řezu)

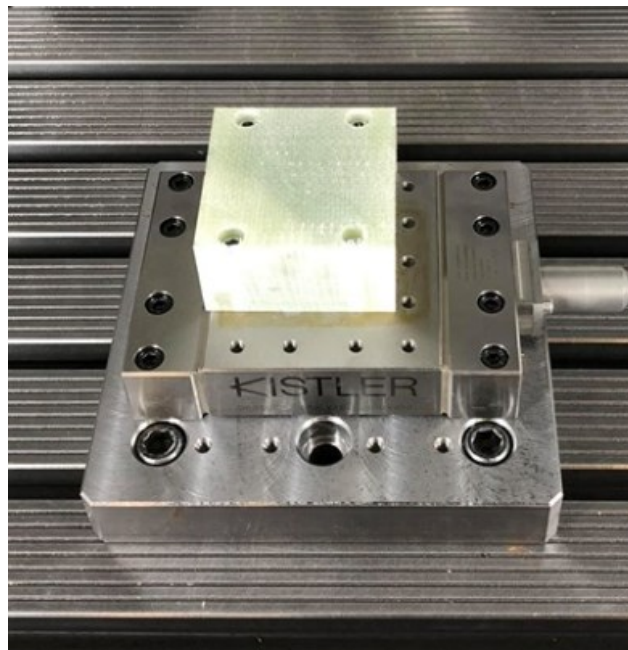
Tab. 14 Řezné podmínky funkce Hole Milling

Hole Milling	
Řezná rychlost [m/min]	226
Posuv na zub [mm]	0,0625
Otáčky [1/min]	12 000
Posuvová rychlost [mm/min]	1500
Hloubka řezu na otáčku [% průměru nástroje]	25
Hloubka řezu na otáčku [mm]	1,5
Šířka záběru [% průměru nástroje]	50
Šířka záběru [mm]	3

Po vytvoření veškerých výše zmíněných úprav bylo nutno vyzkoušet upnutí vzorku na dynamometr Kistler 9129AA – viz *Obr. 48*. Veškeré technické parametry jsou uvedeny v příloze P II.



Obr. 47 Vzorek po úpravách



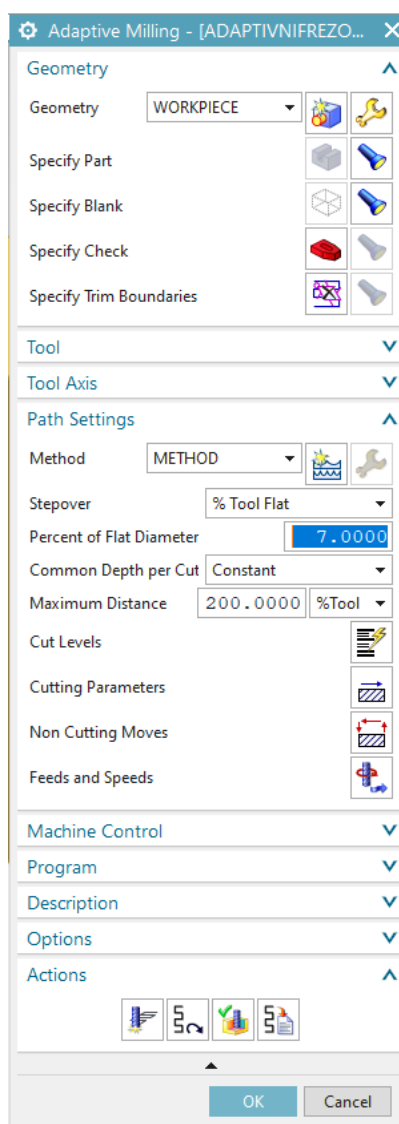
Obr. 48 Upnutý vzorek pomocí šroubů na dynamometr Kistler 9129AA

7.2 Adaptivní frézování kapsy

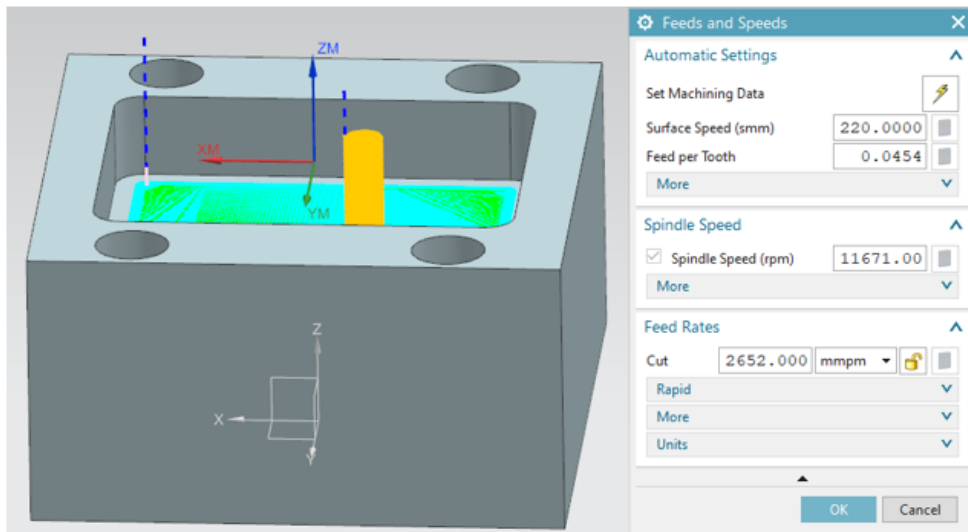
Po vytvoření dodatečných úprav bylo na řadě vytvoření programu pro adaptivní frézování a nastavení vhodných řezných podmínek. Kapsa měla rozměr 60×46 mm, hloubku 12 mm a poloměr zaoblení vnitřních hran 4 mm.

7.2.1 Programování adaptivního frézování v programu NX 12

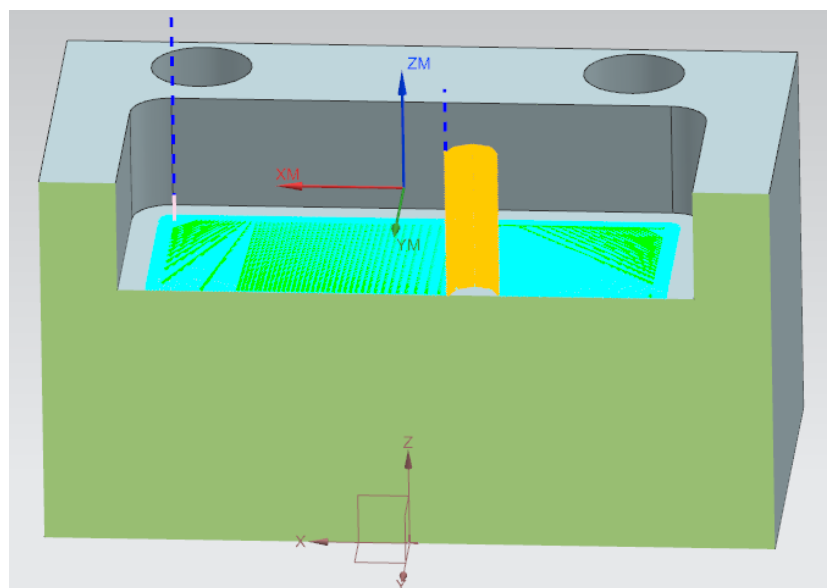
Při vytváření programu pro adaptivní frézování kapsy byla využita funkce Adaptive Milling – viz *Obr. 49*. Místo, které chceme obrábět je nutno vybrat v sekci Cut Levels a zbytek obráběcích parametrů lze nastavit v Path Settings a Feeds and Speeds. Doba běhu tohoto programu při řezných podmínkách v *Tab. 15* byla 3 minuty a 49 vteřin.



Obr. 49 Dialogové okno funkce Adaptive Milling



Obr. 50 Řezné podmínky a vyznačení místa řezu



Obr. 51 Dráha nástroje při adaptivním frézování (pohled v řezu)

Tab. 15 Řezné podmínky funkce Adaptive Milling

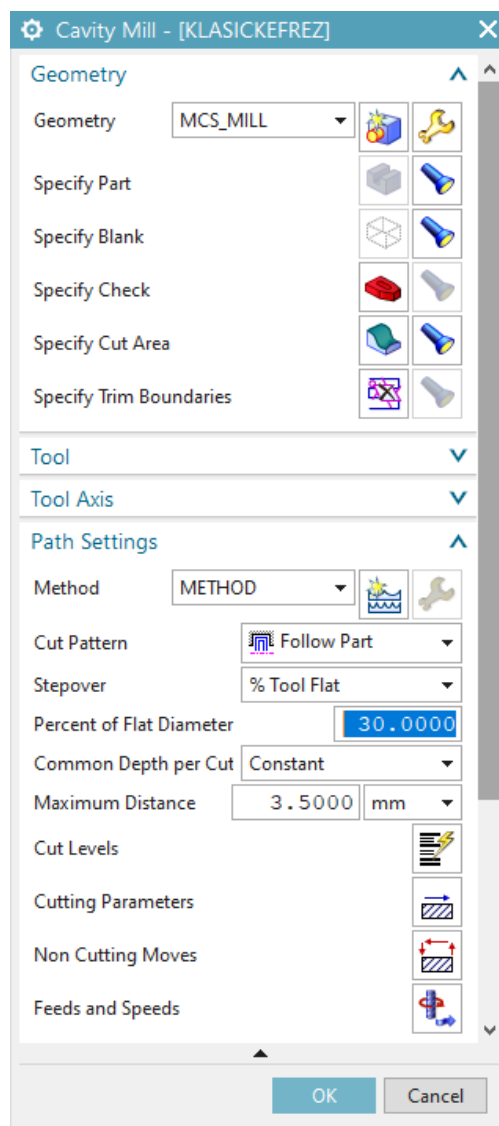
Adaptive Milling	
Řezná rychlost [m/min]	220
Posuv na zub [mm]	0,0454
Otáčky [1/min]	11 671
Posuvová rychlost [mm/min]	2652
Hloubka řezu [% průměru nástroje]	200
Hloubka řezu [mm]	12
Šířka záběru [% průměru nástroje]	7
Šířka záběru [mm]	0,42

7.3 Hrubovací frézování kapsy

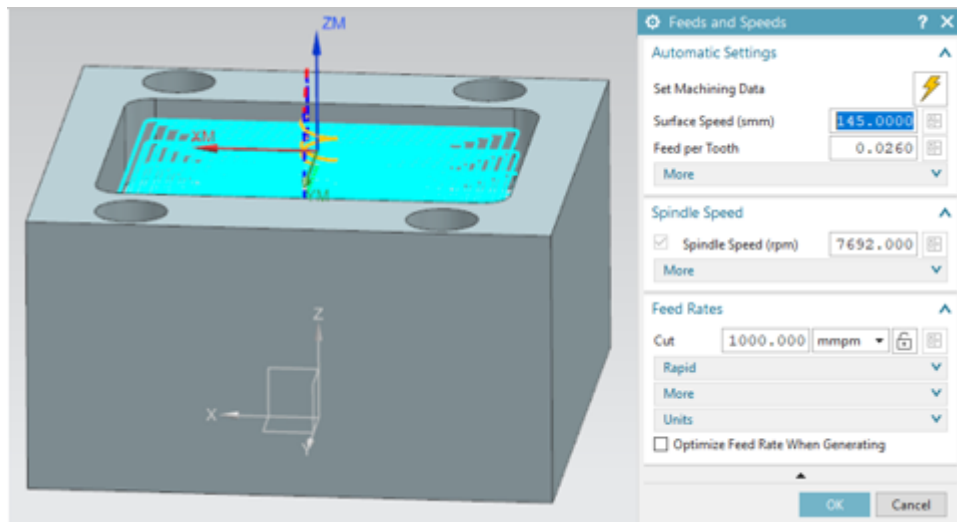
Z důvodu porovnání adaptivního frézování s hrubovacím frézováním byl vytvořen ještě jeden program včetně nastavení řezných podmínek. Pro hrubovací frézování kapsy byl použit nástroj T7, resp. T3 (nejedná se o znovupoužití nástroje T3 – pro experiment byly k dispozici dva totožné nástroje a každý byl použit pro jinou obráběcí strategii).

7.3.1 Programování hrubovacího frézování v programu NX 12

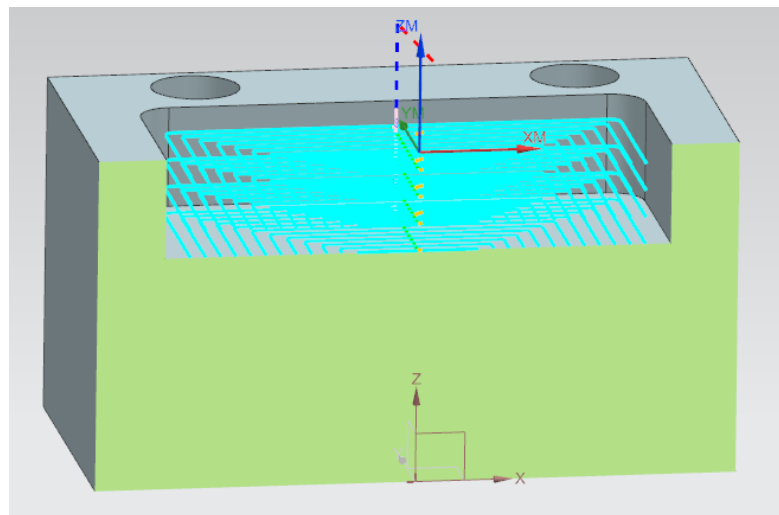
Program byl vytvořen pomocí funkce Cavity Mill – viz *Obr. 52*. Ve Specify Cut Area je nutno vybrat, kterou plochu chceme obrábět a zbytek parametrů lze nastavit v Path Settings a Feeds and Speeds. Doba běhu tohoto programu při řezných podmínkách v *Tab. 16* byla 5 minut a 26 vteřin.



Obr. 52 Dialogové okno funkce Cavity Mill



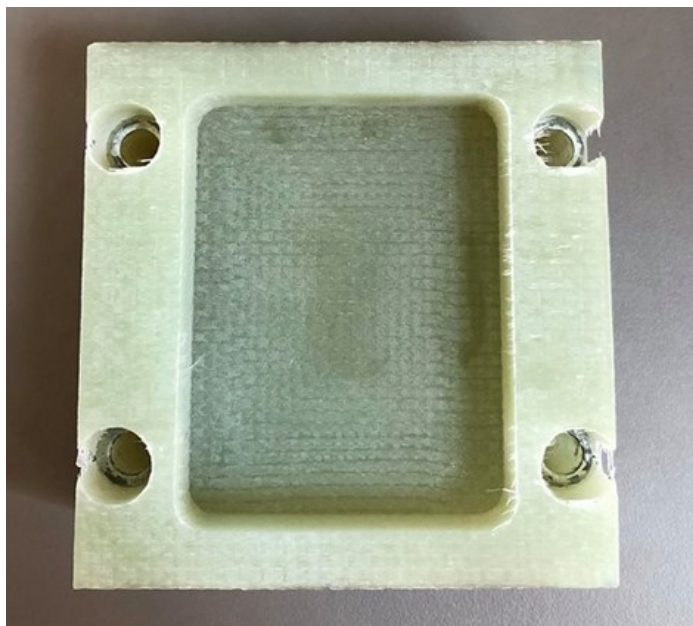
Obr. 53 Řezné podmínky a vyznačení obráběného prostoru



Obr. 54 Dráha nástroje při hrubovacím frézování (pohled v řezu)

Tab. 16 Řezné podmínky funkce Cavity Mill

Cavity Mill	
Řezná rychlost [m/min]	145
Posuv na zub [mm]	0,026
Otáčky [1/min]	7 692
Posuvová rychlost [mm/min]	1000
Hloubka řezu [mm]	3,5
Šířka záběru [% průměru nástroje]	30
Šířka záběru [mm]	1,8



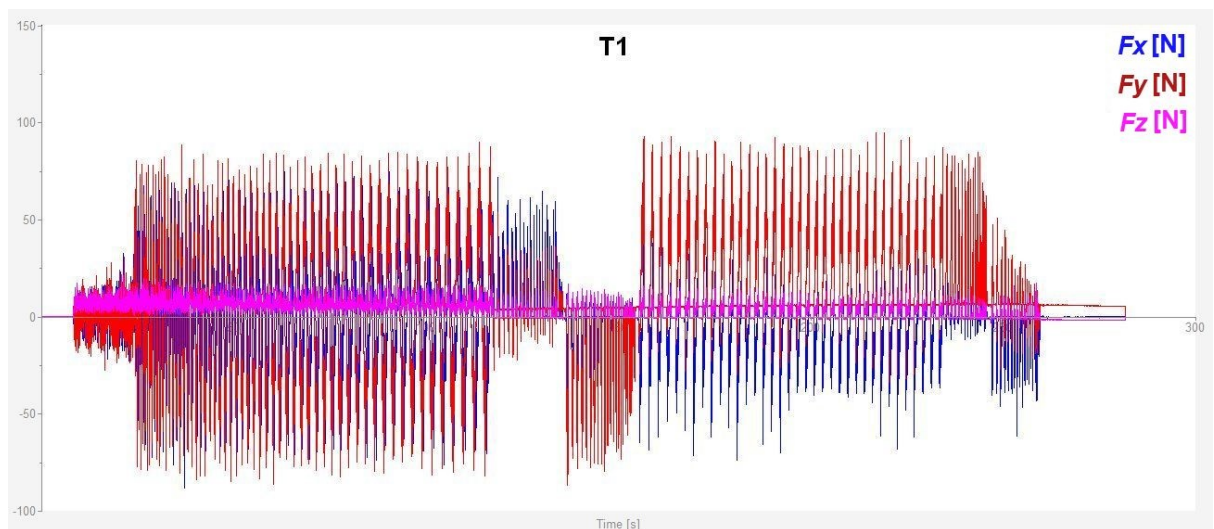
Obr. 55 Pohled na vzorek po všech obráběcích operacích

8 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT PRO ADAPTIVNÍ FRÉZOVÁNÍ

V následujících podkapitolách budou vyhodnocena naměřená data pro řezné síly, jakost obrobeneých ploch, dodržení rozměrů, velikost otřepů a rozbor třísek.

8.1 Řezné síly

Měření řezných sil bylo provedeno na dynamometru Kistler 9129AA a jejich zpracování proběhlo v softwaru Dynoware. Jeden ze záznamů řezných sil lze vidět na *Obr. 56*. Ostatní záznamy průběhů řezných sil jsou v příloze P III. V *Tab. 17* lze vidět vyhodnocení třech složek řezných sil pro jejich efektivní a maximální hodnotu. Efektivní hodnota je statistickou veličinou, která představuje druhou odmocninu prostředků čtverců okamžitých hodnot.



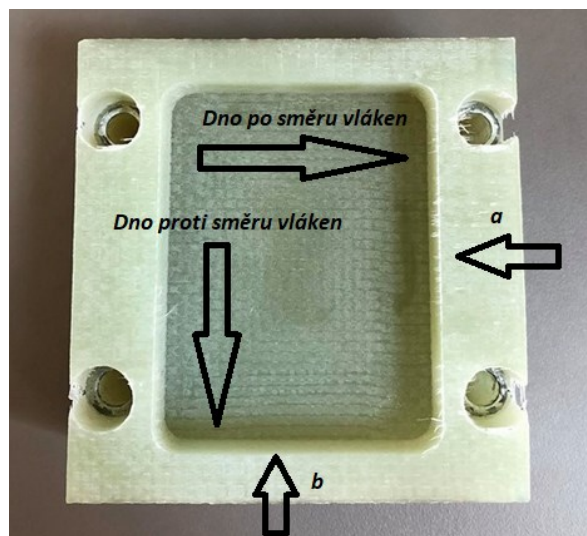
Obr. 56 Záznam řezných sil při adaptivním frézování nástrojem T1

Tab. 17 Efektivní a maximální hodnoty jednotlivých složek řezných sil při adaptivním frézování

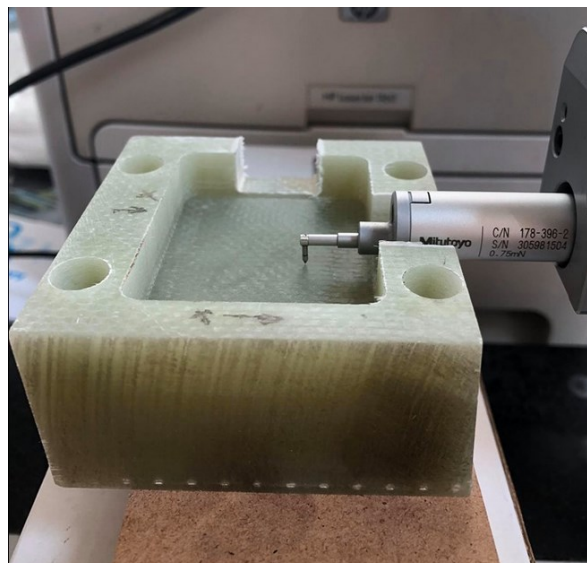
	Označení nástroje	T1	T2	T3	T4	T5	T6
F_x	Efektivní hodnota [N]	19,82	21,68	19,09	23,28	25,63	19,15
	Maximální hodnota [N]	91,01	105,80	116,20	123,40	93,95	105,90
F_y	Označení nástroje	T1	T2	T3	T4	T5	T6
	Efektivní hodnota [N]	29,73	29,24	26,60	28,34	23,04	30,25
	Maximální hodnota [N]	107,20	118,80	141,00	116,90	90,69	99,96
F_z	Označení nástroje	T1	T2	T3	T4	T5	T6
	Efektivní hodnota [N]	5,73	7,92	4,70	11,51	12,66	18,39
	Maximální hodnota [N]	25,19	48,99	28,44	51,36	46,78	101,80

8.2 Jakost obroběných ploch

Měření drsnosti povrchu proběhlo na přístroji Mitutoyo SJ-410. Hodnoceny jsou parametry R_a a R_z . Aby bylo zcela jasně určeno značení v tabulkách, na *Obr. 57* lze vidět grafický popis jednotlivých míst měření. Bylo měřeno dno po a proti směru vláken, krátká vnitřní stěna označena písmenem b a dlouhá vnitřní stěna označena písmenem a . Při měření byla výše uvedená místa měřena $14\times$, tedy celkem 56 měření pro kompletní vyhodnocení drsnosti pro jeden vzorek. Z důvodu hloubky kapsy nebylo možno provést měření drsnosti na dně vzorku. Proto byla na krátké a dlouhé stěně vyfrézována drážka, aby byla možná manipulace s měřícím hrotem uvnitř kapsy.

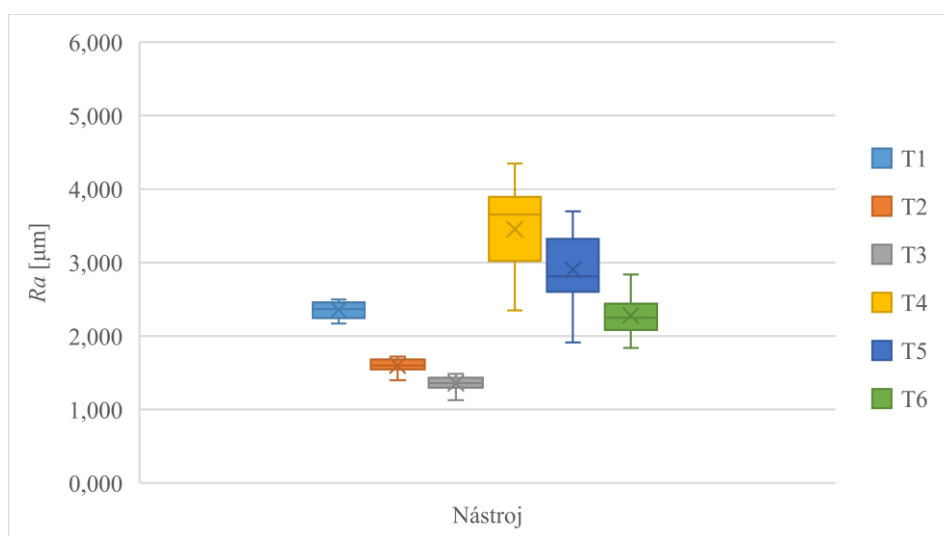


Obr. 57 Vzorek s grafickým popisem míst měření

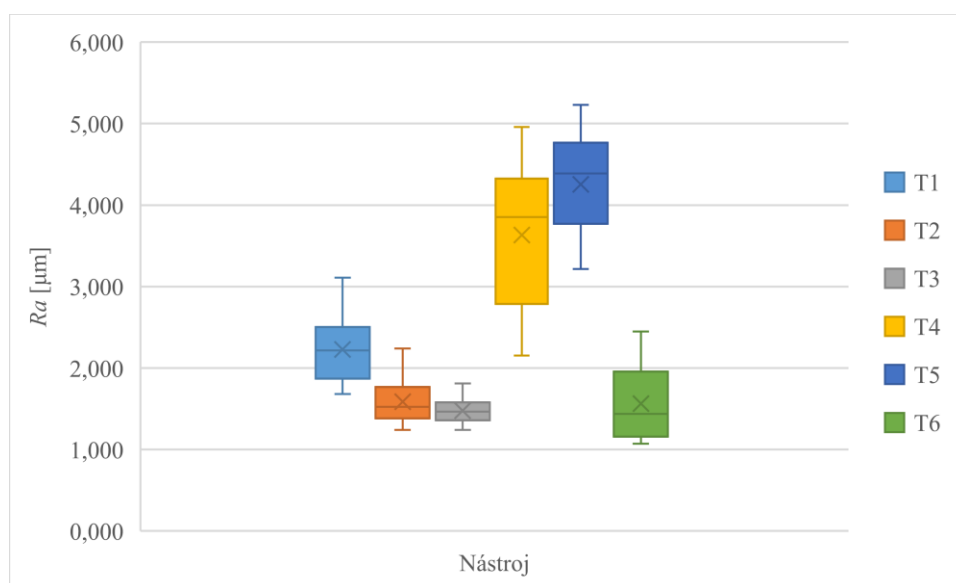


Obr. 58 Měření na přístroji Mitutoyo SJ-410

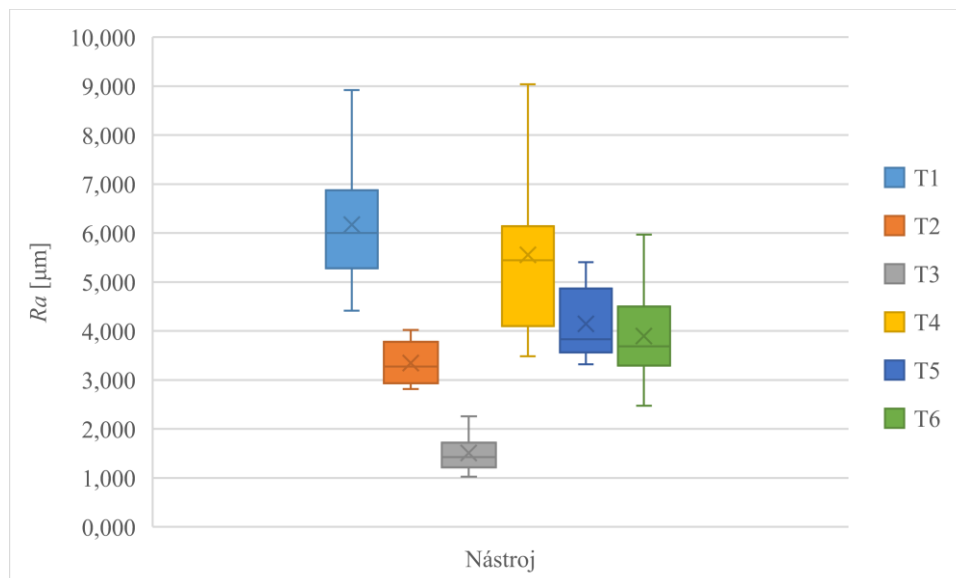
Parametry Ra a Rz jsou zpracovány ve formě krabicových grafů, kterým se lidově říká „krabice s vousy“. Horní vous zobrazuje maximální hodnotu, spodní vous pak minimální hodnotu. Čára v krabici ukazuje medián, křížek potom polohu aritmetického průměru. Velikost krabice je dána zespolu 25% percentilem a seshora 75% percentilem. Jednoduše lze říci, že mezi vousy spadají všechny hodnoty a do krabice polovina hodnot. Ještě před vyhodnocením hodnot pomocí grafů byly ze souboru dat odstraněny odlehlé hodnoty – hrubé chyby při měření. Grafy pro parametr Ra jsou v této kapitole uvedeny všechny a grafy pro parametr Rz jsou uvedeny v příloze P IV.



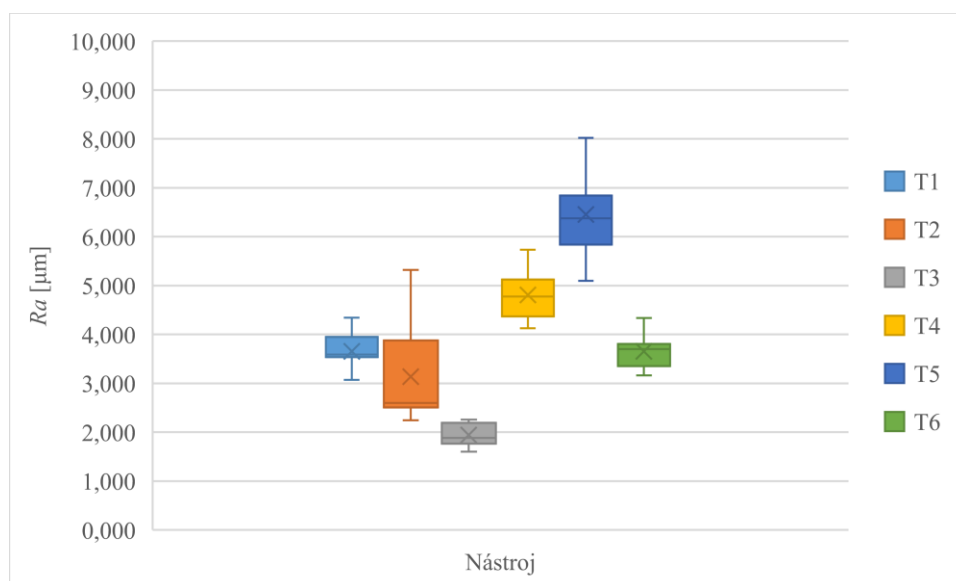
Obr. 59 Graf pro parametr Ra při měření drsnosti povrchu dna po směru vláken pro adaptivní frézování



Obr. 60 Graf pro parametr Ra při měření drsnosti povrchu dna proti směru vláken pro adaptivní frézování



Obr. 61 Graf pro parametr R_a při měření drsnosti povrchu delší vnitřní stěny pro adaptivní frézování



Obr. 62 Graf pro parametr R_a při měření drsnosti povrchu kratší vnitřní stěny pro adaptivní frézování

8.3 Dodržení rozměrů frézované kapsy

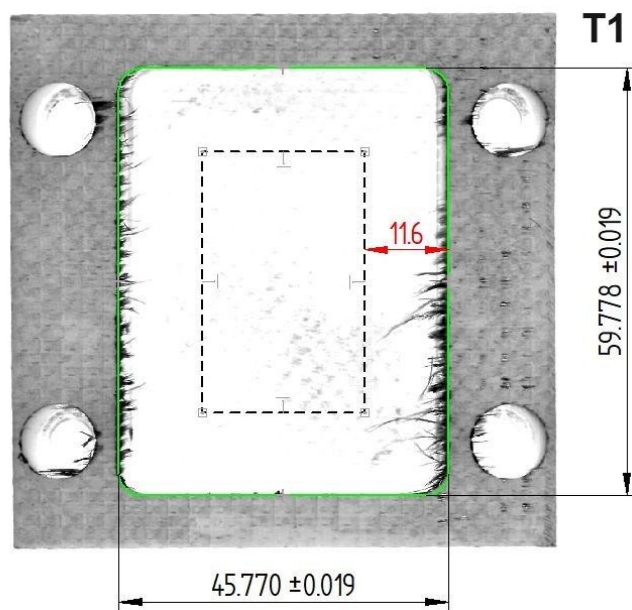
Dalším měřením bylo nutno zjistit, jestli je adaptivní frézování sklolaminátu spolehlivé z hlediska dodržení rozměrů. Kapsa o rozměrech 46×60 mm byla proměřena na CNC stroji na 16 místech proti sobě. Označení dlouhé a krátké strany je stejné jako na Obr. 57. Vypočtená diference v Tab. 18 je rozdíl teoretické hodnoty od skutečné nominální hodnoty.

Tab. 18 Rozměry kapsy pro jednotlivé nástroje pro adaptivní frézování

Nástroj	a [mm]	Diference - a [mm]	b [mm]	Diference - b [mm]
T1	59,778±0,019	0,222	45,770±0,019	0,230
T2	59,845±0,018	0,155	45,80±0,04	0,200
T3	59,89±0,01	0,110	45,913±0,012	0,087
T4	59,818±0,017	0,182	45,853±0,015	0,147
T5	59,850±0,017	0,150	45,82±0,03	0,180
T6	59,890±0,014	0,110	45,94±0,03	0,060

8.4 Otřepy

Otřepy jsou nežádoucím efektem jak z hlediska estetického, tak funkčního. Obzvláště u sklolaminátu jsou otřepy značné, a záleží tedy na geometrii nástroje, v jaké míře budou přítomny. Na Obr. 63 lze vidět znázornění otřepů a v Tab. 19 jejich maximální hodnoty. Ostatní grafické znázornění otřepů je v příloze P V.



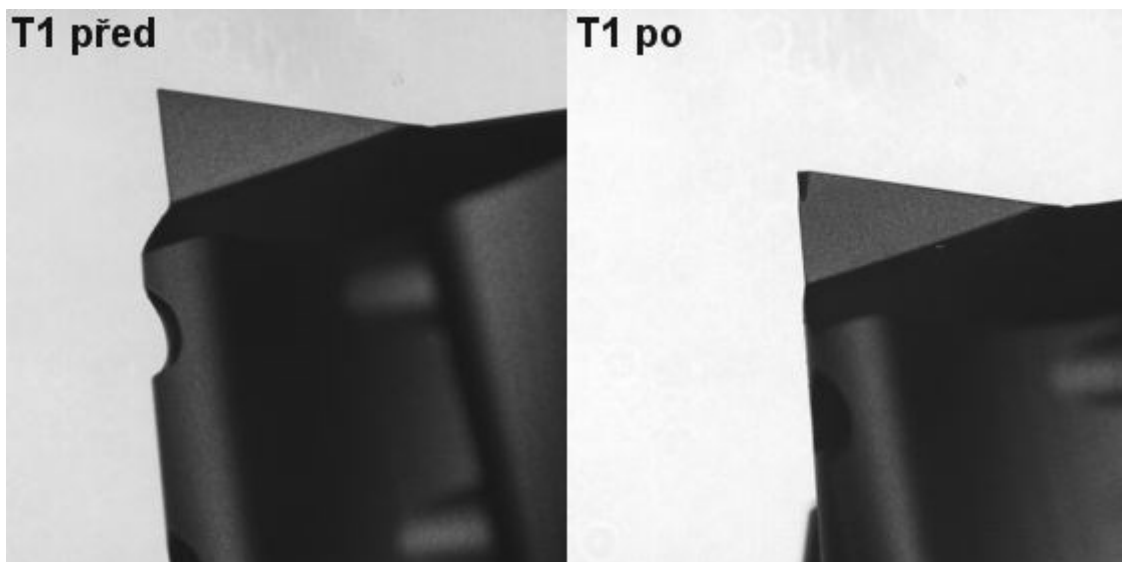
Obr. 63 Otřepy zanechané po adaptivním frézování nástrojem T1

Tab. 19 Velikost otřepů pro všechny nástroje pro adaptivní frézování

Označení nástroje	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Maximální velikost otřepů [mm]	11,6	5,19	8,6	0,49	0,63	16,34

8.5 Opotřebení nástrojů

Ukazatelem, zdali byl zvolen správný nástroj, může být kromě výše zmíněných kritérií také to, jak moc byl nástroj během obrábění opotřeben. Každý nástroj byl před a po obrábění snímán na přístroji HAIMER UNO 20/40. Nástroje a jejich opotřebení je hodnoceno porovnáním a to následovně: mírné (při porovnání snímků nerozeznatelné), střední (při porovnání snímků rozeznatelné) a těžké (lom břitu apod.). Snímek nástroje před a po, lze vidět na *Obr. 64*. Všechny snímky nástrojů jsou v příloze P VI. Celkové hodnocení je v *Tab. 20*.



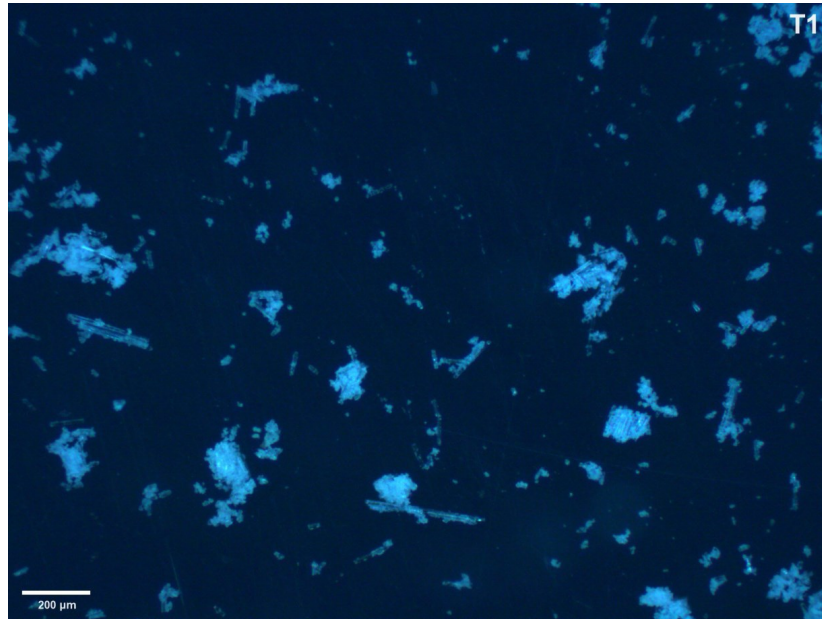
Obr. 64 Snímek nástroje pořízený před a po adaptivním frézování – viditelné těžké opotřebení (lom břitu)

Tab. 20 Hodnocení opotřebení nástrojů pro adaptivní frézování

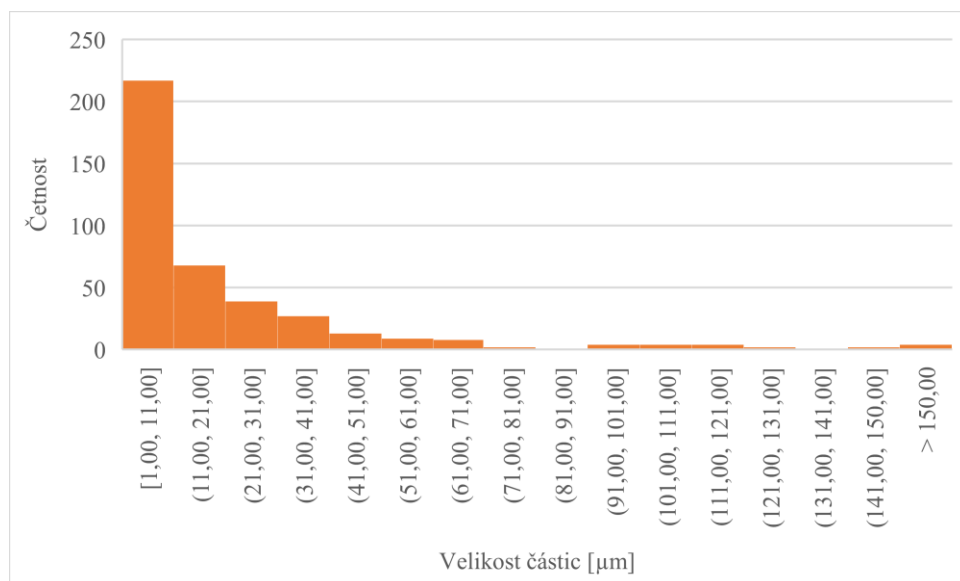
Opotřebení						
Mírné						
Střední						
Těžké						
Označení nástroje	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Opotřebení						

8.6 Rozbor třísek

Cílem je v této kapitole ukázat, jak velké částice zanechal každý z nástrojů v třískách po obrábění – tedy zjistit distribuci částic. Třísky byly vyfoceny na mikroskopu Leica DMI 3000M při 50 násobném zvětšení – viz *Obr. 65*. Vyhodnocení distribuce částic proběhlo v softwaru ImageJ a následně byly z těchto hodnot vytvořeny histogramy v softwaru MS Excel. Všechny histogramy včetně fotografií jsou v příloze P VIII.



Obr. 65 Fotografie třísek po adaptivním frézování nástrojem T1



Obr. 66 Distribuce částic v třískách po adaptivním frézování nástrojem T1

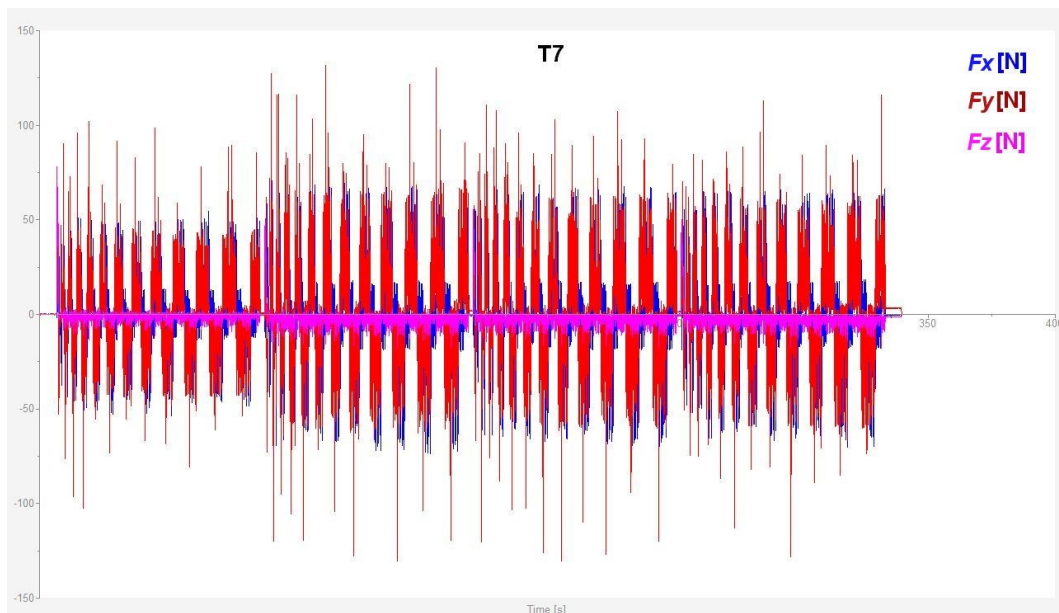
9 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT PRO HRUBOVACÍ FRÉZOVÁNÍ

FRÉZOVÁNÍ

V následujících podkapitolách jsou vyhodnocena data pro hrubovací frézování. Nástroj, který byl použit, je uveden v kapitole 6.1.3.

9.1 Řezné síly

Měření a způsob vyhodnocení řezných sil pro hrubovací frézování probíhalo stejně jako v kapitole 8.1. Porovnáme-li záznam na *Obr. 56* a *Obr. 67*, lze vidět, že průběh řezných sil je na první pohled odlišný.



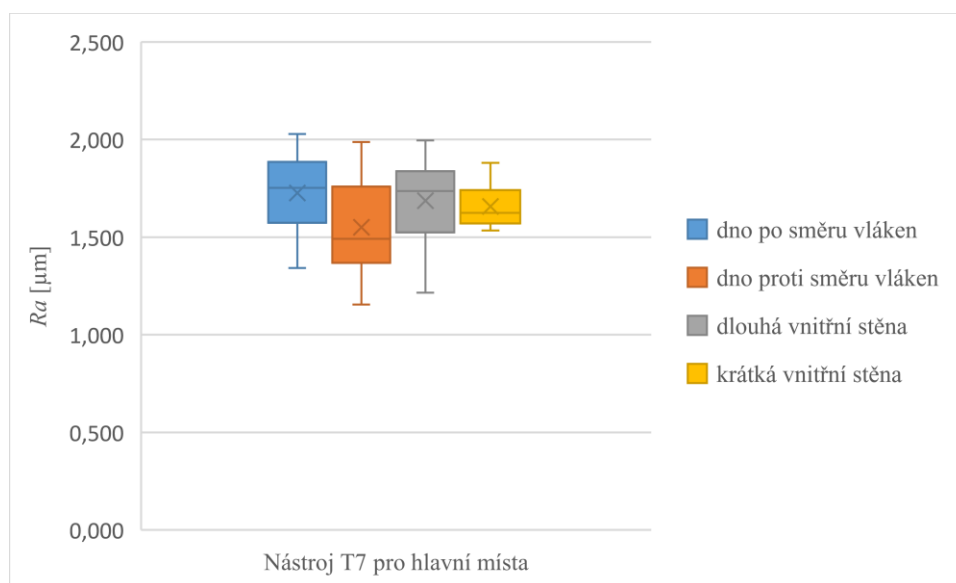
Obr. 67 Záznam řezných sil při hrubovacím frézování nástrojem T7

Tab. 21 Efektivní a maximální hodnoty složek řezných sil při hrubovacím frézování

F_x	Označení nástroje	T7
	Efektivní hodnota [N]	19,59
	Maximální hodnota [N]	90,04
F_y	Označení nástroje	T7
	Efektivní hodnota [N]	24,96
	Maximální hodnota [N]	144,5
F_z	Označení nástroje	T7
	Efektivní hodnota [N]	4,60
	Maximální hodnota [N]	78,72

9.2 Jakost obrobených ploch

Jakost obrobených ploch se u hrubovacího frézování měřila taktéž na přístroji Mitutoyo SJ-410 a sledovanými parametry jsou podobně jako u adaptivního frézování parametry R_a a R_z . Měření probíhalo obdobně jako na Obr. 57. Způsob vyhodnocení je stejný jako v kapitole 8.2, a to pomocí krabicového grafu. Graf pro parametr R_a je na Obr. 68 a graf pro parametr R_z v příloze P VII.



Obr. 68 Graf pro parametr R_a při měření drsnosti povrchu v hlavních místech pro hrubovací frézování

9.3 Dodržení rozměrů frézované kapsy

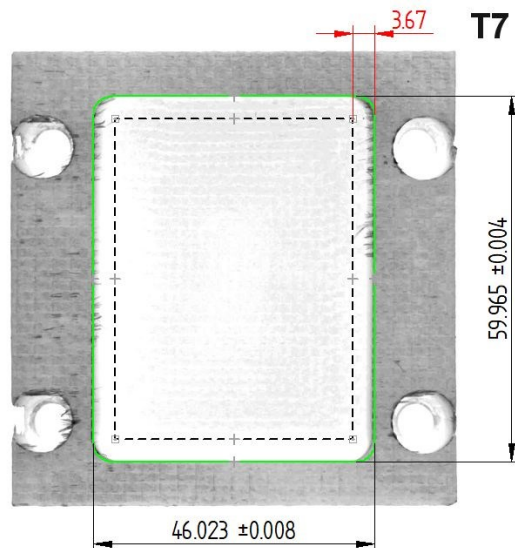
Při proměrování rozměrů frézované kapsy hrubovacím způsobem se postupovalo obdobně jako v kapitole 8.3. Výpočet difference je taktéž popsán v kapitole 8.3. Záporná hodnota difference – b značí, že skutečný rozměr byl větší oproti teoretické hodnotě.

Tab. 22 Rozměry kapsy pro hrubovací frézování

Nástroj	a [mm]	Diference - a [mm]	b [mm]	Diference - b [mm]
T7	59,965±0,004	0,035	46,023±0,008	-0,023

9.4 Otřepy

V této kapitole je na *Obr. 69* graficky znázorněná velikost maximální hodnoty otřepů pro nástroj T7. Kvůli přehlednosti je ještě tato hodnota zapsána do *Tab. 23*.



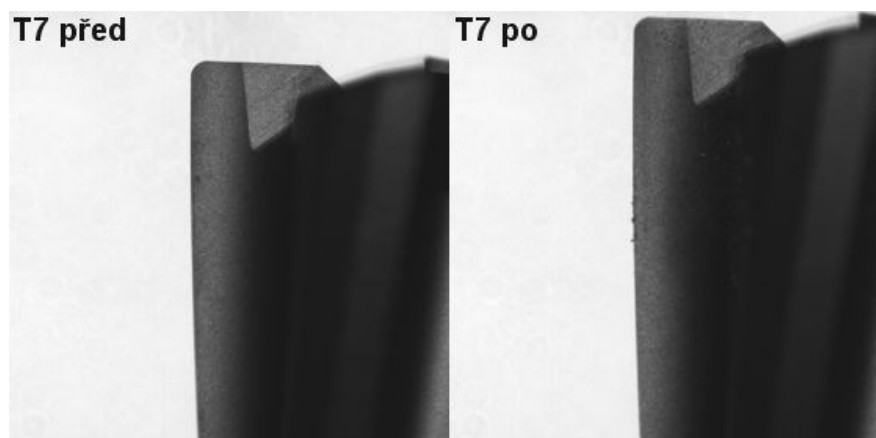
Obr. 69 Otřepy zanechané po hrubovacím frézování nástrojem T7

Tab. 23 Velikost otřepů pro nástroj T7 pro hrubovací frézování

Označení nástroje	T7
Maximální velikost otřepů [mm]	3,67

9.5 Opotřebení nástroje

Hodnocení opotřebení nástroje proběhlo stejně jako v kapitole 8.5. Snímek nástroje T7 před a po obrábění lze vidět na *Obr. 70* a hodnocení opotřebení nástroje v *Tab. 24*.



Obr. 70 Snímek nástroje pořízený před a po hrubovacím frézování

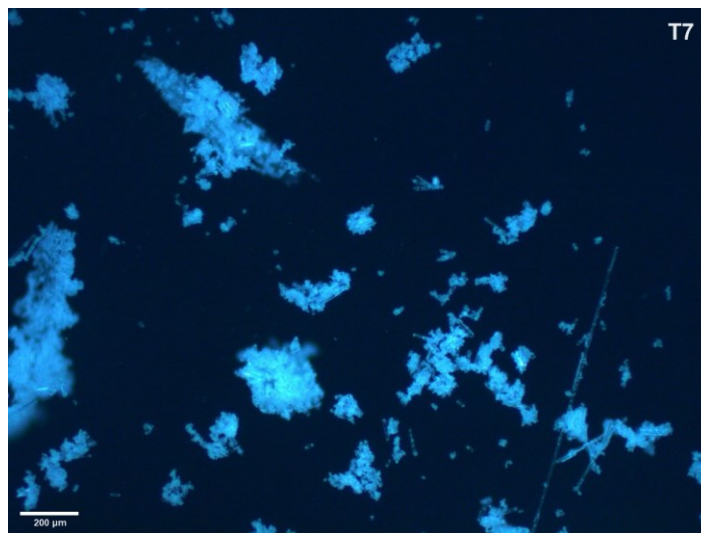
Tab. 24 Hodnocení opotřebení nástroje T7 pro hrubovací frézování

Opotřebení	
Mírné	
Střední	
Těžké	

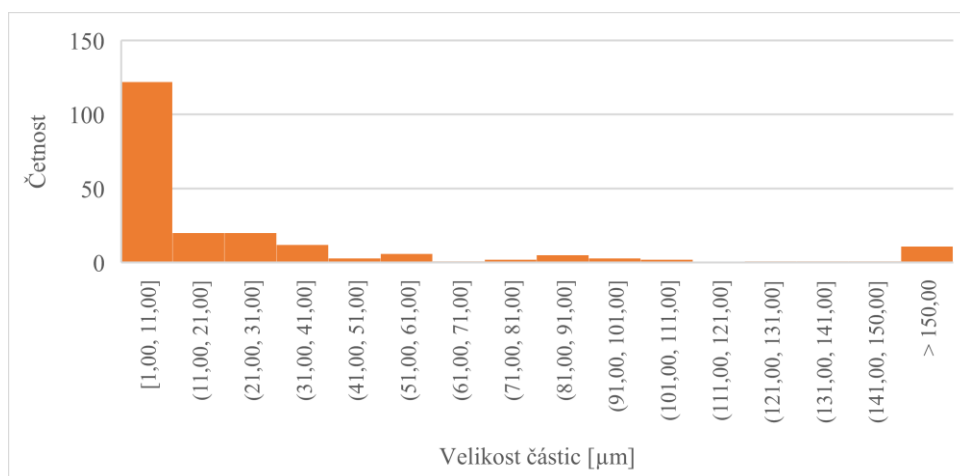
Označení nástroje	T7
Opotřebení	

9.6 Rozbor třísek

Distribuce částic po hrubovacím frézování nástrojem T7 byla vyhodnocena stejně jako v kapitole 8.6.



Obr. 71 Fotografie třísek po hrubovacím frézování nástrojem T7



Obr. 72 Distribuce částic v třískách po hrubovacím frézování nástrojem T7

10 CELKOVÉ SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ A JEJICH DISKUZE

V této kapitole bude provedena diskuze výsledků všech šesti kritérií (řezné síly, jakost obrobených ploch, dodržení rozměrů zadané geometrie, otřepy, opotřebenění nástrojů a rozbor třísek) pro adaptivní frézování a srovnání těchto výsledků s hrubovacím frézováním. Následně budou zrekapitulovány parametry nástrojů – viz *Tab. 25* a výsledky experimentu – viz *Tab. 26*. Vyhodnocení nástrojů od nejlepšího po nejhorší proběhne za pomoci bodového hodnocení. Vysvětlení, jak budou kritéria bodově hodnoceny, se bude nacházet nad výsečovým grafem.

Při prvním pohledu na záznamy řezných sil při adaptivním frézování můžeme vidět, že u všech šesti je určitá „opakovatelnost“ oblastí, ve kterých jsou řezné síly vykresleny. To je z důvodu, že nástroj měl pořád stejně generovanou dráhu pro každý vzorek, a tedy šlo předpokládat, jak budou záznamy T2-T6 vypadat v závislosti na výsledku T1. Při vzájemném srovnání efektivních hodnot jednotlivých složek řezných sil se jeví nástroj T3 jako nejlepší – $F_x / F_y / F_z = 19,09 \text{ N} / 26,60 \text{ N} / 4,70 \text{ N}$. Nejhorších výsledků dosáhl nástroj T6 – $F_x / F_y / F_z = 19,15 \text{ N} / 30,25 \text{ N} / 18,39 \text{ N}$. Podle *Obr. 56* a *Obr. 67* lze na první pohled říct, že je adaptivní frézování více stabilní operace z hlediska řezných sil (na *Obr. 67* jsou vidět značné skoky řezných sil). Porovnáme-li však velikost efektivních hodnot složek řezných sil pro hrubovací frézování nástrojem T7 – $F_x / F_y / F_z = 19,59 \text{ N} / 24,96 \text{ N} / 4,60 \text{ N}$, lze říct, že jsou velmi uspokojivé navzdory vykreslenému záznamu.

Nejlepší výsledky jakosti povrchu při měření dna po i proti směru vláken prokázal nástroj T3 – $(1,36 \pm 0,03) \mu\text{m}$ po směru a $(1,48 \pm 0,05) \mu\text{m}$ proti směru vláken. Velmi uspokojivě dopadl i nástroj T2 – $(1,60 \pm 0,03) \mu\text{m}$ po směru a $(1,59 \pm 0,08) \mu\text{m}$ proti směru vláken. Zajímavých výsledků dosáhl nástroj T6, který při měření dna proti směru vláken dopadl stejně dobře jako předešlé dva nástroje – $(1,56 \pm 0,12) \mu\text{m}$. Naopak po směru vláken byla drsnost povrchu výrazně vyšší – $(2,28 \pm 0,08) \mu\text{m}$. Při měření dna po směru vláken dopadl nejhůř nástroj T4 – $(3,45 \pm 0,15) \mu\text{m}$, a proti směru vláken nástroj T5 – $(4,26 \pm 0,16) \mu\text{m}$. Při měření dlouhé a krátké vnitřní stěny vyhrál nástroj T3 – $(1,5 \pm 0,1) \mu\text{m}$ pro dlouhou vnitřní stěnu a $(1,94 \pm 0,07) \mu\text{m}$ pro krátkou vnitřní stěnu. Překvapivě proměnných výsledků jsme dosáhli při obrábění nástrojem T1, který dopadl dobře při měření drsnosti povrchu kratší vnitřní stěny – $(3,7 \pm 0,1) \mu\text{m}$, ale nejhůř při měření drsnosti povrchu delší vnitřní stěny – $(6,2 \pm 0,4) \mu\text{m}$. Nejhorších výsledků při měření krátké vnitřní stěny dosáhl nástroj T5 – $(6,5 \pm 0,3) \mu\text{m}$. Při hrubovacím frézování nástrojem T7 je drsnost povrchu u všech měřených oblastí velmi dobrá a blíží se výsledkům získaných adaptivním frézováním nástrojem T3 –

(1,73±0,06) μm u dna po směru vláken, (1,56±0,07) μm u dna proti směru vláken, (1,69±0,06) μm pro dlouhou vnitřní stěnu a (1,66±0,03) μm pro krátkou vnitřní stěnu.

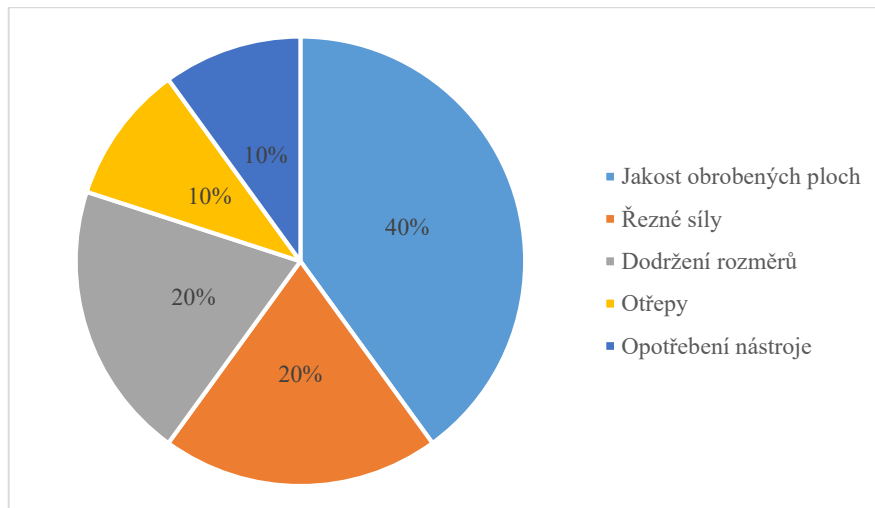
Při srovnání výsledků měření rozměrů kapsy po adaptivním frézování zjistíme, že rozdíl teoretické od skutečné nominální hodnoty se u téměř každého nástroje pohybuje v rámci desetin. I přes tyto nepříznivé výsledky dopadl v rámci srovnání nejlíp nástroj T6 – délka dlouhé strany = (59,890±0,014) mm a délka krátké strany = (45,94±0,06) mm. Za ním se umístil nástroj T3 – délka dlouhé strany = (59,89±0,01) mm a délka krátké strany = (45,913±0,012) mm. Nejhorší dopadl nástroj T1 – délka dlouhé strany = (59,778±0,019) mm a délka krátké strany = (45,770±0,019) mm. Hrubovací frézování se jeví z hlediska dodržení rozměrů zadané geometrie jako lepší obráběcí strategie. Rozdíl teoretické od skutečné nominální hodnoty se pohybuje v rámci setin mm. Délka dlouhé strany = (59,965±0,004) mm a délka krátké strany = (46,023±0,008) mm.

Nejmenší velikost otřepů a tedy nejčistší řez dokázal projevit nástroj T4 – 0,49 mm. Výborných výsledků dosáhl i nástroj T5 – 0,63 mm. Nejhorší dopadl nástroj T6 – 16,34 mm. Hrubovací frézování se nejeví jako strategie, která by zmírnila přítomnost otřepů. Velikost otřepů u hrubovacího frézování je 3,67 mm. Srovnáme-li *Tab. 19* a *Tab. 25* zjistíme, že nástroje s nejmenším počtem břitů (T4 a T5) dosáhly nejlepších výsledků.

Jako vhodné nástroje se pro adaptivní frézování sklolaminátu jeví T2, T3 a T5, protože nevykazují viditelné známky opotřebení. Střední opotřebení lze vidět na nástroji T6 viz příloha P VI. Silně opotřeбенý byl nástroj T1 a T4 – viz *Obr. 64* a příloha P VI. Stojí tedy za uvážení, jestli jsou tyto nástroje vhodnou variantou. Při hrubovacím frézování nebylo opotřebení nástroje T7 patrné.

Rozbor třísek formou distribuce částic nám pomohl v tomto experimentu zjistit, jak dochází k odebrání třísky, tj. jaký nástroj dává třísky jemné a který naopak třísky hrubé. Nejjemnější třísky dává nástroj T2, zatímco nástroje T4 a T6 nejhrubší – viz fotografie a histogramy v příloze P VIII. Hrubovací frézování nástrojem T7 vykazuje hrubší třísky než adaptivní frézování nástrojem T2. Toto kritérium ale nebude zahrnuto ve finálním bodovém hodnocení nástrojů. Důvodem je náhodný výběr třísek po obrábění. Aby bylo měření objektivní, museli bychom udělat distribuci částic u celého objemu třísek – to je však z časového hlediska a množství třísek nemožné.

Abychom byli schopni jednotlivé nástroje porovnat a určit nejlepšího a nejhoršího zástupce, budou každému z nich přiřazeny body. Nástroje získají v každé kategorii stálý počet bodů (nejlepší nástroj 10b, druhý nejlepší 9b apod.), a následně dojde k vynásobení těchto bodů koeficientem „důležitosti“ daného kritéria (váha 10% znamená vynásobení počtu bodů koeficientem 0,1). Váha každé kategorie je uvedena na *Obr. 73*. Důležitost parametrů a přiřazený počet % v každém kritériu byl zvolen dle mého uvážení.



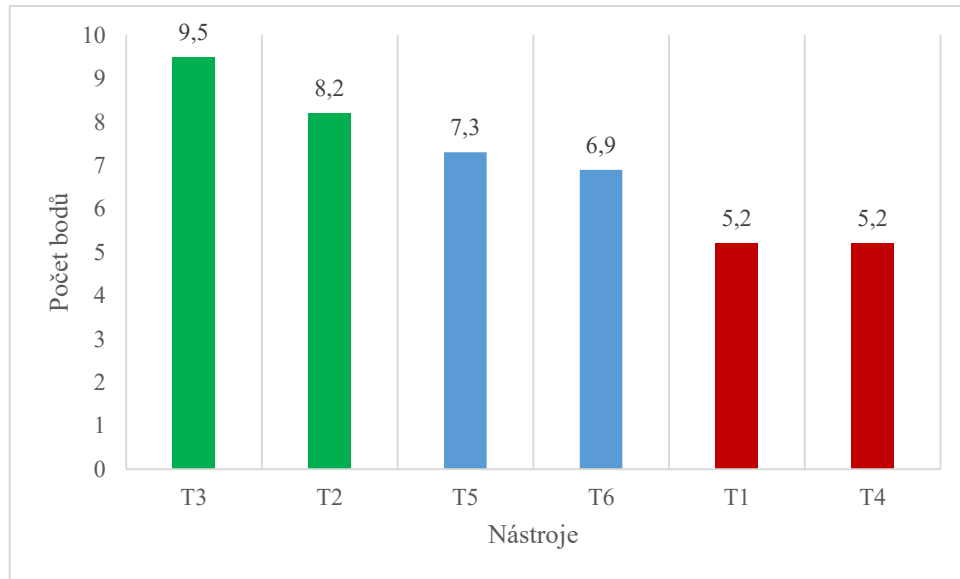
Obr. 73 Procentuální rozdělení váhy hodnocených kategorií

Tab. 25 Rekapitulace nástrojů a jejich parametrů

Označení	T1	T2	T3/T7	T4	T5	T6
Obchodní název	860060Z5 .0-DURA	840060R0 50Z4.0- DURA	880060R02 0Z4.0- DURA	870060.0- DURA	871060.0- DURA	JS514060 D4C- NXT
Obráběcí průměr [mm]	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000
Skutečný obráběcí průměr [mm]	5,996±0,0 05	6,036±0,0 05	6,034±0,00 5 / 6,022±0,00 5	6,046±0,0 05	6,038±0,0 05	6,024±0,0 05
Max. hloubka řezu v bočním směru posuvu [mm]	18,0	12,0	18,0	18,0	18,0	35,0
Celková délka [mm]	70,0	65,0	65,0	65,0	65,0	75,0
Rohový rádius [mm]	0	0,50	0,20	0	0	0
Počet břitů [-]	5	4	4	2	2	4
Povlak	DURA	DURA	DURA	DURA	DURA	NXT
Cena [Kč]	3464	3345	3041	2560	2560	935

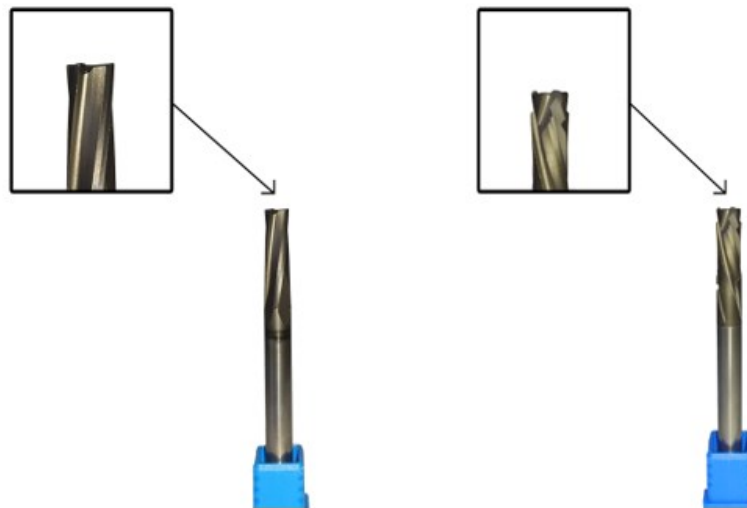
Tab. 26 Rekapitulace výsledků experimentu včetně bodového hodnocení nástrojů

Označení nástroje		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Efektivní hodnota / Maximální hodnota rezných sil	F_x [N]	19,82 / 91,01	21,68 / 105,80	19,09 / 116,20	23,28 / 123,40	25,63 / 93,95	19,15 / 105,90	19,59 / 90,04
	F_y [N]	29,73 / 107,20	29,24 / 118,80	26,60 / 141,00	28,34 / 116,90	23,04 / 90,69	30,25 / 99,96	24,96 / 144,5
	F_z [N]	5,73 / 25,19	7,92 / 48,99	4,70 / 28,44	11,51 / 51,36	12,66 / 46,78	18,39 / 101,80	4,60 / 78,72
Parametr drsnosti R_a / R_z	Dno proti směru vláken [μm]	2,23±0,12 / 15,8±1,0	1,59±0,08 / 10,7±0,4	1,48±0,05 / 10,3±0,3	3,6±0,3 / 22,4±1,4	4,26±0,16 / 27,2±1,2	1,56±0,12 / 12,0±0,9	1,56±0,07 / 11,2±0,7
	Dno po směru vláken [μm]	2,36±0,04 / 14,7±0,5	1,60±0,03 / 9,6±0,3	1,36±0,03 / 8,0±0,3	3,45±0,15 / 20,5±0,9	2,90±0,14 / 17,0±0,8	2,28±0,08 / 13,5±0,5	1,73±0,06 / 10,2±0,4
	Dlouhá vnitřní stěna [μm]	6,2±0,4 / 41±3	3,34±0,12 / 24,6±0,8	1,5±0,1 / 14,3±1,1	5,6±0,5 / 36±3	4,15±0,19 / 28,8±1,7	3,9±0,3 / 24,6±1,5	1,69±0,06 / 14,6±0,6
	Krátká vnitřní stěna [μm]	3,7±0,1 / 23,8±0,7	3,1±0,3 / 23,0±2,0	1,94±0,07 / 16,8±1,1	4,81±0,14 / 33,4±1,0	6,5±0,3 / 45,6±1,9	3,7±0,1 / 24,1±0,3	1,66±0,03 / 11,6±0,2
Dodržení rozměrů kapsy	Strana a [mm]	59,778±0,019	59,845±0,018	59,89±0,01	59,818±0,017	59,850±0,017	59,890±0,014	59,965±0,004
	Diference $e - a$ [mm]	0,222	0,155	0,110	0,182	0,150	0,110	0,035
	Strana b [mm]	45,770±0,019	45,80±0,04	45,913±0,012	45,853±0,015	45,82±0,03	45,94±0,03	46,023±0,008
	Diference $e - b$ [mm]	0,230	0,200	0,087	0,147	0,180	0,060	-0,023
Otřepy	Maximální velikost otřepů [mm]	11,6	5,19	8,6	0,49	0,63	16,34	3,67
Opotřebení nástroje								
Bodové hodnocení		5,2	8,2	9,5	5,2	7,3	6,9	-



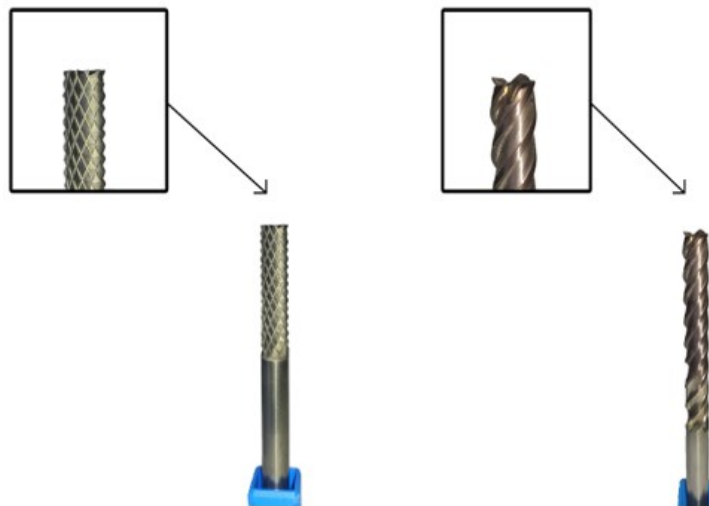
Obr. 74 Bodové hodnocení nástrojů od nejlepšího po nejhorší

Jako nejvhodnější nástroj se pro adaptivní frézování kapsy ve sklolaminátu jeví T3, který dosáhl nejvyššího bodového ohodnocení. Hned za ním se umístil nástroj T2, který svými výsledky dokáže konkurovat nástroji T3.



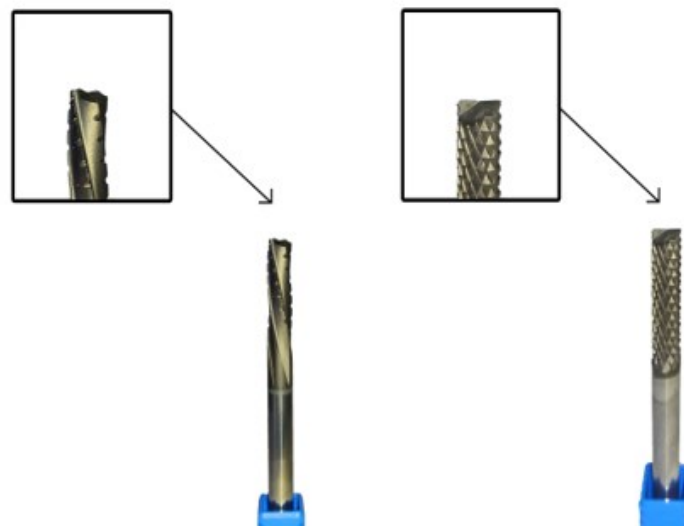
Obr. 75 Nejvhodnější nástroje pro adaptivní frézování kapsy ve sklolaminátu – T3 (vlevo) a T2 (vpravo)

Uspokojivých výsledků dosáhly nástroje T5 a T6. Ač mají tyto nástroje odstup v bodovém hodnocení od nejlepšího nástroje, jeví se jako vhodné alternativy kvůli příznivé ceně.



Obr. 76 Nástroje vhodné jako alternativa pro adaptivní frézování kapsy ve sklolaminátu – T5 (vlevo) a T6 (vpravo)

Nejhůře v tomto experimentu dopadly nástroje T1 a T4. V některých kritériích (otřepy – T4 a řezné síly – T1) dokázaly nástroje držet krok s ostatními, ale v dalších kritériích vykazovaly průměrné až podprůměrné výkony. Navíc došlo k silnému opotřebení nástrojů již po prvním obrábění, a tedy nejsou vhodné pro tento experiment – viz *Tab. 20*.



Obr. 77 Nevhodné nástroje pro adaptivní frézování kapsy ve sklolaminátu – T1 (vlevo) a T4 (vpravo)

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá adaptivním frézováním sklolaminátu. Cílem bylo vytvořit teoretickou studii na toto téma, navrhnout experiment včetně využití operace adaptivního frézování v programu NX 12, provést diskuzi a porovnání s hrubovacím frézováním. Součástí práce je v neposlední řadě srovnání nástrojů použitých při obráběcím procesu.

Teoretická část je rozdělena na čtyři kapitoly. První kapitola je zaměřena na problematiku procesu frézování. Je zde popsána moderních strategií v podkapitole dynamické frézování, kde je část věnovaná právě adaptivnímu frézování. V dalších kapitolách je popsána teorie CNC programování obráběcích strojů, kompozitních materiálů a hodnocení jakosti obrobene plochy.

Praktická část ve formě experimentu je rozdělena na dvě hlavní části – adaptivní frézování a hrubovací frézování sklolaminátu. Pro experiment bylo vybráno šest nástrojů, přičemž jeden z nich byl použit při obou obráběcích strategiích. Jako obráběná geometrie byla zvolena kapsa. Experiment a naměření dat potřebných pro vyhodnocení proběhlo v dílnách budovy U5.

Celkově bylo v tomto experimentu vyhodnocováno šest kritérií (řezné síly, jakost obrobene ploch, dodržení rozměrů frézování kapsy, otřepy, opotřebení nástroje a rozbor třísek), přičemž do celkového hodnocení nástrojů nebyl zahrnut rozbor třísek.

Nejvhodnější nástroj pro adaptivní frézování kapsy ve sklolaminátu je v našem experimentu nástroj T3. Ten dosáhl nejlepšího hodnocení ve třech kategoriích (řezné síly, jakost obrobene ploch a opotřebení nástroje) a v dalších dvou získal velmi dobré bodové ohodnocení. Tento nástroj lze nahradit nástrojem T2, který se s odstupem 1,3b umístil na druhém místě. Tento nástroj je však dražší a z hlediska poměru cena/výkon je jeho využití na zvážení. Nástroje T5 a T6 se jeví jako vhodná alternativa, pokud chceme zvolit nástroj s pokud možno nejlepším poměrem cena/výkon – viz cena nástrojů v *Tab. 25*. Jako nevhodné nástroje se pro tento experiment jeví T1 a T4, které dosáhly neuspokojivých výsledků. Ty se pak výrazně odráží v jejich bodovém hodnocení.

Při hrubovacím frézování kapsy ve sklolaminátu jsme získali výborné výsledky téměř ve všech kategoriích. Doba běhu programu byla však výrazně delší – 3 minuty a 49 vteřin pro adaptivní frézování / 5 minut a 26 vteřin pro hrubovací frézování. Jediná kategorie, ve které adaptivní frézování dosáhlo horších výsledků v porovnání s hrubovacím, je kategorie dodržení rozměrů kapsy.

V této bakalářské práci jsme dokázali, že je adaptivní frézování vhodná obráběcí strategie pro tvorbu kapes ve sklolaminátu. Z výsledků experimentu je patrné, že výběr vhodného nástroje je při použití této obráběcí strategie klíčový. Předností adaptivního frézování je velmi dobrá jakost obrobených ploch, a také stabilita řezného procesu z hlediska řezných sil. Budeme-li chtít, aby námi vytvořená geometrie byla co nejpřesnější, jeví se hrubovací frézování jako vhodnější strategie za velmi mírné ztráty kvality ostatních parametrů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. KOCMAN, Karel, 2011. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 978-80-7204-722-2.
2. Milling, *Manufacturing Cost Estimation* [online]. [cit. 2019-11-01]. Dostupné z: <https://www.custompartnet.com/wu/milling>
3. Sousedné frézování nebo nesousedné frézování, *Sandvik Coromant - výroba nástrojů a nabídka řešení pro obrábění* [online]. [cit. 2019-11-01]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/up-milling-vs-down-milling.aspx>
4. Čelní frézování, *Sandvik Coromant - výroba nástrojů a nabídka řešení pro obrábění* [online]. [cit. 2019-11-01]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/face-milling.aspx>
5. ČEP, Robert a Jana PETRŮ, 2013. *Technologie obrábění: 1 Frézování* [online]. Ostrava [cit. 2019-11-01]. ISBN 978-80-248-3012-4. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_001/Technologie%20Obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD/02%20Text%20pro%20e-learning/Technologie%20obrabeni%2002%20Fr%C3%A9zov%C3%A1n%C3%A1D.pdf
6. *Řezné podmínky při obrábění* [online], 2001. Liberec [cit. 2019-11-02]. Dostupné z: http://www.kom.tul.cz/soubory/tob_rp.pdf
7. *Technologie II: 1 díl* [online], Ostrava [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf
8. DE VOS, Patrick, 2013. Příručka pro technology: Dynamické frézování - využití kompenzačního přístupu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. (7) [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-dynamicke-frezovani-vyuziti-kompenzacniho-pristupu.html>
9. DE VOS, Patrick, 2013. Příručka pro technology: Jak dosáhnout vysoké produktivity při frézování? *MM Průmyslové spektrum* [online]. (9) [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-dosahnout-vysoke-produktivity-pri-frezovani.html>

10. CARTER, Steve, 2015. What is High Speed Cutting? *High-Speed Industrial CNC Machines - DATRON Dynamics, Inc.* [online]. [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: <https://www.datron.com/what-is-high-speed-cutting/>
11. KOČMAN, Karel, 2004. *Speciální technologie: obrábění*. 3. přeprac. v dopl. vyd., V Akademickém nakladatelství CERM 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 80-214-2562-8.
12. High Speed Machining 101, 2019. *Integrated Manufacturing Systems & Industrial Solutions|Keller Technology* [online]. [cit. 2019-11-08]. Dostupné z: <https://www.kellertechnology.com/blog/high-speed-machining-101/>
13. Frézy pro obrábění vysokým posuvem, *Seco Tools - Řešení pro obrábění kovů | Secotools.com* [online]. [cit. 2019-11-08]. Dostupné z: https://www.secotools.com/article/m_6904?language=en
14. Introduction to High Efficiency Milling, 2017. *Harvey Performance Company - Manufacturing & Metalworking Solutions* [online]. [cit. 2019-11-08]. Dostupné z: <https://www.harveypformance.com/in-the-loupe/intro-high-efficiency-milling/>
15. What's new in NX 12 for manufacturing, 2017. *PT. Paralogix Ciptareka Wyasatama - Desing & Engineering Technology Provider* [online]. [cit. 2019-11-08]. Dostupné z: <https://www.paralogix.co.id/2017/12/08/whats-new-in-nx-12-for-manufacturing/#.XpQ2q5ngqUI>
16. Adaptivní frézování, *Dokumentace Siemens:: Návod k NX 12.0.1* [online]. [cit. 2019-11-08]. Dostupné z: https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/12.0.1/nx_help#uid:xid1128418:index_mfgmilling:xid1224260
17. SMID, Peter, 2008. *CNC programming handbook: a comprehensive guide to practical CNC programming*. Third edition. South Norwalk: Industrial Press Inc., U.S. ISBN 978-0-8311-3347-4.
18. ŠTULPA, Miloslav, 2015. *CNC: programování obráběcích strojů*. Praha: Grada. ISBN 978-80-247-5269-3.
19. *Kompozitní materiály* [online], Praha [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf

20. EHRENSTEIN, Gottfried W., 2009. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia. ISBN 978-80-86960-29-6.
21. *Průručka CNC programování* [online], VITRALAB [cit. 2019-11-17]. Dostupné z: http://www.sjf.tuke.sk/vitralab/upload/CNC%20prirucka_CZ.pdf
22. BUMBÁLEK, Bohumil, Vladimír ODVODY a Bohuslav OŠŤÁDAL, 1989. *Drsnost povrchu*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury.
23. BUMBÁLEK, Leoš, 2008. Jakost povrchu a její význam pro funkci ploch součástí. *Předpisy, normy, vzory a příklady z oblasti kvality, ISO a strojních zařízení*. [online]. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <https://www.qmprofi.cz/33/jakost-povrchu-a-jeji-vyznam-pro-funkci-ploch-soucasti-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4Ep8JmSoMEhJcGWz4k4nRY1-w9PBWuC7BmQ/>
24. Kontrola drsnosti povrchu, *ELUC* [online]. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1102>
25. Měření drsnosti, *M&B Calibr, spol. s.r.o.* [online]. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <https://www.mbcaltibr.cz/mereni-drsnosti.html>
26. TYRRELL, Michael, High-feed milling – the key to increased productivity. *Aerospace News and Insight - Aerospace Manufacturing Magazine* [online]. [cit. 2020-01-21]. Dostupné z: <https://www.aero-mag.com/high-feed-milling-key-increased-productivity/>
27. ALTIN KARATAŞ, Meltem a Hasan GÖKKAYA, 2018. A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials. *Defence Technology* [online]. 14(4), 318-326 [cit. 2020-04-13]. DOI: 10.1016/j.dt.2018.02.001. ISSN 22149147. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214914717302040>
28. *Catalogue&Technical Guide April 2016: Solid End Mills* [online], 2016. [cit. 2020-03-11]. Dostupné z: https://fenntool.com/wp-content/uploads/2017/06/downloads-Seco_Solid-end-mills_2016pdf.pdf
29. DMU 50, *CNC obráběcí stroje, kovoobráběcí stroje DMG MORI* [online]. [cit. 2020-03-11]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/frezovani/petiose-frezovani/dmu/dmu-50-2nd-generation>

30. ERKAN, Ö.; IŞIK, B. Investigation of Cutting Parameter Effects on Surface Roughness During Machining of Glass Fiber Reinforced Plastic Composite Material. In: *5th International Advanced Technologies Symposium (IATS 09)*, Karabük, Turkey. 2009. p. 1414-1419.
31. TAKMAZ, Aysun; ERKAN, Ömer; YÜCEL, Emre. Cam Elyaf Takviyeli Plastik Kompozit Malzemenin Kenar Frezelenmesinde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin İstatistiksel Olarak İncelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2016, 4.2.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

CNC	Computer Numerical Control
v_c	Řezná rychlost
D	Průměr nástroje
n	Otáčky nástroje
z	Počet zubů (břitů) nástroje
f_z	Posuv na zub
f_n	Posuv na otáčku
a_p	Hloubka řezu
k_{ci}	Měrná řezná síla
A_{Di}	Průřez třísky
C_{Fc}	Konstanta vyjadřující vliv obráběného materiálu
F_i	Celková řezná síla
F_{ci}	Řezná síla
F_{cNi}	Kolmá řezná síla
F_{fi}	Posuvová síla
F_{fNi}	Kolmá posuvová síla
T	Trvanlivost břitu
C_T	Konstanta závislá na materiálu obrobku
m	Konstanta závislá na materiálu řezného nástroje
VB	Opotřebení hřbetu
x_v	Exponent vyjadřující vliv hloubky řezu
y_v	Exponent vyjadřující vliv posuvu na otáčku
HSC	High Speed Cutting
HSM	High Speed Machining
HFM	High Feed Machining

HEM	High Efficiency Machining
NC	Numerical Control
GF	Glass Fiber
CF	Carbon Fiber
AF	Aramid Fiber
CLA	Chromatic Length Aberration
<i>Ra</i>	Střední aritmetická úchylka profilu
<i>Rz</i>	Maximální výška profilu
<i>Rq</i>	Střední kvadratická úchylka profilu
<i>Rmr</i>	Materiálový poměr
T1-T7	Zkratka pro nástroj (tool)

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Schéma sousledného frézování [3]</i>	12
<i>Obr. 2 Schéma nesousledného frézování [3]</i>	13
<i>Obr. 3 Čelní frézování [4]</i>	14
<i>Obr. 4 Symetrické (vlevo) a nesymetrické (vpravo) čelní frézování [1]</i>	14
<i>Obr. 5 Řezné síly na zubu válcové frézy v pracovní rovině P_{fe} pro nesousledné frézování (vlevo) a sousledné frézování (vpravo). Kde: F_i – celková řezná síla, F_{ci} – řezná síla, F_{cNi} – kolmá řezná síla, F_{fi} – posuvová síla, F_{fNi} – kolmá posuvová síla [1]</i>	15
<i>Obr. 6 Závislost opotřebení hřbetu na čase při různých řezných rychlostech [7]</i>	18
<i>Obr. 7 Zlogaritmovaný diagram $T-v_c$ [7]</i>	18
<i>Obr. 8 Závislost teploty na řezné rychlosti při vysokorychlostním obrábění pro různé druhy materiálů [12]</i>	21
<i>Obr. 9 HFM obrábění [26]</i>	22
<i>Obr. 10 Porovnání klasického frézování (vlevo) a vysoce výkonného frézování (vpravo) [14]</i>	22
<i>Obr. 11 Dráha nástroje při hrubovacím frézování</i>	23
<i>Obr. 12 Dráha nástroje při adaptivním frézování</i>	23
<i>Obr. 13 Zjednodušené blokové schéma CNC soustružnického obráběcího stroje [18]</i>	26
<i>Obr. 14 Řídicí panel CNC stroje [18]</i>	27
<i>Obr. 15 Absolutní programování [21]</i>	28
<i>Obr. 16 Přírůstkové programování [21]</i>	29
<i>Obr. 17 Závislost napětí na poměrném prodloužení pro uhlíkové vlákno a různé druhy matic [19]</i>	32
<i>Obr. 18 Uspořádání vláknové výztuže: a) jednosměrné, b) tkanina, c) rohož, d) víceosá, e) krátká vlákna jednosměrně orientována, f) krátká vlákna nahodile orientována [19]</i>	32
<i>Obr. 19 Chemická struktura a snímek skleněného vlákna [20]</i>	33
<i>Obr. 20 Mikrostruktura uhlíkového vlákna [20]</i>	33
<i>Obr. 21 Příklady poruch kompozitního materiálu při obrábění – vytažení vláken (fiber pull out), rozbití vláken (fiber breakage), tavení matrice (matrix smearing) a delaminace (delamination) [27]</i>	36
<i>Obr. 22 Dělení povrchu na drsnost a vlnitost [24]</i>	37
<i>Obr. 23 Vyjádření hodnoty R_a [22]</i>	38
<i>Obr. 24 Vyjádření hodnoty R_z [24]</i>	38
<i>Obr. 25 Vyjádření parametru R_{mr} [24]</i>	39
<i>Obr. 26 Vzorkovnice [24]</i>	39
<i>Obr. 27 Fotografie a detail řezné hrany nástroje T1</i>	43
<i>Obr. 28 Fotografie a detail řezné hrany nástroje T2</i>	44

<i>Obr. 29 Fotografie a detail řezné hrany nástroje T3 / T7</i>	44
<i>Obr. 30 Fotografie a detail řezné hrany nástroje T4</i>	45
<i>Obr. 31 Fotografie a detail řezné hrany nástroje T5</i>	46
<i>Obr. 32 Fotografie a detail řezné hrany nástroje T6</i>	46
<i>Obr. 33 Sklolaminátová pružina</i>	47
<i>Obr. 34 CNC stroj DMU 50</i>	48
<i>Obr. 35 Polotovar zvýšený v ose Z o 1 mm</i>	49
<i>Obr. 36 3D model vzorku</i>	49
<i>Obr. 37 3D model vzorku s řezem skrz díry</i>	50
<i>Obr. 38 Dialogové okno funkce Floor Wall</i>	51
<i>Obr. 39 Řezné podmínky a obráběná plocha využitím funkce Floor Wall</i>	52
<i>Obr. 40 Dráha nástroje při zarovnání čela</i>	52
<i>Obr. 41 Dialogové okno funkce Drilling</i>	53
<i>Obr. 42 Řezné podmínky a označení vrtaných děr pomocí funkce Drilling</i>	54
<i>Obr. 43 Dráha nástroje při vrtání děr (pohled v řezu)</i>	54
<i>Obr. 44 Dialogové okno funkce Hole Milling</i>	55
<i>Obr. 45 Řezné podmínky a označené otvory pro zahloubení</i>	56
<i>Obr. 46 Dráha nástroje při vytváření zahloubení v místě děr (pohled v řezu)</i>	56
<i>Obr. 47 Vzorek po úpravách</i>	57
<i>Obr. 48 Upnutý vzorek pomocí šroubů na dynamometr Kistler 9129AA</i>	57
<i>Obr. 49 Dialogové okno funkce Adaptive Milling</i>	58
<i>Obr. 50 Řezné podmínky a vyznačení místa řezu</i>	59
<i>Obr. 51 Dráha nástroje při adaptivním frézování (pohled v řezu)</i>	59
<i>Obr. 52 Dialogové okno funkce Cavity Mill</i>	60
<i>Obr. 53 Řezné podmínky a vyznačení obráběného prostoru</i>	61
<i>Obr. 54 Dráha nástroje při hrubovacím frézování (pohled v řezu)</i>	61
<i>Obr. 55 Pohled na vzorek po všech obráběcích operacích</i>	62
<i>Obr. 56 Záznam řezných sil při adaptivním frézování nástrojem T1</i>	63
<i>Obr. 57 Vzorek s grafickým popisem míst měření</i>	64
<i>Obr. 58 Měření na přístroji Mitutoyo SJ-410</i>	64
<i>Obr. 59 Graf pro parametr Ra při měření drsnosti povrchu dna po směru vláken pro adaptivní frézování</i>	65
<i>Obr. 60 Graf pro parametr Ra při měření drsnosti povrchu dna proti směru vláken pro adaptivní frézování</i>	65
<i>Obr. 61 Graf pro parametr Ra při měření drsnosti povrchu delší vnitřní stěny pro adaptivní frézování</i>	66

<i>Obr. 62 Graf pro parametr Ra při měření drsnosti povrchu kratší vnitřní stěny pro adaptivní frézování.....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 63 Otřepy zanechané po adaptivním frézování nástrojem T1</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 64 Snímek nástroje pořízený před a po adaptivním frézování – viditelné těžké opotřebení (lom břitu).....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 65 Fotografie třísek po adaptivním frézování nástrojem T1</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 66 Distribuce částic v třískách po adaptivním frézování nástrojem T1</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 67 Záznam řezných sil při hrubovacím frézování nástrojem T7</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 68 Graf pro parametr Ra při měření drsnosti povrchu v hlavních místech pro hrubovací frézování.....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 69 Otřepy zanechané po hrubovacím frézování nástrojem T7.....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 70 Snímek nástroje pořízený před a po hrubovacím frézování</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 71 Fotografie třísek po hrubovacím frézování nástrojem T7.....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 72 Distribuce částic v třískách po hrubovacím frézování nástrojem T7.....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 73 Procentuální rozdělení váhy hodnocených kategorií</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 74 Bodové hodnocení nástrojů od nejlepšího po nejhorší</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 75 Nejvhodnější nástroje pro adaptivní frézování kapsy ve sklolaminátu – T3 (vlevo) a T2 (vpravo)</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 76 Nástroje vhodné jako alternativa pro adaptivní frézování kapsy ve sklolaminátu – T5 (vlevo) a T6 (vpravo)</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 77 Nevhodné nástroje pro adaptivní frézování kapsy ve sklolaminátu – T1 (vlevo) a T4 (vpravo).....</i>	<i>79</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Porovnání mechanických vlastností vláken a kompaktních materiálů [19]</i>	31
<i>Tab. 2 Porovnání vlastností aramidového vlákna v závislosti na směru vláken [20]</i>	34
<i>Tab. 3 Porovnání vlastností skleněného vlákna a přírodních vláken [20]</i>	34
<i>Tab. 4 Parametry nástroje T1 [28]</i>	43
<i>Tab. 5 Parametry nástroje T2 [28]</i>	44
<i>Tab. 6 Parametry nástroje T3 / T7 [28]</i>	45
<i>Tab. 7 Parametry nástroje T4 [28]</i>	45
<i>Tab. 8 Parametry nástroje T5 [28]</i>	46
<i>Tab. 9 Parametry nástroje T6 [28]</i>	47
<i>Tab. 10 Základní informace o složení sklolaminátové pružiny</i>	47
<i>Tab. 11 Technické parametry DMU 50 [29]</i>	48
<i>Tab. 12 Řezné podmínky funkce Floor Wall</i>	53
<i>Tab. 13 Řezné podmínky funkce Drilling</i>	55
<i>Tab. 14 Řezné podmínky funkce Hole Milling</i>	56
<i>Tab. 15 Řezné podmínky funkce Adaptive Milling</i>	59
<i>Tab. 16 Řezné podmínky funkce Cavity Mill</i>	61
<i>Tab. 17 Efektivní a maximální hodnoty jednotlivých složek řezných sil při adaptivním frézování</i>	63
<i>Tab. 18 Rozměry kapsy pro jednotlivé nástroje pro adaptivní frézování</i>	67
<i>Tab. 19 Velikost otřepů pro všechny nástroje pro adaptivní frézování</i>	67
<i>Tab. 20 Hodnocení opotřebení nástrojů pro adaptivní frézování</i>	68
<i>Tab. 21 Efektivní a maximální hodnoty složek řezných sil při hrubovacím frézování</i>	70
<i>Tab. 22 Rozměry kapsy pro hrubovací frézování</i>	71
<i>Tab. 23 Velikost otřepů pro nástroj T7 pro hrubovací frézování</i>	72
<i>Tab. 24 Hodnocení opotřebení nástroje T7 pro hrubovací frézování</i>	73
<i>Tab. 25 Rekapitulace nástrojů a jejich parametrů</i>	76
<i>Tab. 26 Rekapitulace výsledků experimentu včetně bodového hodnocení nástrojů</i>	77

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Materiálový list matrice DT 806

Příloha P II: Technické parametry dynamometru Kistler 9129AA

Příloha P III: Záznamy řezných sil pro adaptivní frézování

Příloha P IV: Grafy pro parametr R_z pro adaptivní frézování

Příloha P V: Grafické znázornění velikosti otřepů po adaptivním frézování

Příloha P VI: Snímky nástrojů před a po adaptivním frézování

Příloha P VII: Graf pro parametr R_z pro hrubovací frézování

Příloha P VIII: Distribuce částic v třískách po adaptivním frézování pro všechny nástroje včetně fotografií

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST MATRICE DT 806

Matrix TDS – Technical Data Sheet
Issue 1: September 2014

DT806 Resins

Versatile Low

Viscosity Epoxy Matrices

DELTAtech™

www.delta-tech.it

Introduction

The **DT806** group of resins are in the low to medium viscosity range. **DT806** prepregs are suitable for processing by oven vacuum bag curing, autoclave bag curing or press moulding.

DT806 prepregs offer a versatile curing range from 65°C to 140°C. They can be offered with AX003 epoxy film adhesive, which has similar curing characteristics.

The main resin is **DT806R**, which is a low viscosity system suitable for solvented (fabric) and hot melt (UD) prepregs.

In addition, there is **DT806W** which offers higher tack, mainly for solvent impregnated fabric prepregs.

It is anticipated **DT806** prepregs will find uses in industrial, marine and sport goods applications.

Key Features

The **DT806** group of thermosetting epoxy resins offer a good combination of cure reactivity, versatile processing and availability in fabric and unidirectional fibre formats.

Main features are:

- ▶ Maximum DMA Tg of 135°C
- ▶ Processing by oven vacuum bag, autoclave curing and press moulding
- ▶ Flexible cure characteristics between 65°C and 140°C
- ▶ 21 days outlife at 21°C
- ▶ Low tack DT806R, Medium tack DT806W

DT806 Group of Resins

The following are the resins offered within this group:

Resin	Description	Application
DT806R	Low viscosity, unpigmented resin	Fabric (solvent) and UD (hot-melt) prepregs
DT806W	Higher tack version of DT806R	Usually for fabric (solvent) prepregs.

DT806 Resin Matrix Properties

Chemical nature	Epoxy Thermosetting Resins
Curing Temperature range	65 to 140°C
Density of cured neat resin	1.21 g/cm ³ (DT806R)
Dynamic viscosity	Low, < 300 Poise @ 60°C, frequency 10 rad/sec, for DT806R and DT806W.
Gel Times (ASTM D 3532), For all DT806 resins.	50 to 60 minutes @ 80°C 15 to 19 minutes @ 100°C 4 to 6 minutes @ 120°C 2 to 3 minutes @ 130°C

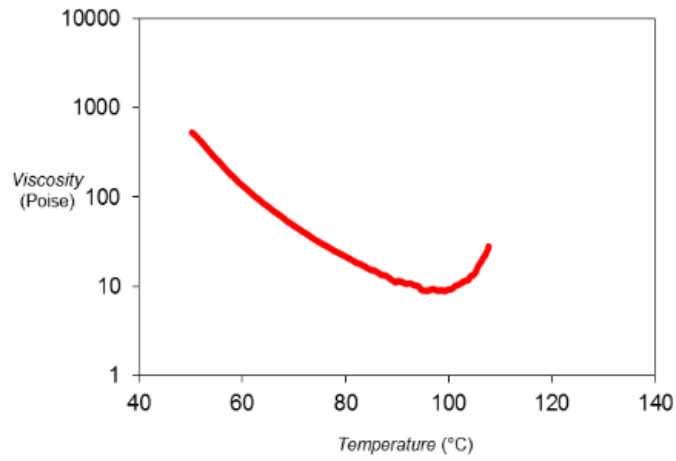
The following charts show the rheological behaviour of **DT806R** and **DT806W**

Firstly, a dynamic viscosity profile for these two resins.

Followed by Figure 1 giving isothermal viscosity profiles for **DT806R**.

Viscosity profile

(constant heating rate 2°C/min)



DT806R & DT806W

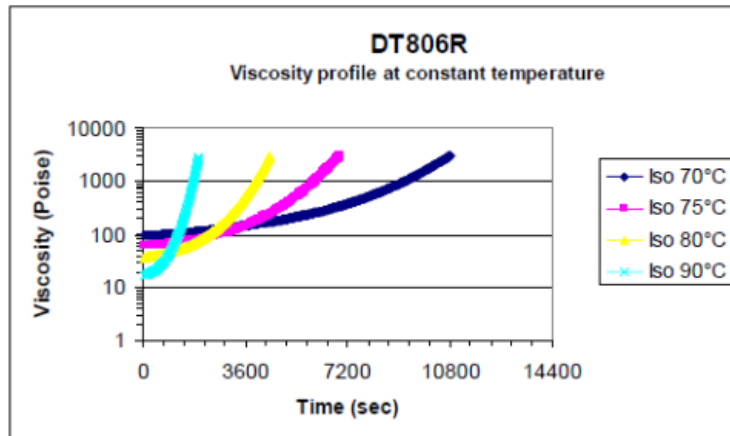


Figure 1: Isothermal Viscosity profiles for DT806R at four temperatures.

Thermal Performance of DT806R Laminates

All resins in the DT806 group have very similar thermal performance and have the same recommended cure cycles. The following table indicates the typical glass transition temperature (T_g) developed by **DT806R** laminates.

Cure Cycle	T _g (°C)
16 Hrs @ 65°C	70 to 80
5 Hrs @ 80°C	90 to 100
1.5 Hrs @ 100°C	110 to 120
1 Hr @ 120°C	120 to 130

Note: The Tangent Modulus Intercept T_g values have been measured by DMA, according ASTM D7028.

Mechanical Properties of Carbon Fabric Reinforced Laminates

Table 1 and **Table 2** below shows some indicative averaged mechanical characteristics of **DT806R** carbon fibre laminates. These are with a 200 gsm (g/m²) high strength carbon twill fabric and a 150 gsm (g/m²) high strength carbon fibre unidirectional prepreg.

Table 1
GG200T(Tenax HTA-3k)-DT806R-42 Fabric Laminate

Mechanical Tests	Test Method	RT
Tensile Strength (0°) (MPa)	ASTM D 3039	817
Tensile Modulus (0°) (GPa)	ASTM D 3039	56.6
Tensile Strength (90°) (MPa)	ASTM D 3039	835
Tensile Modulus (90°) (GPa)	ASTM D 3039	55.9
Compression Strength (0°) (MPa)	ASTM D 6641	710
Compression Modulus (0°) (GPa)	ASTM D 6641	54.2
Compression Strength (90°) (MPa)	ASTM D 6641	701
Compression Modulus (90°) (GPa)	ASTM D 6641	53.6
In-Plane Shear Strength (MPa)	EN 6031	128.2
In-Plane Shear Modulus (GPa)	EN 6031	3.50
ILSS (MPa)	EN 2563	79.2

Table 2
Tenax STS 24k-150-DT806R-36 UD Laminate

Mechanical Tests	Test Method	RT
Tensile Strength (0°) (MPa)	ASTM D 3039	2330
Tensile Modulus (0°) (GPa)	ASTM D 3039	124.0
Tensile Strength (90°) (MPa)	ASTM D 3039	45.0
Tensile Modulus (90°) (GPa)	ASTM D 3039	8.23
Compression Strength (0°) (MPa)	ASTM D 6641	1130
Compression Modulus (0°) (GPa)	ASTM D 6641	109.0
Compression Strength (90°) (MPa)	ASTM D 6641	154
Compression Modulus (90°) (GPa)	ASTM D 6641	8.7
In-Plane Shear Strength (MPa)	EN 6031	125.4
In-Plane Shear Modulus (GPa)	EN 6031	3.90
ILSS (MPa)	EN 2563	90.4

Recommended Cure Cycles for DT806 products

The versatility of **DT806** products allows processing by oven vacuum bag, autoclave and press moulding. The recommended cure cycles cover curing up to 120°C for the conventional bagging routes. With shorter cure cycles of 120°C and beyond allocated to press moulding.

Oven Vacuum Bag and Autoclave Curing Cycles

The following are recommended cycles up to 120°C:

- Cycle 1: 16 Hours @ 65°C
- Cycle 2: 10 Hours @ 70°C
- Cycle 3: 5 Hours @ 80°C.
- Cycle 4: 3 Hours @ 90°C.
- Cycle 5: 1.5 Hours @ 100°C.
- Cycle 6: 1.0 Hours @ 110°C.
- Cycle 7: 1.0 Hour @ 120°C.

All these cure cycles use an initial heating ramp-rate of 1 to 3°C/min from room temperature to the cure temperature. A vacuum should be applied to the bagged component during cure. For autoclave bag curing, the applied cure pressure needs to be between 3.0 and 6.0 bar.

If using oven vacuum bag curing, an intermediate dwell of 15 to 30 minutes at 65°C can be helpful in producing a low voidage component.

Faster Curing Cycles for Press Moulding

The high reactivity of DT806 products allows for short cure cycles if press moulding is chosen as the processing option. It is assumed a pre-prepared DT806 prepreg preform will be placed on a hot press tool set at the cure temperature. The following are a starting point for suggested cure cycles.

Cycle P1: 15 to 25 minutes @ 125°C

Cycle P2: 12 to 20 minutes @ 130°C

Cycle P3: 10 to 15 minutes @ 135°C.

Cycle P4: 6 to 10 minutes @ 140°C.

Note: These press moulding cure times are approximate, and may need to be adjusted taking account of specific conditions for each prepreg, part and press tool.

The following graph provides data on the gel times for DT806R at these higher temperatures:

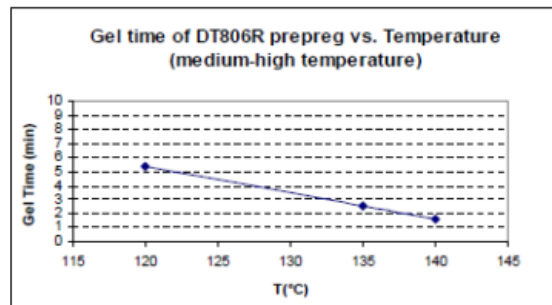


Figure 2: Gel Times for DT806R.

Post-Cure Options for Low and Reduced Temperature Cures

If maximum T_g is required then postcuring can be applied, with an initial cure of 100°C or less. This covers **Cycles 1 to 4** inclusive.

The free-standing postcure cycle is:

- Heat the part at 2°C/ minute ramp rate to the initial cure temperature (either 65°C, 70°C, 80°C, 90°C or 100°C).
- Slow the ramp rate.
- Heat the part at 0.3°C/min (20°C/Hour) to 120°C (*Important).
- Dwell at 120°C for 1 Hour.
- Cool the part at 2°C/min.

Note: *The reduced ramp-rate is essential for even development of T_g in the part and avoiding part distortion.

Processing Guidelines

Important notice: Prepregs rolls must be stored in a freezer at -18°C when not being used. Thaw the prepreg to room temperature before removing the roll from the protective bag of polyethylene. This may typically take six (6) hours. This will prevent the uncured prepreg product from absorbing moisture from the air, as this can affect the quality of the final part. After using the roll of prepreg it is recommended to seal the roll in the protective bag before replacing it in the freezer.

Prepreg Lay Up and Laminating

1. Prepreg: Pay particular attention to conform the prepreg plies to the geometry of the released mould when laminating, especially in corners of small radius of curvature.
2. A non-perforated release film must be used. Lay carefully over the laminate and mould, then seal at the mould edges with tape. This will prevent any leakage of resin from the part and coming into direct contact with the vacuum bag during the cure process.
3. Breather (non-woven polyester). Make sure the breather covers the entire part and reaches all the vacuum valves. A heavyweight breather is recommended.

4. Vacuum bag. Use a generous quantity of high temperature bagging film to cover the part. Make sure the bag can fill all corners of the part with excess film, and there is no bridging of the film which could cause a bag burst in the autoclave.

5. Make sure the vacuum in the bag is to a high level, typically 980 mbar. Check the vacuum tightness of the bag before curing, by removing the vacuum pump for at least 5 minutes. The loss of vacuum pressure should not be greater than 50 mbar.

For further information, please contact Delta-Tech's Technical Service Department.

Exothermic Reaction

DT806 are reactive resin formulations which can undergo excessive exothermic heating during the initial curing process if the correct curing procedures are not followed. Care must be taken to use the heating rates and dwell temperatures in the recommended cure cycles. The risk of exotherm increases with laminate thickness and increasing cure temperature.

If oven vacuum bag or autoclave curing laminates are greater than 5 mm in thickness, please contact our technical department for confirmation of the correct cure cycle.

With press moulding, metal tooling provides a good means of dispersing the heat generated by the resin reacting. The higher temperatures do however increase the risk, so curing beyond 140°C is not advised unless care is taken.

Available Products/Prepregs

DT806 resins can be impregnated with a wide range of fibre reinforcements, such as woven and unidirectional tapes of high strength and high modulus carbon fibre, woven E-glass, S-glass and multi-axials, with a range of fibre weights per square metre.

Prepreg Storage

Out Life: 21 days @ 21°C

Shelf Life: 12 months @ -18°C

Handling Precaution

When handling uncured resins and fibrous materials precaution should be considered. It is recommended to use clean protective gloves in order to protect the operators and avoid contamination of the components.

PŘÍLOHA P II: TECHNICKÉ PARAMETRY DYNAMOMETRU KISTLER 9129AA

Force

KISTLER
measure. analyze. innovate.

Multicomponent Dynamometer

Type 9129AA

-10 ... 10 kN, cover plate 90x105 mm

Multicomponent dynamometer for measuring the three components of the resultant force vector and the three components of the resultant moment vector.

- Small design
- Large measuring range
- Small temperature error
- For cutting force measurements
- For general multicomponent force measurements



Description

The dynamometer consists of four 3-component force sensors which are mounted under high preload between the cover plate and the two lateral base plates.

Because of the special mounting of the sensors, a small temperature error is achieved. The force sensors each contain three crystal disks, one of which is sensitive to pressure in the y direction and the two others to shear force in the x or z directions. The forces are measured with practically no displacement. The outputs of the four built-in force sensors are passed to the 9-pole flange socket. Multicomponent force-moment measurements are possible.

The four sensors are mounted with ground isolation. This largely avoids ground loop problems.

The dynamometer is corrosion-resistant and protected against the ingress of cooling lubricant. Used together with connecting cable Type 1687B... or Type 1677A..., the dynamometer is sealed according to degree of protection IP67.

Quartz multicomponent dynamometers measure easily, directly and very accurately.

Application examples

- Cutting force measurement in superfinishing
- Multicomponent force measurement
- Force measurement in confined spaces
- Measurement of the three cutting forces F_c , F_f , F_p while turning outside and inside diameters on lathes with turret-type tool heads (see data sheet for Type 9129A...)

Technical data

Max. permitted measuring range (Force application point at cover plate surface)	F_x, F_y, F_z M_x, M_y, M_z	kN N·m	-10 ... 10 -500 ... 500
Calibrated measuring range			
100 %	F_x, F_y, F_z	kN	0 ... 10
Calibrated partial meas. range			
10 %	F_x, F_y, F_z	kN	0 ... 1
Calibrated partial meas. range			
1 %	F_x, F_y, F_z	kN	0 ... 0,1
Overload	F_x, F_y, F_z	%	20
Threshold		N	<0,01
Sensitivity (rated)	F_x F_y F_z	pc/N pc/N pc/N	≈-8,1 ≈-4,1 ≈-8,1
Linearity, all ranges	F_x, F_y, F_z	±%/FSO	±0,3
Hysteresis, all ranges	F_x, F_y, F_z	%/FSO	<0,3
Crosstalk	$F_z \rightarrow F_x, F_y$ $F_x \leftrightarrow F_y$ $F_x, F_y \rightarrow F_z$	% % %	<±2 <±2 <±2
Rigidity	c_x, c_z c_y	N/μm N/μm	≈1 000 ≈4 000
Natural frequency (Type 9129AA mounted on rigid base)	$f_n(x)$ $f_n(y)$ $f_n(z)$	kHz kHz kHz	≈3,5 ≈4,5 ≈3,5
Operating temperature range		°C	0 ... 70
Capacitance	F_x, F_y, F_z	pF	≈180
Isolation resistance		Ω	>10 ¹¹
Ground isolation		Ω	>10 ⁸
Degree of protection EN60529			IP67
Weight	Dynamometer Cover plate	kg kg	3,2 2,0
Mounting surface		mm	90x105
Connection			Fischer flange 9 pin neg.

9129AA_000-709e-08.18

Page 1/5

This information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes. Liability for consequential damage resulting from the use of Kistler products is excluded.

© 2009 ... 2018 Kistler Group, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Switzerland
Tel. +41522241111, info@kistler.com, www.kistler.com. Kistler Group products are protected by various intellectual property rights. For more details visit www.kistler.com

Dimensions

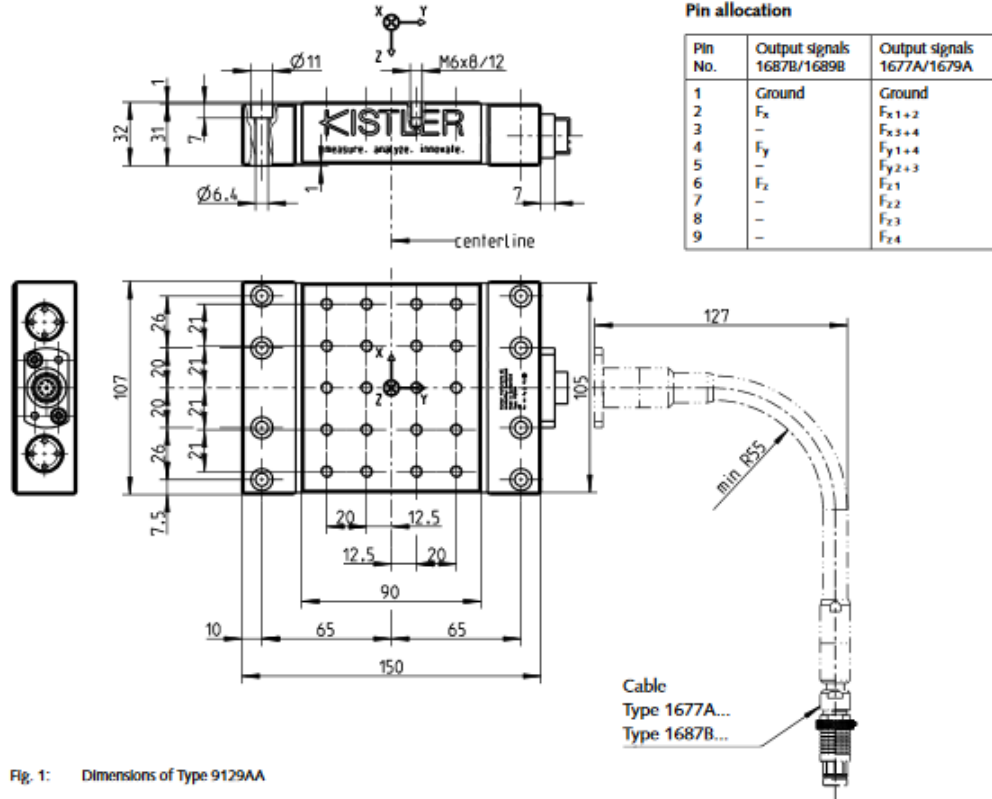


Fig. 1: Dimensions of Type 9129AA

Mounting

The dynamometer can be screwed onto any clean, surface-ground mounting surface, such as on a machine tool table. Mounting on a magnet plate is also possible. Please note that uneven mounting surfaces may cause internal distortion, placing additional heavy load on the individual measuring elements and possibly increased crosstalk.

M6 tapped blind bores are available on the cover plate for mounting the force-introducing components such as workpieces or tool holders. The mounting surfaces of the force-introducing components must be face-ground so that good mechanical connection to the cover plate is achieved.

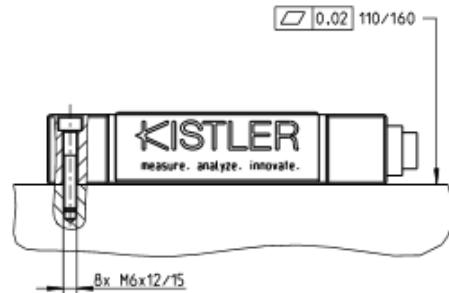


Fig. 2: Mounting the dynamometer

9129AA_000-709e-0818

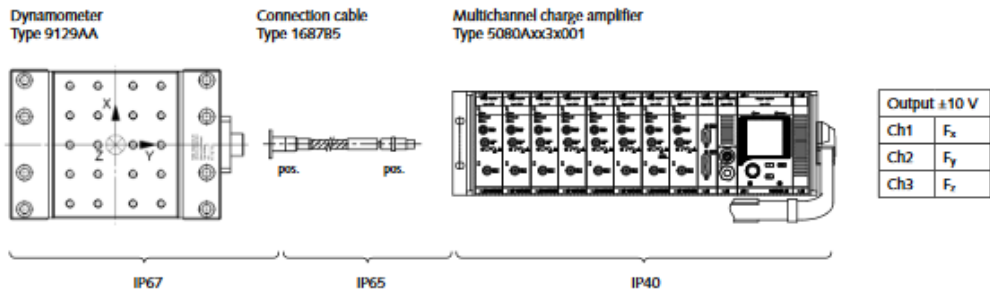
Processing the measurement signals

Charge amplifier channels are also needed to build a complete measuring system (e.g. Type 5080A...). These convert the measurement signal into an electrical voltage. The measured value is exactly proportional to the force acting.

Data acquisition and analysis

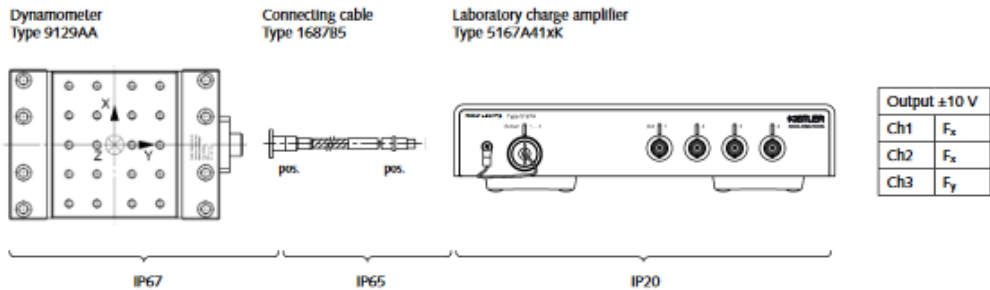
Kistler offers with the Type 5697A1 DAQ system an universal and easy to operate package, consisting of a hardware for the data acquisition and the DynoWare software. For details see data sheet 5697A_000-745.

3-component force measurement F_x , F_y , F_z



Degree of protection EN60529

Fig. 3: Measuring system for 3-component measurement with multichannel charge amplifier

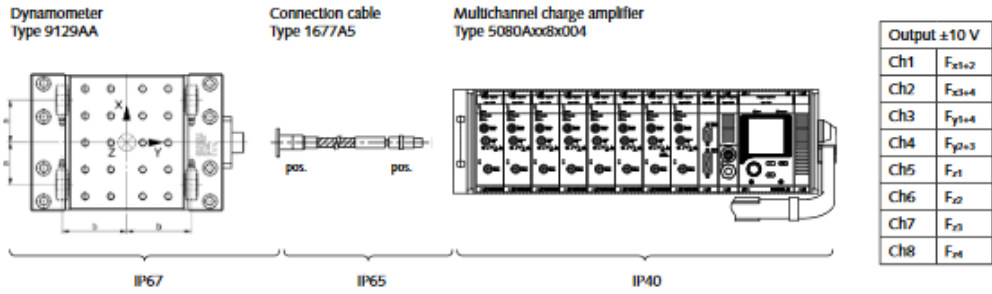


Degree of protection EN60529

Fig. 4: Measuring system for 3-component measurement with laboratory charge amplifier

9129AA_000-709e-08-18

6-component measurement $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$

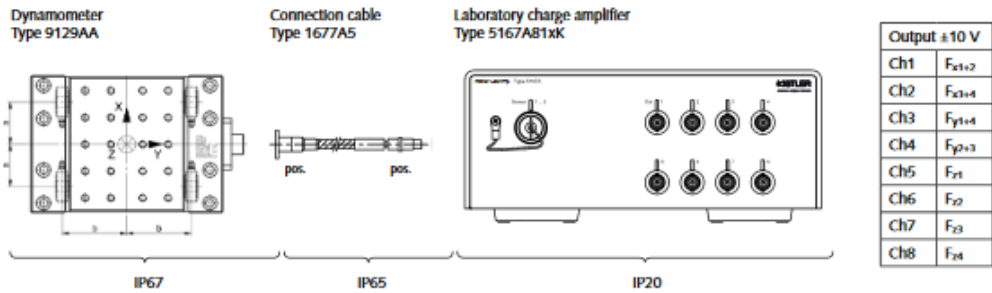


Degree of protection EN60529

Fig. 5: Measuring system for 6-component measurement with multichannel charge amplifier

Value a,b für Typ 9129AA:

a mm	b mm
33	50,5



Degree of protection EN60529







Fig. 6: Measuring system for 6-component measurement with laboratory charge amplifier

Value a,b für Typ 9129AA:





a mm	b mm
33	50,5

9129AA_000-709e-08.18

Typical measuring chain with DAQ system Type 5697A1

					
Dynamometer	Connection cable, high impedance	Charge amplifier	Connecting cable	DAQ system	Notebook (from customer side) with DynoWare
Type 9129AA	Type 16xx	Type 5080A	Type 1700A111A2 Type 1200A27	Type 5697A1	

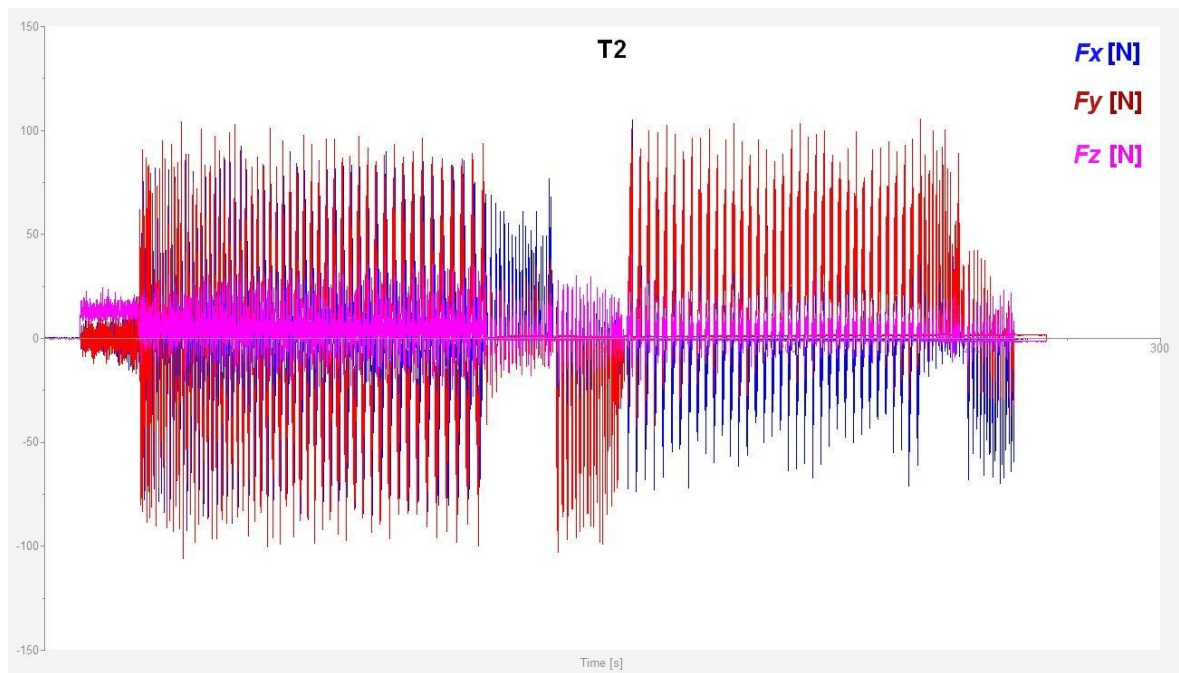
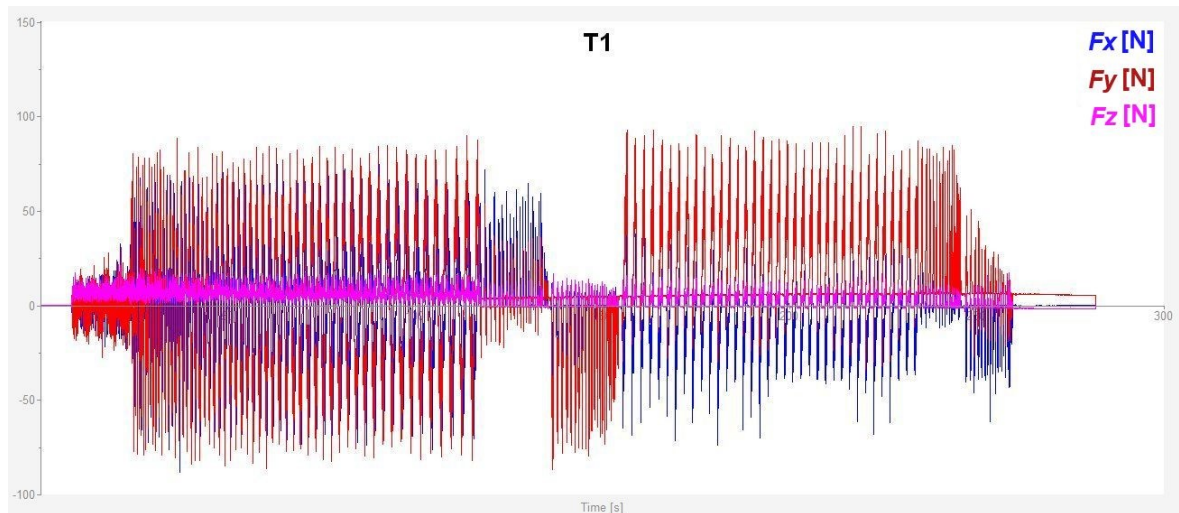
Typical measuring chain with LabAmp system Type 5167A...

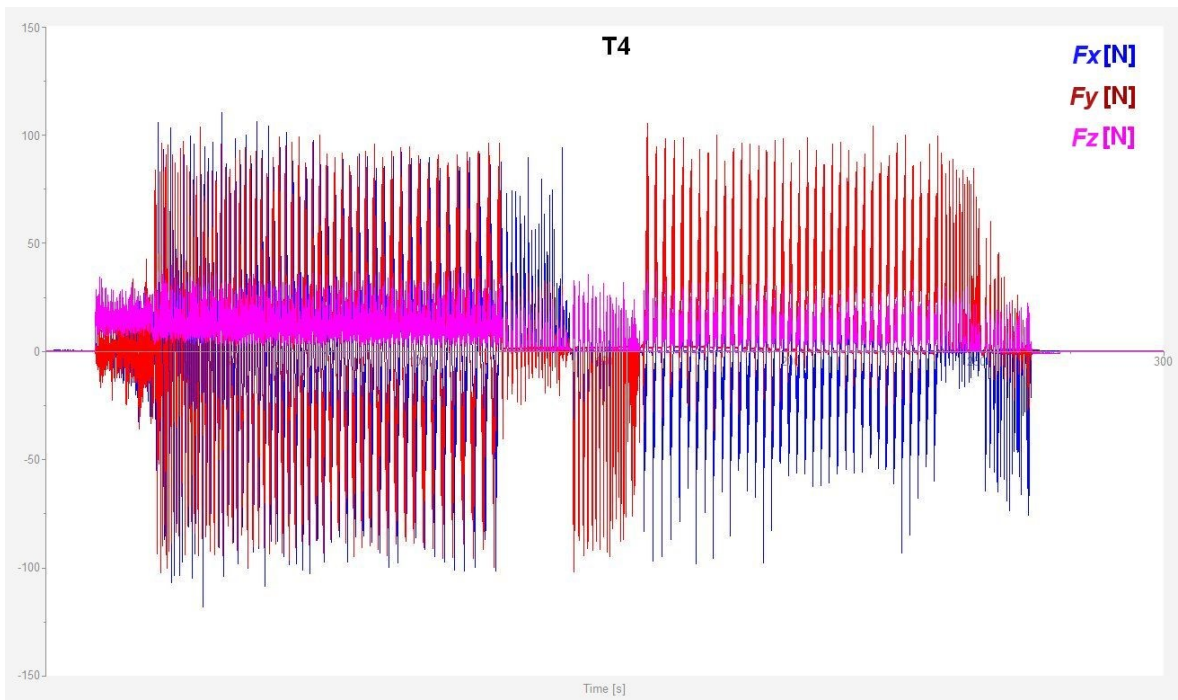
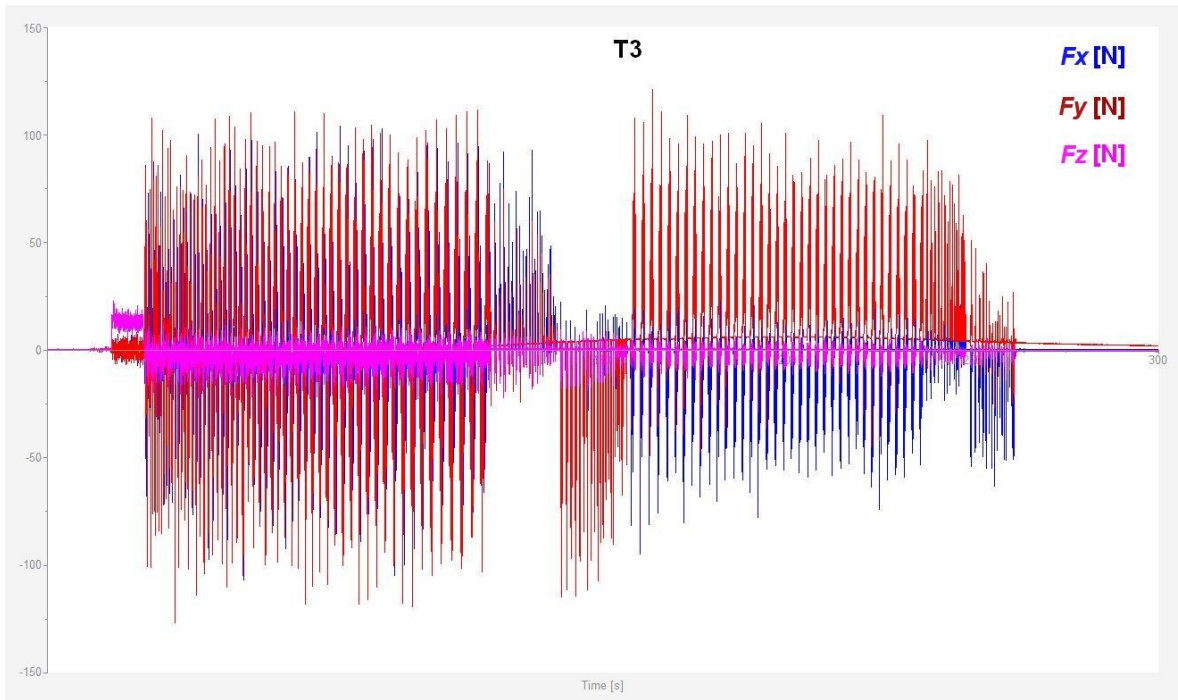
			
Dynamometer	Connection cable, high impedance	Charge amplifier with integrated DAQ	Notebook (from customer side) with DynoWare
Type 9129AA	Type 16xx	Type 5167A...	

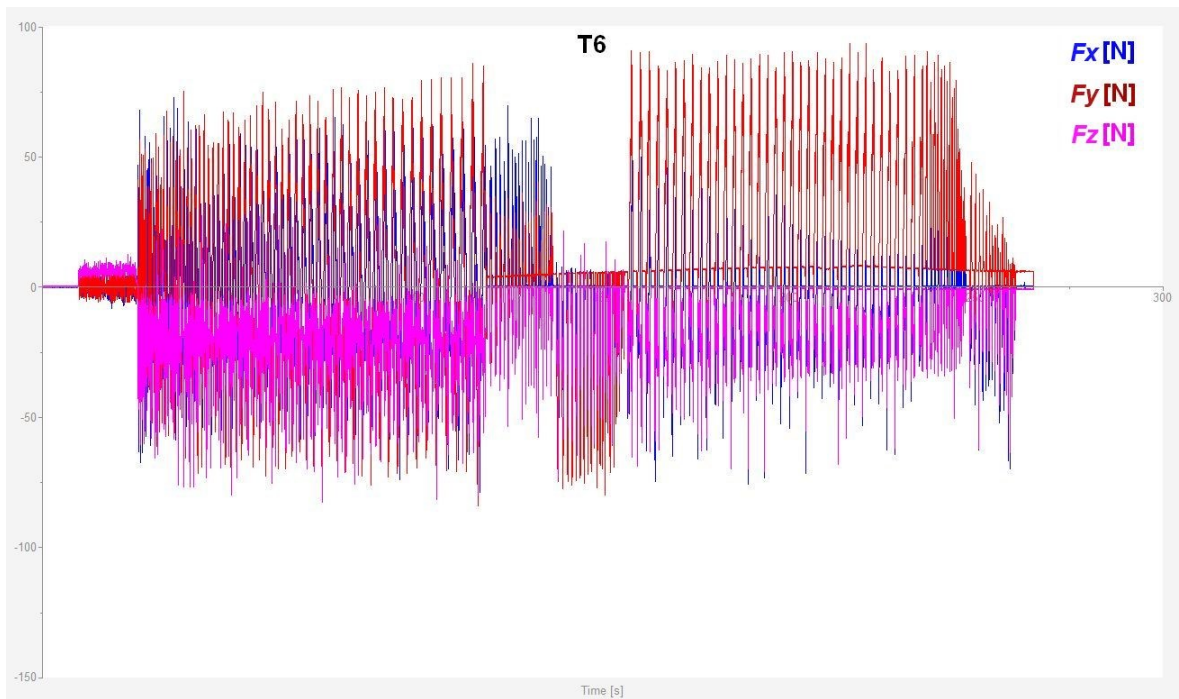
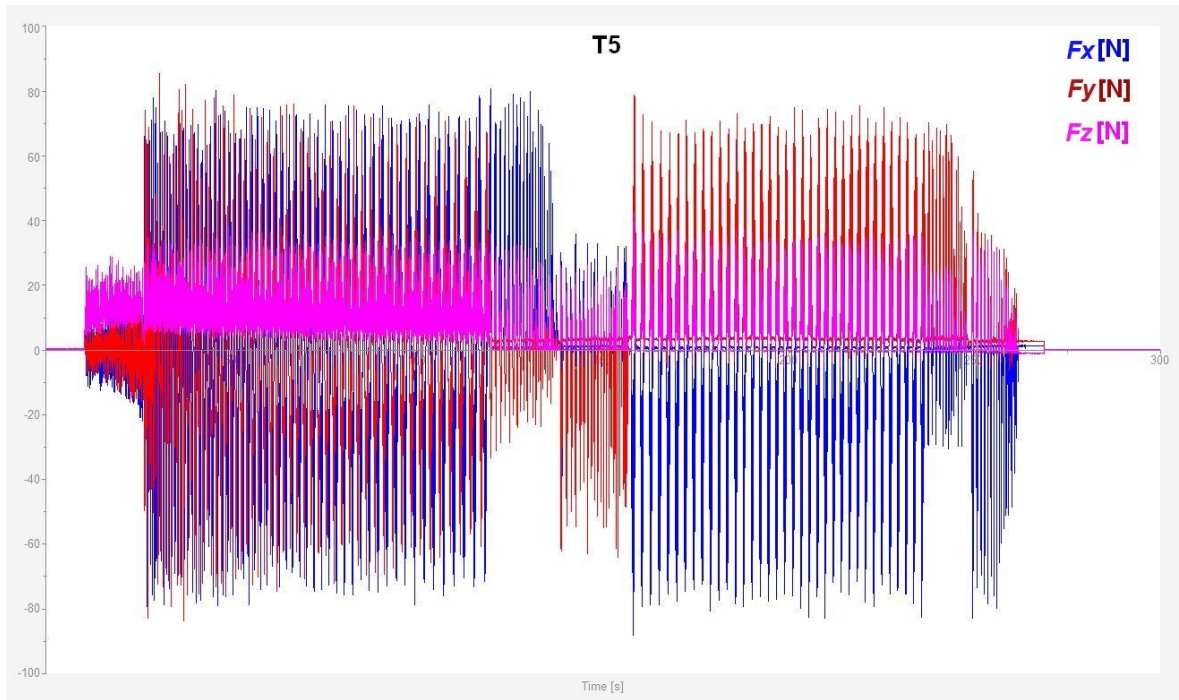
Ordering code	Type/Art. No.	Optional accessories	Type/Art. No.
<ul style="list-style-type: none"> Multicomponent dynamometer up to 4 kN, cover plate 90x105 mm 	9129AA	For 3-component force measurement F_x, F_y, F_z <ul style="list-style-type: none"> Connecting cable, 3 wire, with flexible metal sheath (L = 5 m) 1687B5 Connecting cable, 3 wire, steel braided, flexibel (L = 5 m) 1687BQ02 Extension cable, 3 wire, high insulation (L = 5 m) 1688B5 Connecting cable, 3 wire, with flexible metal sheath and angle connector (L = 5 m) 1689B5 	
Included accessories <ul style="list-style-type: none"> Mounting screws M6x35 (8 pieces) 	65012770	For 6-component force and moment measurement $F_x, F_y, F_z / M_x, M_y, M_z$ <ul style="list-style-type: none"> Connecting cable, 8 wire, with flexible metal sheath (L = 5 m) 1677A5 Connecting cable, 8 wire, with steel braided, flexibel (L = 5 m) 1677AQ02 Extension cable, 8 wire, high insulation (L = 5 m) 1678A5 Connecting cable, 8 wire, with flexible metal sheath and angle connector (L = 5 m) 1679A5 	

9129AA_000-709e-08.18

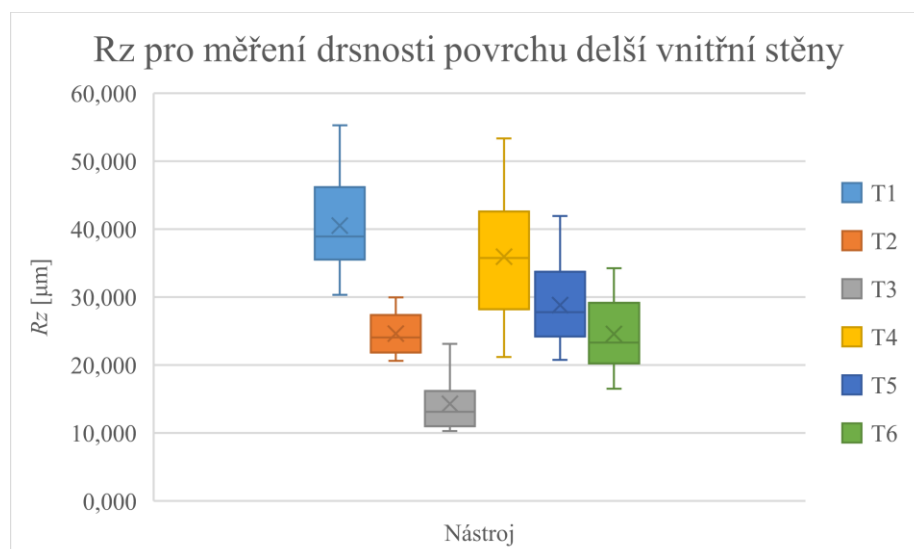
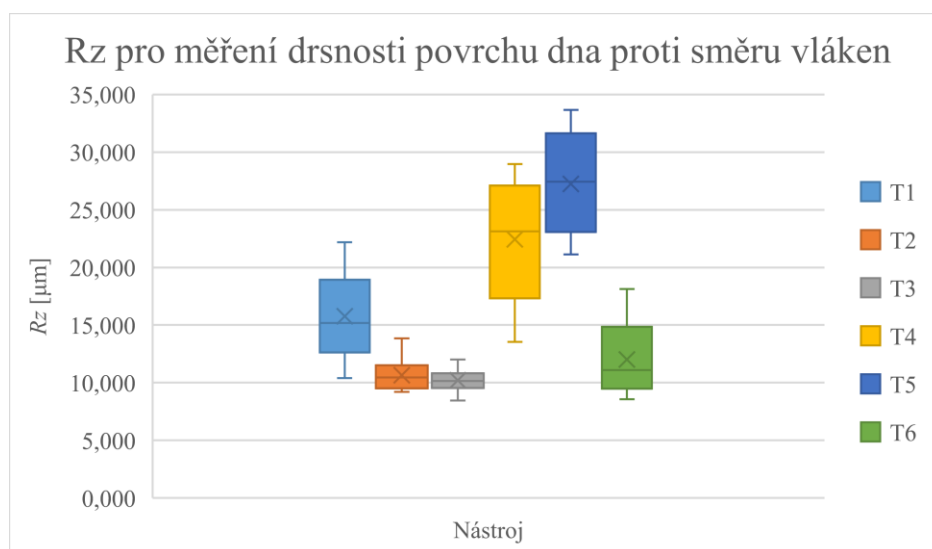
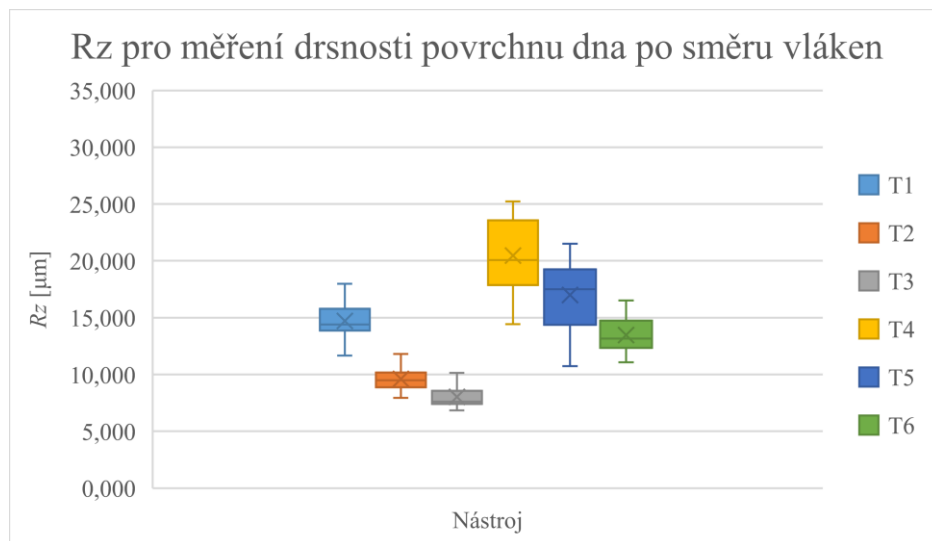
PŘÍLOHA P III: ZÁZNAMY ŘEZNÝCH SIL PRO ADAPTIVNÍ FRÉZOVÁNÍ



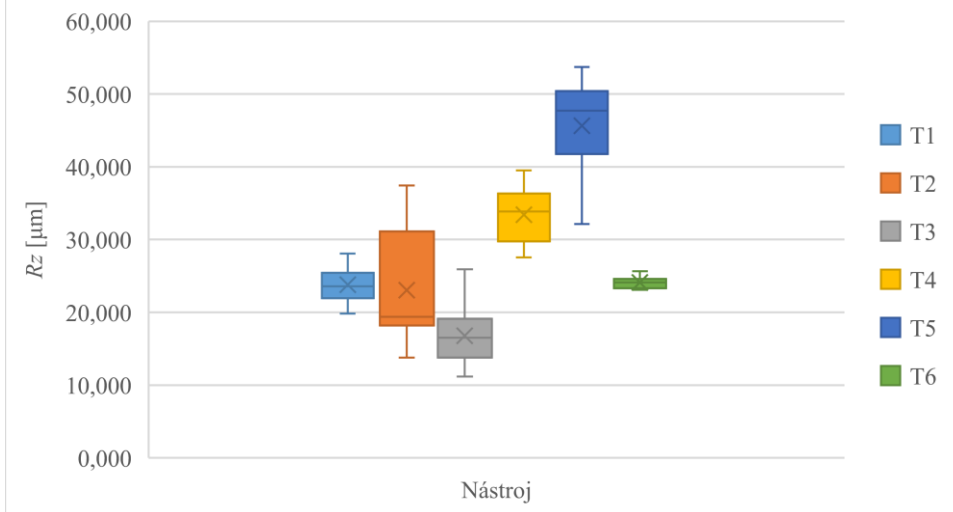




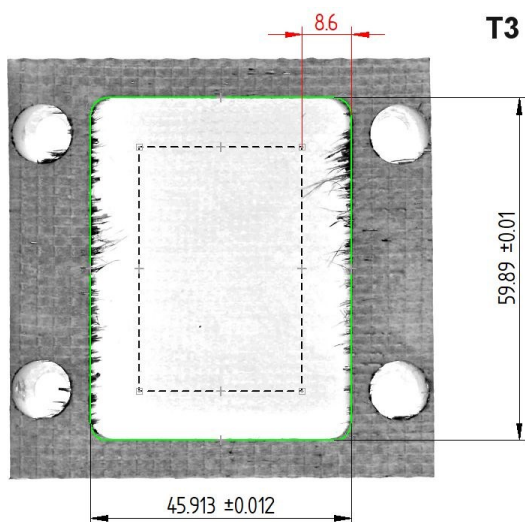
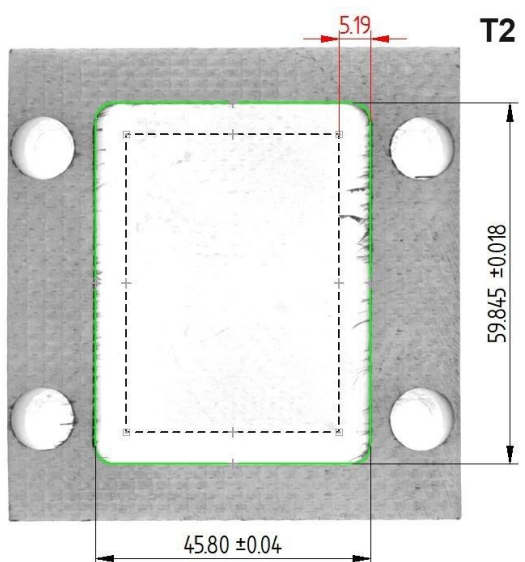
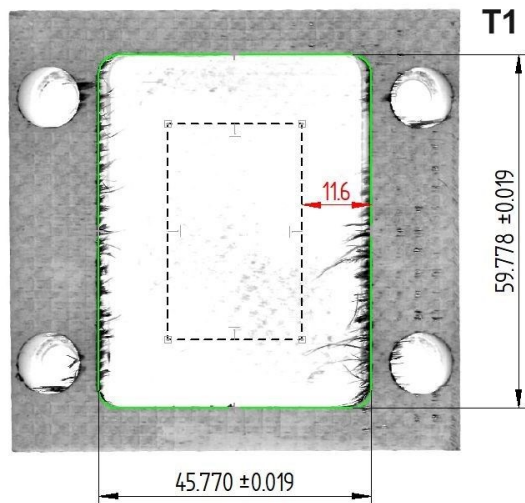
PŘÍLOHA P IV: GRAFY PRO PARAMETR RZ PRO ADAPTIVNÍ FRÉZOVÁNÍ

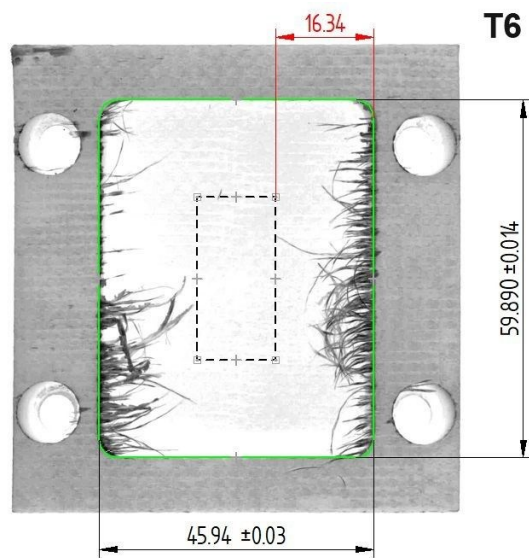
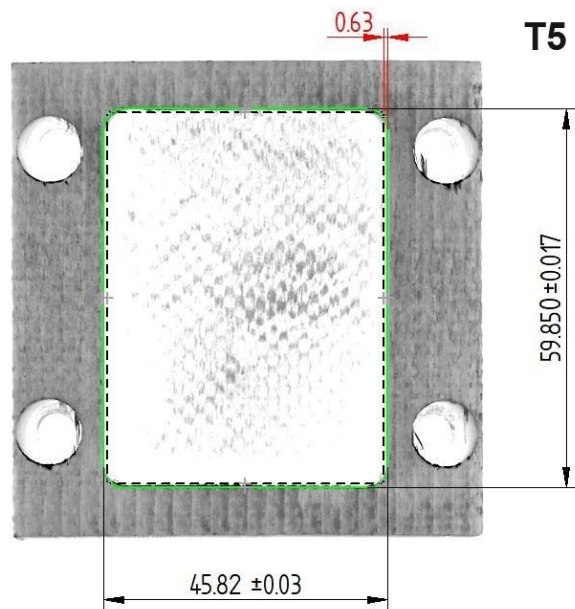
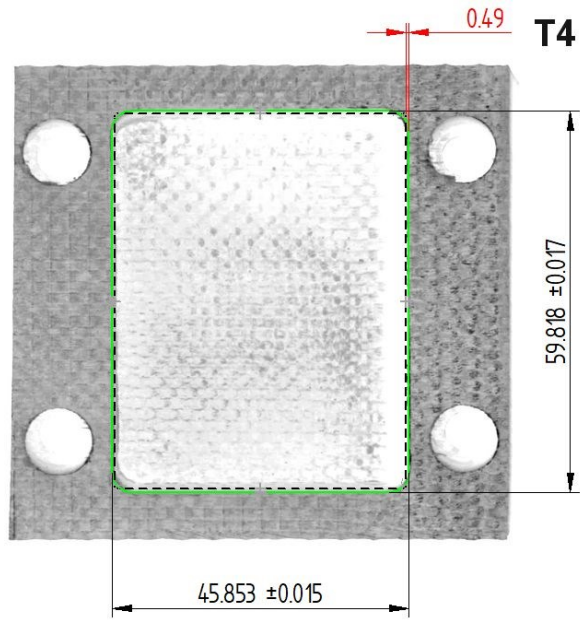


Rz pro měření drsnosti povrchu kratší vnitřní stěny



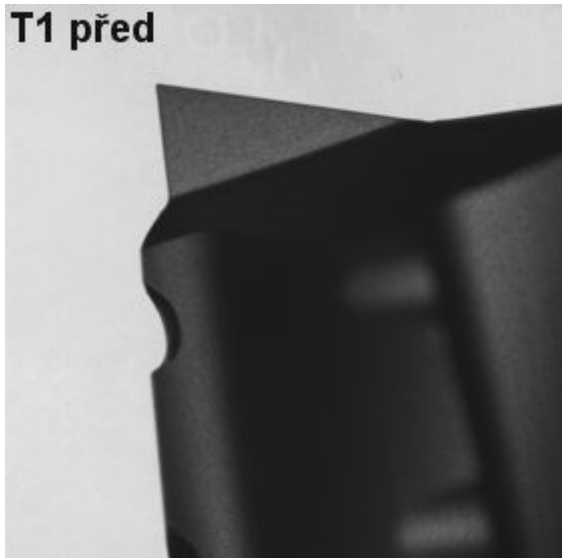
PŘÍLOHA P V: GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ VELIKOSTI OTŘEPŮ PO ADAPTIVNÍM FRÉZOVÁNÍ



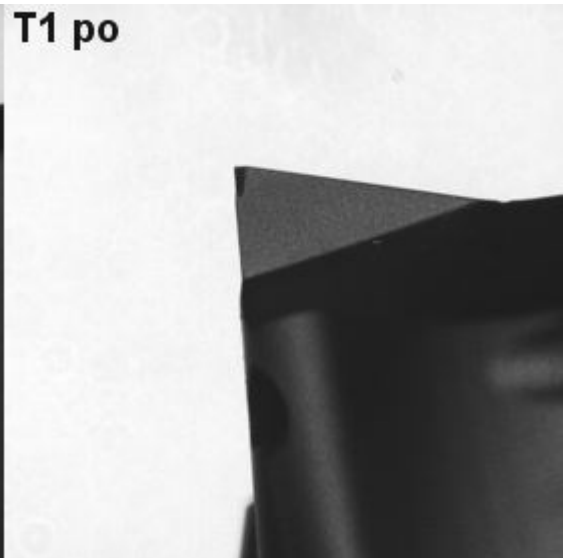


PŘÍLOHA P VI: SNÍMKY NÁSTROJŮ PŘED A PO ADAPTIVNÍM FRÉZOVÁNÍ

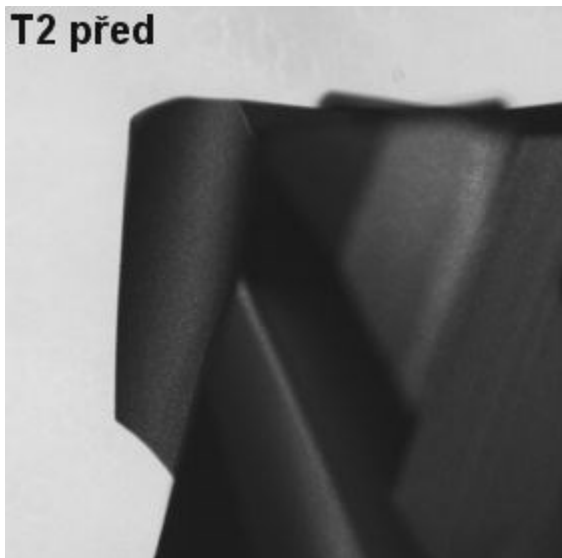
T1 před



T1 po



T2 před



T2 po



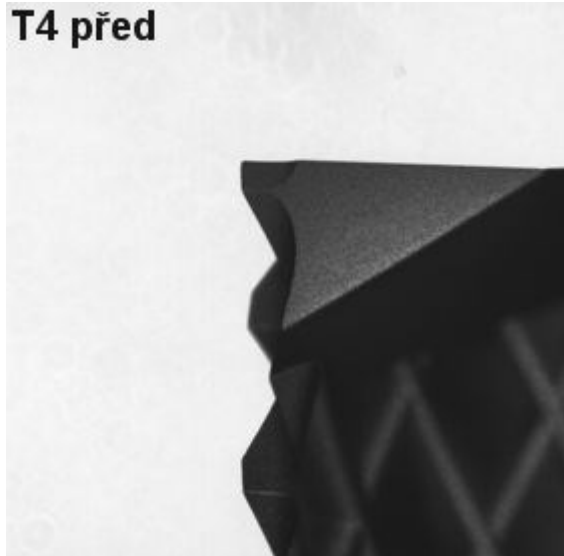
T3 před



T3 po



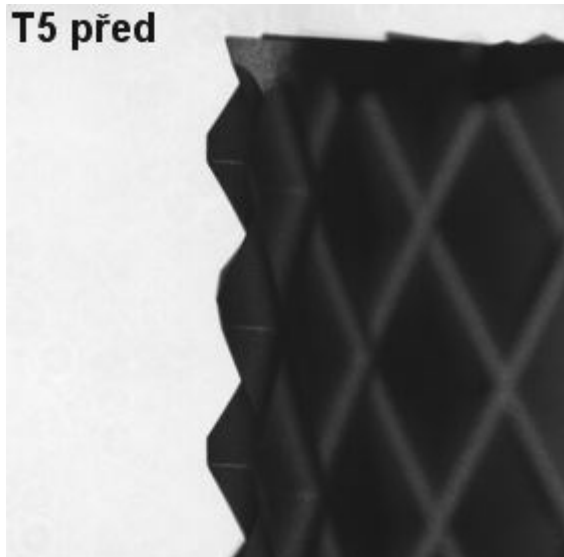
T4 před



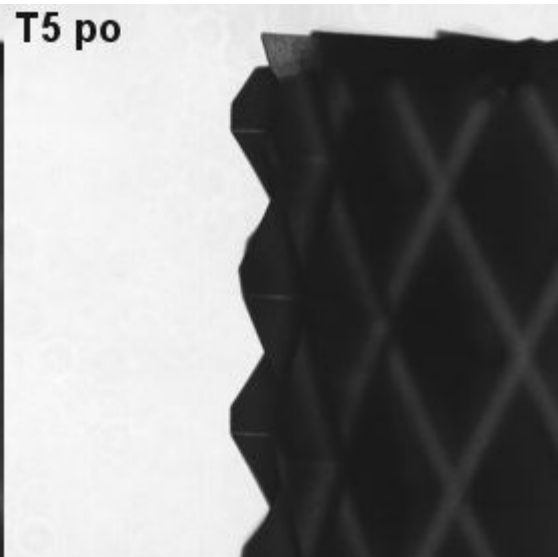
T4 po



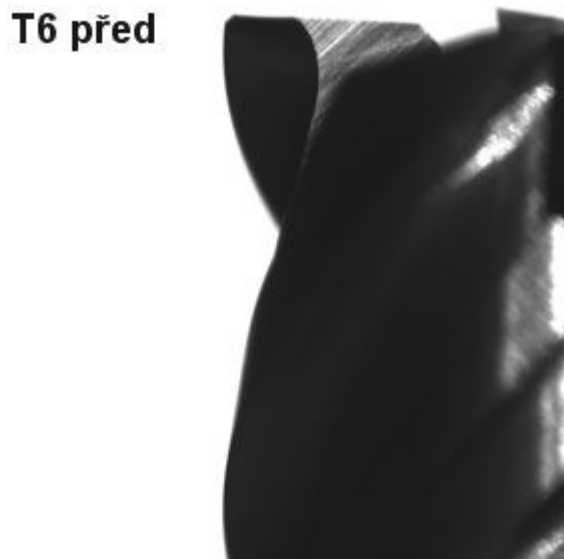
T5 před



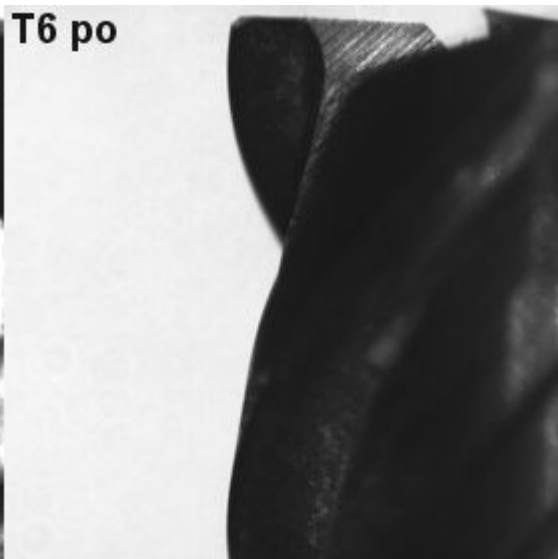
T5 po



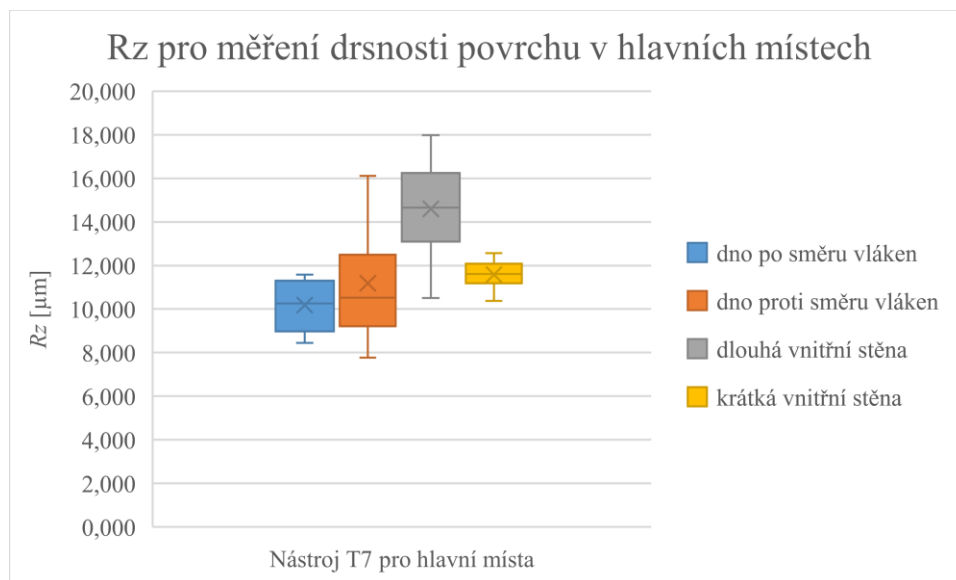
T6 před



T6 po



PŘÍLOHA P VII: GRAF PRO PARAMETR RZ PRO HRUBOVACÍ FRÉZOVÁNÍ



PŘÍLOHA P VIII: DISTRIBUCE ČÁSTIC V TŘÍSKÁCH PO ADAPTIVNÍM FRÉZOVÁNÍ PRO VŠECHNY NÁSTROJE VČETNĚ FOTOGRAFIÍ

