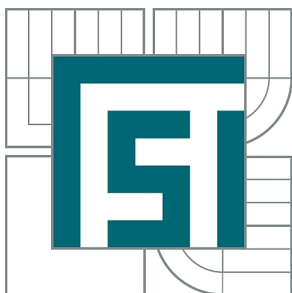


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

PROBLEMATIKA OBRÁBĚNÍ TITANOVÝCH SLITIN

PROBLEMS IN MACHINING OF TITANIUM ALLOYS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. TOMÁŠ DRÁBEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JOSEF SEDLÁK, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Tomáš Drábek

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Problematika obrábění titanových slitin

v anglickém jazyce:

Problems in machining of titanium alloys

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Úvod
2. Přehled experimentálních metod ve strojírenství; charakteristika technologie třískového obrábění (frézování)
3. Současný stav řešené problematiky
4. Experimentální část
5. Zpracování naměřených dat, diskuse
6. Závěr

Cíle diplomové práce:

Předložit přehled experimentálních metod a charakterizovat technologii třískového obrábění (frézování). Provést experiment v oblasti frézování titanových slitin obráběných firmou Frentech Aerospace s.r.o., se zaměřením na silové poměry. Zpracovat a vyhodnotit naměřená data.

Seznam odborné literatury:

1. MEDEK, J. Experimentální metody. VUT Brno, 1993.
2. ČECH, J., PERNIKÁŘ, J., BENEŠ, M. Strojírenská metrologie. Skriptum VUT v Brně. PC DIR s.r.o. Brno, 1994. 166 s. ISBN 80-214-0557-0.
3. MELOUN, M., MILITKÝ, J. Statistické zpracování experimentálních dat. PLUS s.r.o. Praha, 1994. 839 s. ISBN 80-85297-56-6.
4. PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. CERM 1.vyd. 246 s. 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
5. KOČMAN, K., PROKOP, J. Technologie obrábění. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 22.11.2012

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Teoretická část práce obsahuje stručný přehled některých experimentálních metod používaných v technologiích obrábění. Experimentální část nejprve zpracovává analýzu dvou titanových slitin. Následuje popis testování, spočívajícího ve frézování těchto dvou materiálů s použitím několika nástrojů a upínačů, které bylo provedeno ve spolupráci s firmou Frentech Aerospace s.r.o. Při frézování bylo měřeno silové zatížení piezoelektrickým dynamometrem. Dále je provedeno vyhodnocení získaných dat, na které navazuje diskuse polemizující nad hlavními výsledky. Závěr práce předkládá konkrétní zjištěná fakta korespondující s informacemi získanými analýzou materiálů. Hlavní výsledky plynou z porovnání použitých kombinací nástrojů a upínačů pro frézování materiálu Ti-Al6-V4, pozorování vlivu jednotlivých faktorů na měřenou sílu nebo z rozdílných hodnot měřených sil při frézování dvou daných materiálů.

Klíčová slova

experimentální metody, titanové slitiny, Ti-Al6-V4, Ti-Al5-Mo5-V5-Cr3-Zr1, analýza materiálu, dynamometr, měření sil, frézování

ABSTRACT

The theoretical part of the thesis contains a brief overview of some experimental methods that are used in machining technologies. The experimental part at first elaborates on the analysis of two titanium alloys. The actual experiment, which consists of milling of the two aforementioned materials with the use of several tools and holders, is then described. It was conducted in collaboration with the company Frentech Aerospace s.r.o. When milling, forces were measured with piezoelectric dynamometer. Further, the analysis of acquired data that is followed with discussion about its main findings, is provided. The conclusion of the thesis deals with the found facts corresponding with the information obtained by analysis of materials. The main results arise out of the comparison of used combinations of tools and holders for milling of material Ti-Al6-V4, observation of impact of particular factors on measured force, or out of different values of measured forces when milling two given materials.

Key words

experimental methods, titanium alloys, Ti-Al6-V4, Ti-Al5-Mo5-V5-Cr3-Zr1, material analysis, dynamometer, force measuring, milling

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DRÁBEK, Tomáš. *Problematika obrábění titanových slitin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 112 s., 3 přílohy. Vedoucí diplomové práce Ing. Josef Sedlák, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Problematika obrábění titanových slitin** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

Bc. Tomáš Drábek

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto firmě Frentech Aerospace s.r.o. za umožnění zpracovávat daný problém. Ing. Valáškoví z této společnosti děkuji za pomoc při provádění experimentu. Ing. Havránkové a Ing. Petrencovi, Ph.D., z firmy TESCAN, a.s., za vytvoření snímků a EDX analýz materiálů na elektronovém mikroskopu. Dále vedoucímu práce Ing. Sedlákoví, Ph.D. za cenné rady a připomínky. Děkuji Ing. Bednářovi, Ph.D., za konzultace při zpracovávání statistický analýz. Poděkování též patří Ing. Klakůrkové, Ph.D., za přípravu metalografických vzorků včetně měření tvrdosti a Ing. Němcovi, Ph.D., za pomoc při zpracovávání analýz materiálů. V neposlední řadě děkuji své rodině za podporu při mém studiu.

OBSAH

ABSTRAKT	3
PROHLÁŠENÍ	4
PODĚKOVÁNÍ	5
OBSAH	6
ÚVOD.....	9
1 PŘEHLED EXPERIMENTÁLNÍCH METOD VE STROJÍRENSTVÍ	10
1.1 Přehled metod.....	10
1.2 Měření opotřebení řezného nástroje	10
1.2.1 Přímé metody měření opotřebení	10
1.2.2 Nepřímé metody měření opotřebení.....	13
1.3 Měření sil při obrábění	14
1.3.1 Dynamometry	14
1.3.2 Piezoelektrické dynamometry.....	18
1.4 Měření teploty a tepla.....	25
2 CHARAKTERISTIKA TECHNOLOGIE FRÉZOVÁNÍ	28
2.1 Nesousledné frézování	28
2.2 Sousledné frézování	28
2.3 Nesymetrické a symetrické frézování.....	29
2.4 Použitý způsob frézování při experimentu	29
3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY FIRMY FRENTECH AEROSPACE s.r.o.	31
3.1 Problematika výroby závěsu pantu	31
4 EXPERIMENT – FRÉZOVÁNÍ TITANOVÝCH SLITIN	33
4.1 Metalografický rozbor frézovaných materiálů.....	33
4.1.1 Ti64	34
4.1.2 Ti55531	42

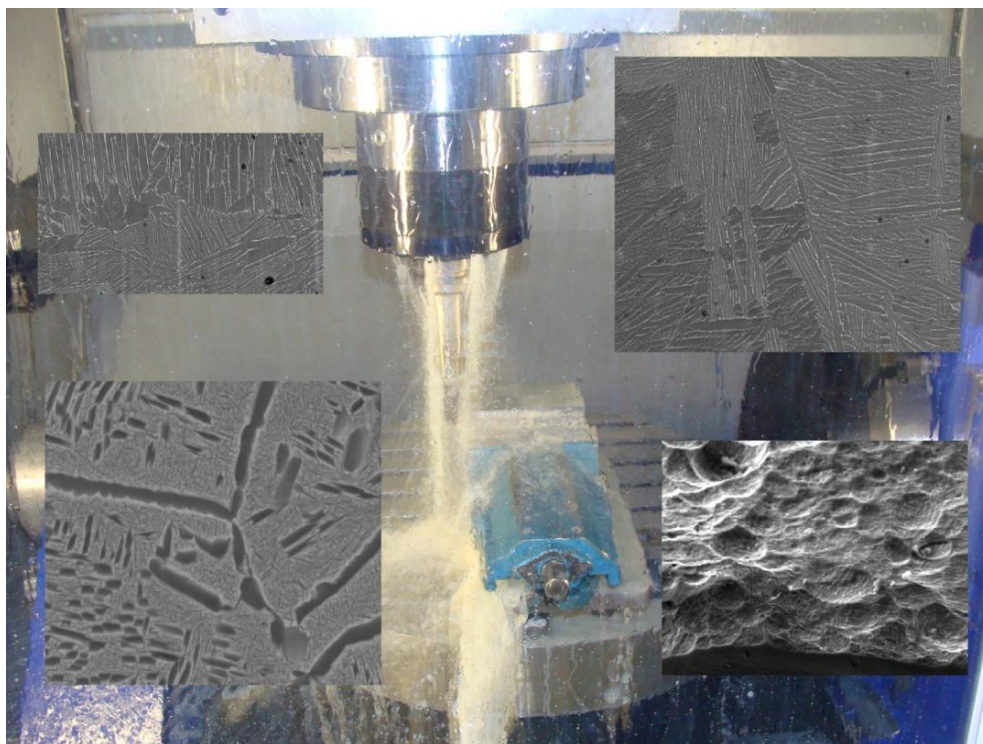
4.2	Testování	47
4.3	Příprava zkušebních vzorků	47
4.4	Použité nástroje a upínače nástrojů	48
4.4.1	Fréza GUHRING - RF 100 F	48
4.4.2	Fréza KENNAMETAL HARVI II UDDE	49
4.4.3	Upínací trn WELDON	50
4.4.4	Tepelný upínací trn	51
4.5	Postup měření	52
4.5.1	Podmínky frézování	52
4.5.2	Test materiálu s povrchovou vrstvou – Ti64	53
4.5.3	Test materiálu bez povrchové vrstvy – Ti55531	55
5	VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT	56
5.1	Analýza procesu frézování – filtrace klíčových dat	56
5.1.1	Matematická identifikace – výpočtová analýza procesu	56
5.1.2	Výběr oblasti dat pro zpracování	58
5.1.3	Matematické určení okolí pro nalezení posunů mezi maximy břitů	59
5.1.4	Orientační velikost posunů mezi zuby – analýza nerovnoměrnosti ...	60
5.1.5	Princip použitého filtračního nástroje	62
5.2	Analýza vybraných dat	63
5.2.1	Velikost působení výslednic F_{xyMz} a F_{xyzMz}	64
5.3	Porovnání kombinací nástrojů a upínačů při frézování Ti64	66
5.3.1	Obrábění včetně povrchové vrstvy za podmínky $a_p = 8$ mm	66
5.3.2	Obrábění včetně povrchové vrstvy za podmínky $a_p = 4$ mm	73
5.3.3	Obrábění bez povrchové vrstvy za podmínky $a_p = 4$ mm	75
5.3.4	Variabilita – měření s/bez povrchové vrstvy a $a_p = 8$ mm vs. 4 mm ..	78
5.4	Faktorový vliv na velikost výsledné měřené síly F_{VM}	83
5.4.1	Odezva – střední hodnota F_{VM}	83

5.4.2	Odezva – směrodatná odchylka F_{VM}	87
5.5	Silová zatížení v závislosti na frézovaném materiálu a volbě nástroje	89
5.5.1	Opakovaná měření při frézování Ti64	90
5.5.2	Opakovaná měření při frézování Ti55531	93
5.6	Nástroje po testu	97
5.6.1	Fréza GUHRING – upínač weldon	97
5.6.2	Fréza GUHRING – tepelný upínač	98
5.6.3	Fréza KENNAMETAL – upínač weldon	99
5.6.4	Fréza KENNAMETAL – tepelný upínač.....	100
6	DISKUSE	101
	ZÁVĚR	104
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	106
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	109
	SEZNAM PŘÍLOH.....	112

ÚVOD

Titanové slitiny mají ve strojírenských oborech značné uplatnění. Ačkoliv nejsou nejvíce používanými slitinami k výrobě strojních a jiných součástí, lze se s nimi ve strojírenském průmyslu setkat relativně často. Navíc svoje uplatnění nemají pouze ve strojírenství, ale i v oblastech naprosto odlišných, jako je např. zdravotnictví. Tato oblast ovšem není tou největší, kde mají titanové slitiny své velké zastoupení. Titan a jeho slitiny hrají velkou roli v kosmickém a leteckém průmyslu, kde byl také používán nejdříve.

Součásti, jež jsou z těchto materiálů vyráběny, vyžadují pro své zpracování mimo jiné využití technologií třískového obrábění. Titanové slitiny jsou považovány za těžko obrobitelné materiály, z čehož plynou časté problémy při obrábění, kterými je například značné zatížení nástroje, tedy i stroje, potažmo upínače apod. Obrábění různých typů slitin titanu někdy tedy vyžaduje náročnější identifikaci těchto problémů. K pozorování těchto i jiných problémů ve strojírenské výrobě lze efektivně využít experimentálních metod, jichž je celá řada.



Ukázka frézování titanových slitin.

Cílem této práce je předložit stručný přehled experimentálních metod využívaných ve strojírenství. V návaznosti na řešenou problematiku také stručně charakterizovat technologii třískového obrábění, konkrétně frézování. Experimentální část se zabývá problémem, se kterým se setkává firma Frentech Aerospace s.r.o. Problém spočívá v rozdílné rychlosti opotřebení nástrojů při frézování dvou titanových slitin. Experiment je založen na identifikaci silového zatížení při frézování dvou materiálů za použití více nástrojů a upínačů. Dále je v této části proveden metalografický rozbor obou testovaných materiálů. Následně je provedeno vyhodnocení naměřených dat k získání informací o rozdílném silovém zatížení nástrojů v korespondenci s několika možnými vlivy a materiálovými vlastnostmi. Závěrečná diskuse a navazující závěr shrnují zjištěná fakta.

1 PŘEHLED EXPERIMENTÁLNÍCH METOD VE STROJÍRENSTVÍ

Experimentálních metod využívaných ve strojírenství je celá řada. Podstatou těchto metod je měření a vyhodnocení průvodních jevů obrábění a tváření. V oblasti obrábění mezi tyto metody patří například měření řezných sil a odporů, mechanické zkoušky, kvalitativní a kvantitativní hodnocení opotřebení apod. Ve tváření to může být měření tvářecích sil, přetvárných odporů, rychlostí deformací aj. [1].

1.1 Přehled metod

Mezi experimentální metody využívanými v oblastech strojírenství lze zajisté zařadit širokou škálu metod, přičemž jejich kompletní důkladné zpracování by vyžadovalo více prostoru, který ovšem není v teoretické části diplomové práce dostupný. Tato práce se svým tématem pohybuje především v oblastech obrábění, proto je dále zpracován přehled několika oblastí technologií obrábění, kde mají experimentální metody své využití. U těchto technologií dochází nejčastěji k měření a vyhodnocování:

- opotřebení řezného nástroje,
- řezné síly,
- tepla a teploty [2].

Metody využívané k měření a vyhodnocení výše zmíněných charakteristik a veličin jsou stručně zprůhledněny v následujících kapitolách.

1.2 Měření opotřebení řezného nástroje

Pro získání informací o opotřebení řezného nástroje lze využít dvou skupin metod – přímé a nepřímé. Tyto jsou zpracovány v podkapitole 1.2.1 a 1.2.2.

1.2.1 Přímé metody měření opotřebení

Jedná se o skupinu metod, kdy přímo sledujeme a vyhodnocujeme jednotlivá kritéria opotřebení řezného nástroje. Přímými metodami rozumíme:

1) Měření kritérií opotřebení VB, KT, KVy

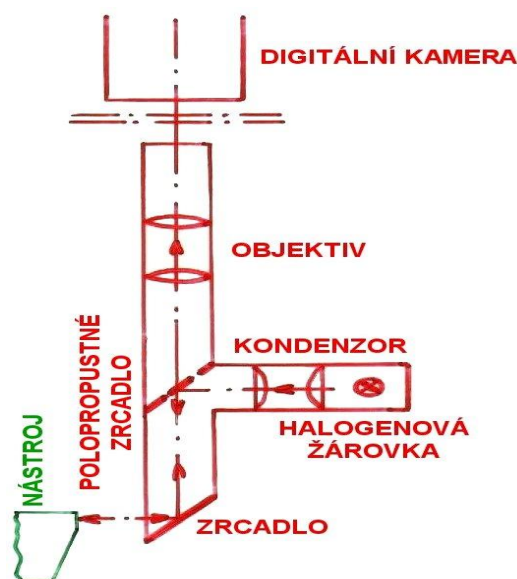
K měření střední šířky fazetky opotřebení na hřbetě VB se používá dílenský mikroskop. Hloubka výmolu na čele KT bývá měřena profilometrem a radiální opotřebení špičky KVy délkovým měřidlem. Jedná se o diskontinuální metodu, tedy měření lze provádět pouze na nástroji, který aktuálně neodebírá třísku [1].

2) Vážení břitové destičky

Jedná se o další diskontinuální metodu. Vážením břitové destičky lze pouze zjistit, kolik materiálu řezného nástroje bylo opotřebením odstraněno [2].

3) Optické sledování funkční plochy nástroje

Optické sledování funkční plochy nástroje patří také mezi diskontinuální metodu. Digitální kamerou je přes objektiv snímána poloha nástroje. Provádí se snímání hřbetu nebo čela nástroje. Metodou lze pozorovat i opotřebení špičky nástroje. Princip metody je schematicky znázorněn na obr. 1.1 [2].

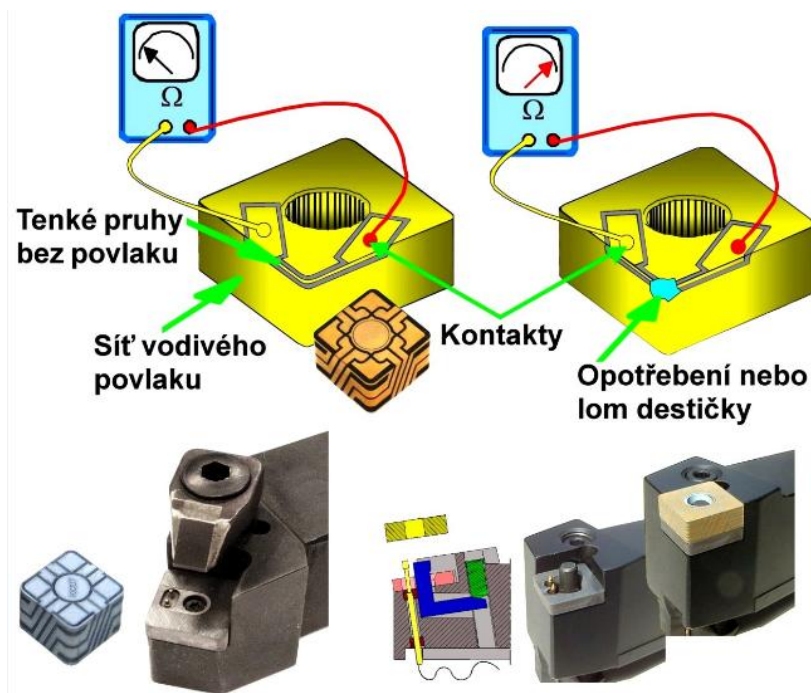


Obr. 1.1 Optické sledování funkční plochy nástroje [2].

4) Elektrické metody

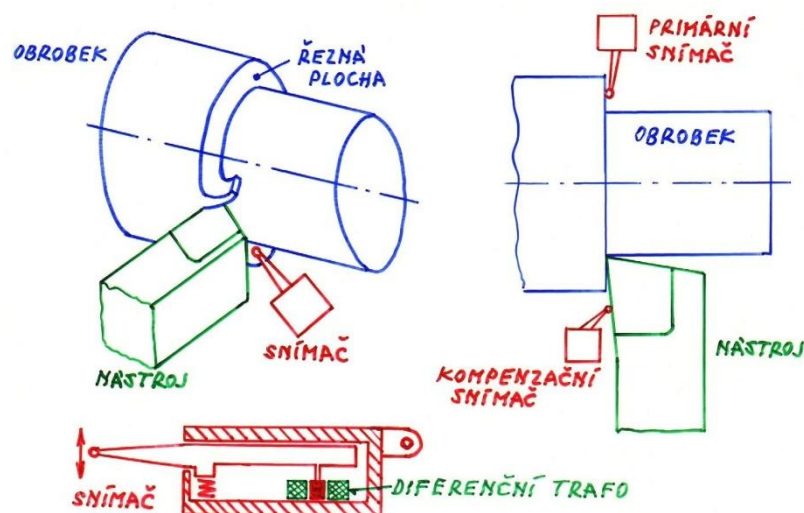
Elektrické metody patří mezi kontinuální. To znamená, že je lze použít za chodu stroje, což může být velkou výhodou. Jedná se o několik níže zmíněných metod.

- Odporové metody – princip metody je založen na změně elektrického odporu v oblasti styku nástroje s obrobkem. Na hřbet nástroje je nanášena síť vodivého povlaku. Tato je postupným opotřebením odstraňována – dochází ke změně elektrického odporu. Ve chvíli, kdy dojde k dosažení limitní hodnoty odporu, je nástroj opotřeben. Princip je více přiblížen na obr. 1.2 [1, 2].



Obr. 1.2 Elektrická odporová metoda [2].

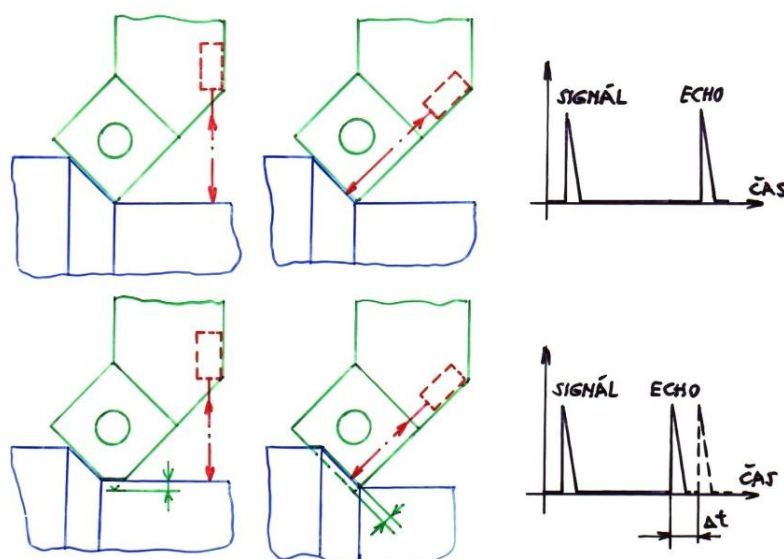
- Sledování vzájemné polohy nástroje a obrobku (obr. 1.3) – principem je neustálé sledování polohy obrobku a nástroje. Primárním snímačem je sledována poloha obrobku a kompenzačním snímačem je zaznamenávána aktuální poloha nástroje. Dochází k porovnávání obou poloh. Nevýhodou metody je nemožnost určení formy opotřebení [2].



Obr. 1.3 Sledování vzájemné polohy nástroje a obrobku [2].

5) Ultrazvukové metody

Tyto metody se také řadí mezi kontinuální. Tímto způsobem lze určovat velikost KVy. Principem je vysílání ultrazvukových vln, snímání zpětně odražených vln a vyhodnocení doby mezi vyslaným a odraženým signálem. Při opotřebení dojde ke zkrácení dopadové vzdálenosti a tím se i zmenší čas odražené vlny. Při dosažení určitého rozdílu času, který odpovídá určité hodnotě opotřebení, mezi odraženou vlnou při novém nástroji a vlnou ve chvíli opotřebovaného nástroje je tento vyhodnocen jako opotřebovaný [2].

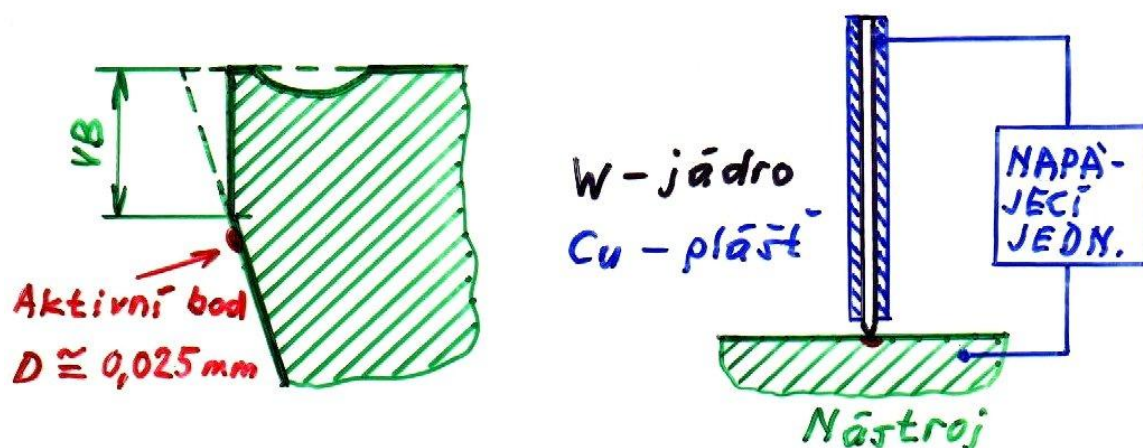


Obr. 1.4 Ultrazvuková metoda [2].

6) Radioaktivní metody

Mezi radioaktivní metody řadíme metodu ozáření řezného nástroje a metodu mikroizotopového snímače.

- Ozáření řezného nástroje – řezný nástroj (výměnná břitová destička) je vystaven radioaktivnímu záření. Nástroj je ozářen a intenzita záření sledována čítačem. Opotřebené částičky materiálu nástroje padají při obrábění do procesní kapaliny, z níž jsou následně vyseparovány. Čítačem snímána intenzita záření, která se mění v závislosti na odstraněném množství materiálu nástroje. Při dosažení určité stanovené hodnoty je nástroj opotřeben. Mezi nevýhody patří fakt, že není možné určit, kde a jak se nástroj opotřebovává [2].
- Mikroizotopový snímač – na nástroji je vytvořen aktivní bod o průměru přibližně 0,025 mm, charakteristický svým radioaktivním zářením. Ve chvíli kdy vlivem opotřebení dojde k odstranění bodu, dochází ke ztrátě měřeného záření v daném místě (obr. 1.5) [2].



Obr. 1.5 Mikroizotopový snímač [2].

1.2.2 Nepřímé metody měření opotřebení

Další skupinou metod k měření opotřebení jsou nepřímé metody. K vyhodnocení opotřebení dochází nepřímo, měřením jiné veličiny. Všechny tyto metody jsou kontinuální. Obvykle je u těchto metod měřena:

- řezná síla,
- příkon stroje,
- kmitání,
- teplota,
- drsnost obrobené plochy [2].

Měření a vyhodnocování jednotlivých složek řezné síly

Měření jednotlivých složek řezné síly patří k velmi rozšířeným experimentálním metodám. S rostoucím opotřebením nástroje se mění i velikosti složek síly. Důležité je správné vyhodnocení měřených sil, které poté mohou odpovídat velikosti

opotřebení. Tato práce je především založena na využití metody měření jednotlivých složek řezné síly, proto je této oblasti věnována následující kapitola.

1.3 Měření sil při obrábění

Měření silových zatížení při obrábění nemá své uplatnění pouze při nepřímém určení opotřebení řezného nástroje. Na základě získaných informací o silovém zatížení v časovém průběhu lze vyhodnotit i jiná kritéria. Častokrát nás například může zajímat variabilita silového působení, rostoucí či klesající tendence apod. K měření sil je využíváno několik metod, z nichž některé jsou více přiblíženy v následující kapitole 1.3.1. Mezi tyto metody patří např.:

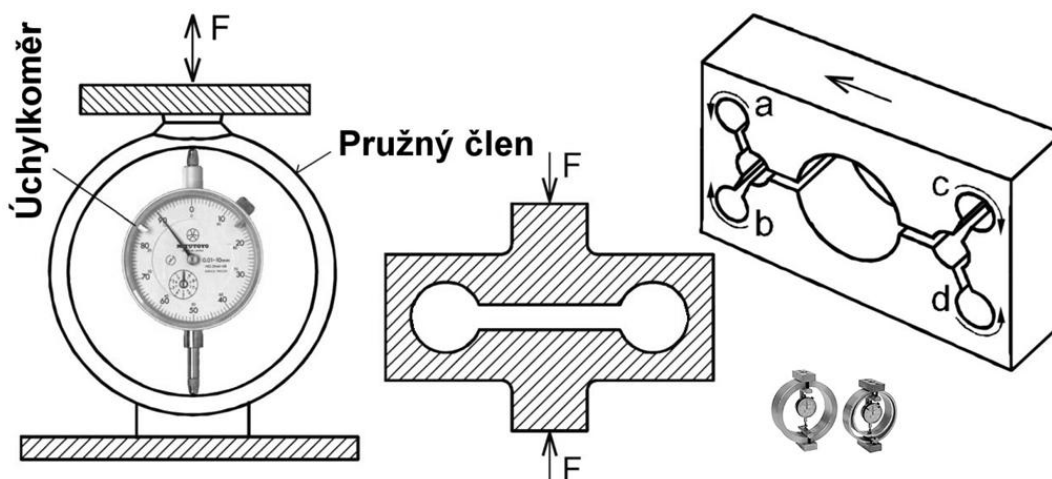
- vyvážení měřené síly známou gravitační silou tělesa dané hmotnosti,
- měření zrychlení tělesa známé hmotnosti, na které je působeno měřenou silou ($F = m \cdot a \Rightarrow a = F/m$),
- vyvážení měřené síly magnetickou silou,
- převedení síly na tlak kapaliny, příp. plynu – následné měření tlaku,
- působení síly na krystal – využití piezoelektrického jevu (kap. 1.3.2) [2].

1.3.1 Dynamometry

Dynamometry neboli snímače sil, jsou zařízení určená pro měření sil [2]. Jedná se o různé typy těchto zařízení, kdy každý je založen na jiném principu, který přináší své výhody i nevýhody. Dále je uvedena stručná charakteristika jednotlivých typů dynamometrů.

Mechanické

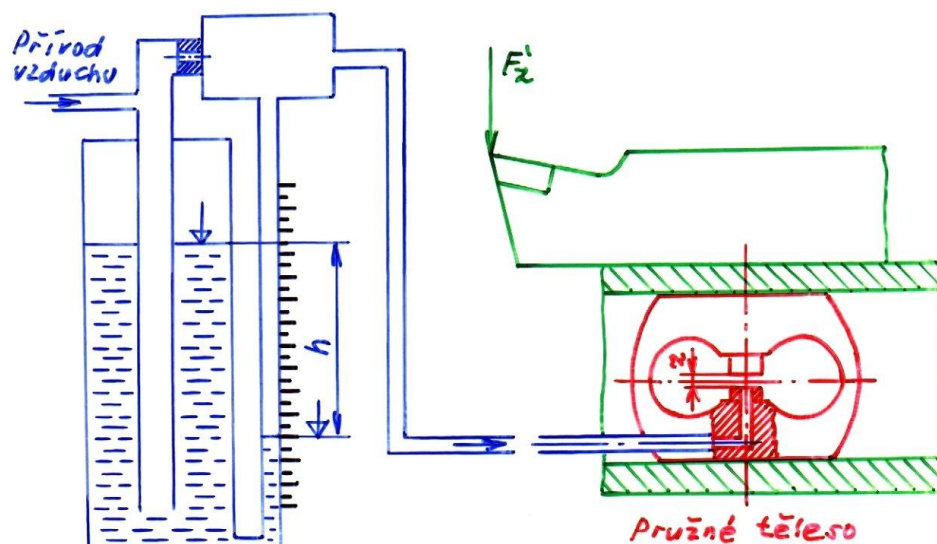
Mechanický dynamometr je jednoduchý typ snímače síly, jehož princip (obr. 1.6) je založen na elastické deformaci pružného členu. Tato deformace je přímo úměrná působící síle. Působící síla je odečítána číselníkovým úchylkoměrem. Výhodou je jednoduchost zařízení. Nevýhodou naopak možnost měřit pouze statické síly nebo omezený rozsah měření. Pružný člen se snadno deformuje, lze ho tedy přetížít, čímž dojde k jeho nevratné plastické deformaci [2].



Obr. 1.6 Mechanický dynamometr [2, 3]

Pneumatické

Princip dynamometru je zobrazen na obr. 1.7. Zatěžující síla, působící na pružné těleso, je vyhodnocena sledováním rozdílu výšek kapaliny v kapilárách [2].

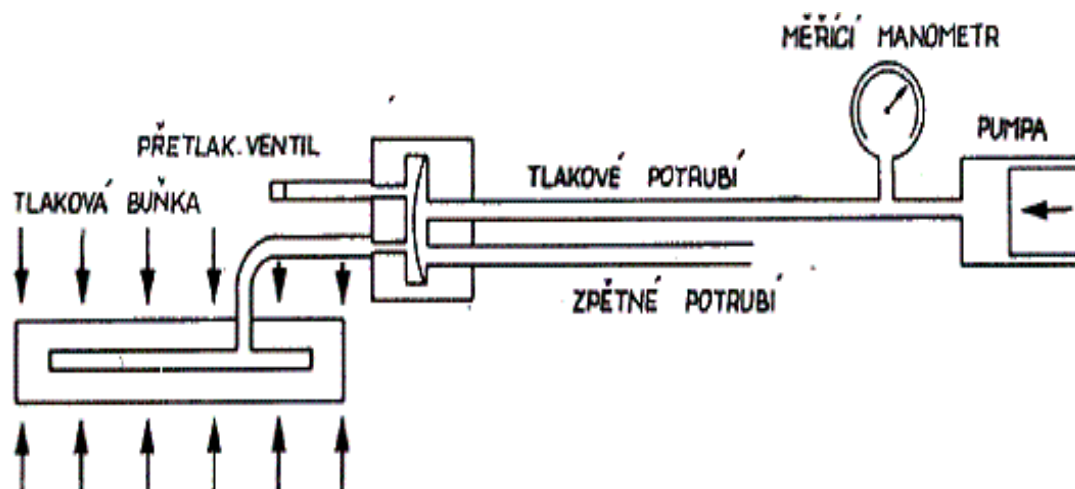


Obr. 1.7 Pneumatický dynamometr [2].

Hydraulické

Tato zařízení lze dělit dle svého provedení na několik níže uvedených typů.

- Ploché hydraulické tlakové buňky (obr. 1.8) – měřená síla působí na hydraulickou tlakovou podložku, která má tvar dutého disku. Tento je naplněn kapalinou, jejíž tlak uvnitř disku je měřen manometrem. Při tlakovém působení na buňku se zvyšuje tlak kapaliny, kterým je prohýbána membrána. Na membránu z druhé strany působí vyrovnávací tlak, přičemž jeho velikost je měřena a odpovídá hodnotě monitorovaného tlaku. Tento typ je využíván zejména v geologii a stavebnictví [4].



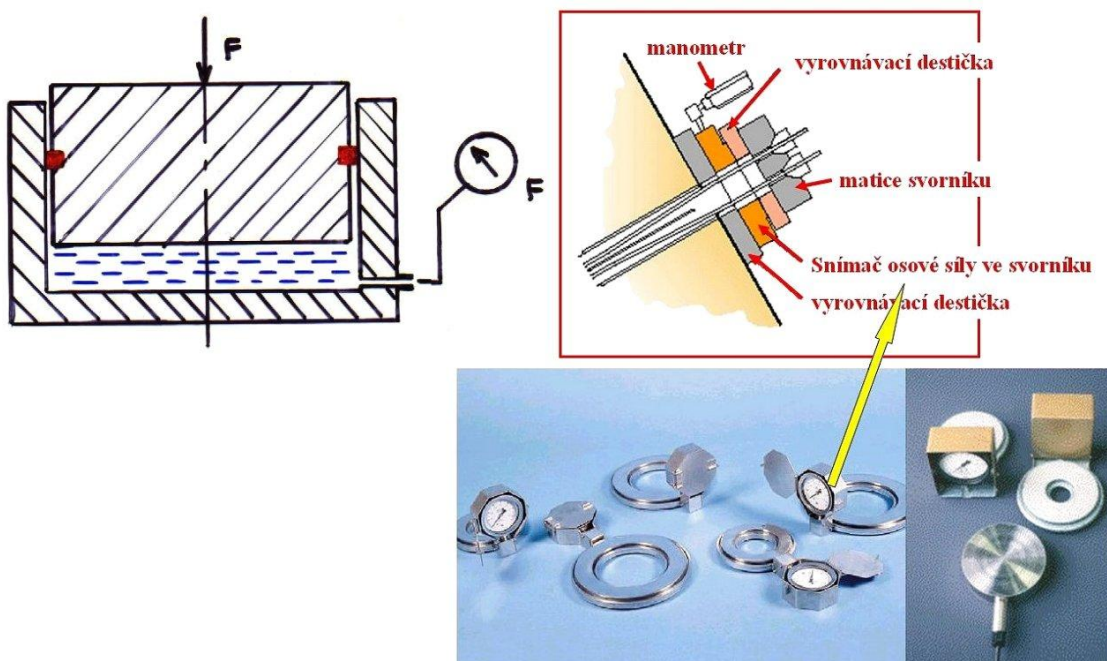
Obr. 1.8 Schéma hydraulického dynamometru s plochými tlakovými buňkami [4].

- Válcový dynamometr (obr. 1.9) – skládá se z válcového tělesa, které je naplněno odvzdušněným hydraulickým olejem. Působením vnějšího tlaku na válec dochází k nárůstu tlaku oleje uvnitř komory. Tento tlak je měřen manometrem a odpovídá vnějšímu silovému zatížení. Jeho použití je vhodné v geologii [4].



Obr. 1.9 Válcový hydraulický dynamometr [4].

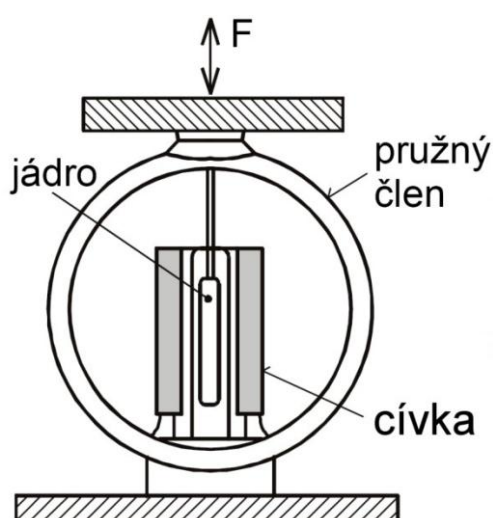
- Prstencový dynamometr – vhodný pro měření osových sil. Nejběžnější typ je složen z měřicí buňky ve tvaru mezikruží, která je naplněna kapalinou. Buňka je nasazena mezi dvě ocelové podložky na svorníkové tyči. Tyto podložky jsou použity pro eliminaci možných vlivů ohybových momentů. Pohyb dvou částí buňky vůči sobě, který je vyvolaný vnější zatěžující silou, způsobí změnu tlaku, jež je měřena manometrem [4]. Nevýhodou tohoto typu je problém těsnění mezi dvěma pohyblivými částmi mezikruží (viz. obr. 1.10) [2].



Obr. 1.10 Prstencový dynamometr [2].

Indukční (elektrické)

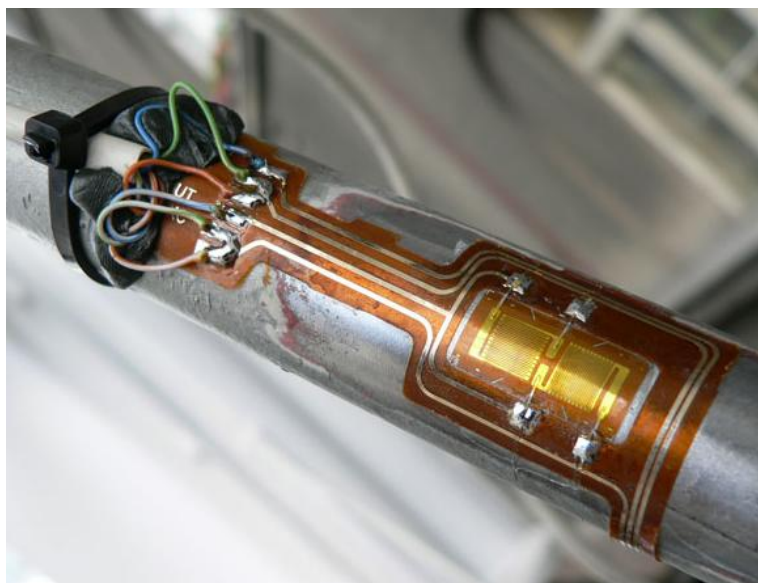
Principem indukčního dynamometru, nazývaného též elektrický, je změna indukčnosti cívky. I zde je využit deformační člen, jehož deformací dochází k posunu jádra v cívce a tím ke změně indukčnosti, která je měřena. Elektrické dynamometry mají své velké uplatnění v automobilovém průmyslu. V tomto případě je zařízení zkonstruováno tak, aby mohlo měřit krouticí moment [2, 5].



Obr. 1.11 Indukční dynamometr [2].

Tenzometrické

Tyto snímače jsou vhodné i pro měření dynamických sil. Síly jsou snímány za pomoci tenzometrů. Tenzometr je odporový drát nalepený na podložce (fólii). Tato podložka je přilepena na namáhané těleso. Při deformaci tělesa a tím i odporového drátu tenzometru, dochází ke změně elektrického odporu, který odpovídá dané hodnotě silového působení. Tyto snímače mají velký význam při měření v terénu, kde se používají např. k měření mostových konstrukcí (obr. 1.12) [2].



Obr. 1.12 Měření konstrukcí [6].

Vyráběna jsou i zařízení, konstrukčně řešená v kompaktním provedení např. pro měření tlaku. Příkladem je např. snímač síly typu 8524 firmy Burster zobrazen na obr. 1.13. Dle informací výrobce lze použít tento snímač jak v laboratorních podmínkách, tak i v průmyslovém prostředí. Lze jej využít pro měření statického i dynamického napětí nebo tlakových sil. V závislosti na verzi snímače lze měřit síly v rozsahu 0 – 500 kN [7].



Obr. 1.13 Tenzometrický snímač síly firmy Burster v kompaktním provedení [7].

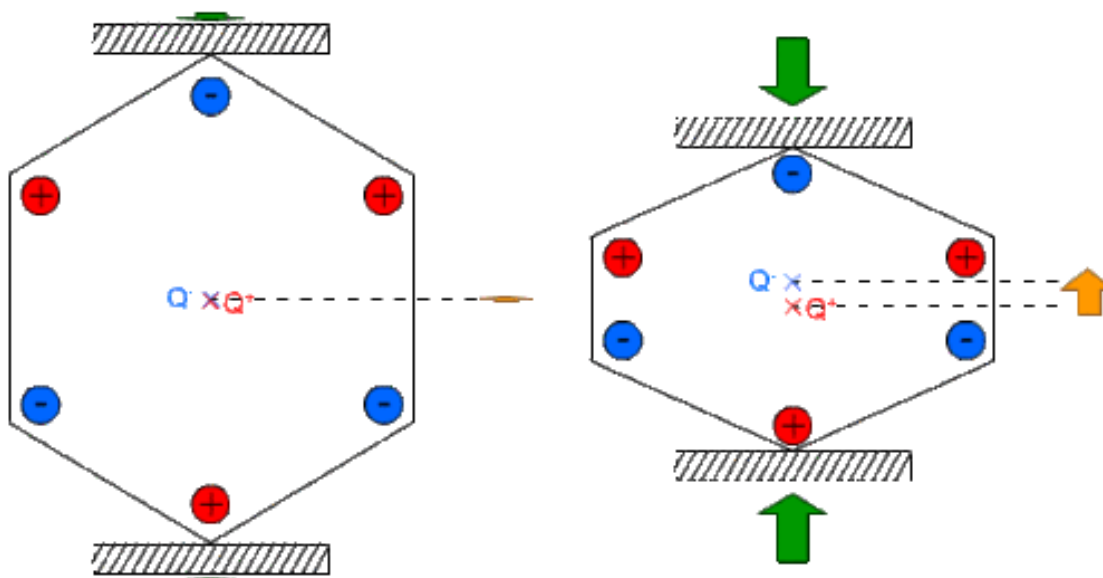
V oblasti obrábění mají zásadní význam piezoelektrické dynamometry. Tento typ snímače byl také využit při experimentu, který je zpracován v kap. 4. Z těchto důvodů je tomuto typu věnována následující kapitola 1.3.2.

1.3.2 Piezoelektrické dynamometry

Tyto snímače síly patří k nejrozšířenějším v oblasti měření řezných sil. Častokrát jsou považovány za nejkvalitnější zařízení. Ke snímání působící síly je využíváno znalostí piezoelektrického jevu.

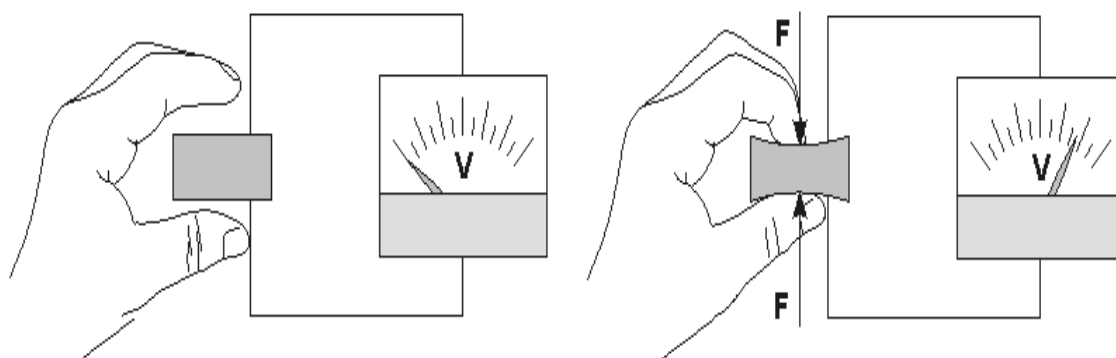
Piezoelektrický jev

Bratři Pierre a Jacques Currie poprvé pozorovali tento fyzikální jev roku 1880, kdy zjistili, že při stlačení krystalu se na jeho povrchu objevuje elektrický náboj [8].



Obr. 1.14 Mechanismus vzniku elektrické polarizace při deformaci [9].

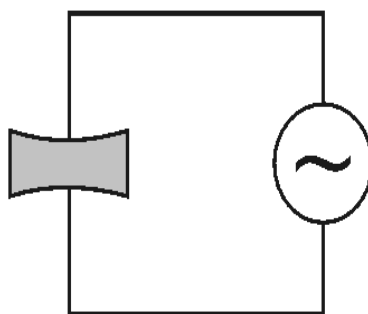
Elektrické pole u plyných, kapalných a pevných amorfních látek způsobuje posunutí nebo otočení molekul. V případě iontových krystalů tomu tak není, jelikož zde nelze oddělit jednotlivé molekuly. Při stlačení krystalu dochází k posunutí všech kladných iontů ve směru pole a naopak všech záporných pro směru pole. Tímto dojde k vychýlení elektrických těžišť záporných a kladných iontů, která jsou v klidovém, nezatíženém stavu totožná. Tento jev je nazýván „přímý piezoelektrický“. Tedy při mechanickém zatížení některých krystalů vznikají na jejich plochách elektrické náboje. Tento jev lze pozorovat jen u nesymetrických krystalů, kterými jsou např. krystaly baria nebo křemene. Měřené napětí bývá velmi malé. Při zatížení krystalu tlakem v řádu 10^4 Pa vzniká na protilehlých stěnách napětí v setinách V [10, 11].



Obr. 1.15 Přímý piezoelektrický jev – vznik napětí při deformaci krystalu [10].

Vedle přímého piezoelektrického jevu, který je popsán výše, existuje také nepřímý neboli obrácený piezoelektrický jev. Tomuto jevu se také říká elektrostrikce. Projevuje se vznikem deformace krystalu vystaveného elektrickému napětí. Vnější elektrické pole způsobuje posunutí iontů, z čehož plyne deformování krystalu. S rostoucím elektrickým polem vzrůstá i deformace, přičemž závislost na rozdíl od přímého jevu není lineární, nýbrž kvadratická. Stejně jako jev přímý, i tento může nastat pouze u krystalů nemajících střed symetrie [11].

Využitím velmi stálých kmitů krystalu lze elektrostrikcí například řídit elektrické kmity v rezonátorech, generátorech ultrazvuku nebo elektromechanických filtrech. Je možné dosahovat kmitočtových rozsahů 1 kHz – 200 MHz. V případě, že je pole časově periodicky proměnné s kmitočtem, odpovídajícím kmitočtu vlastních elastických kmitů krystalu, dochází ke vzniku mechanické rezonance [11].

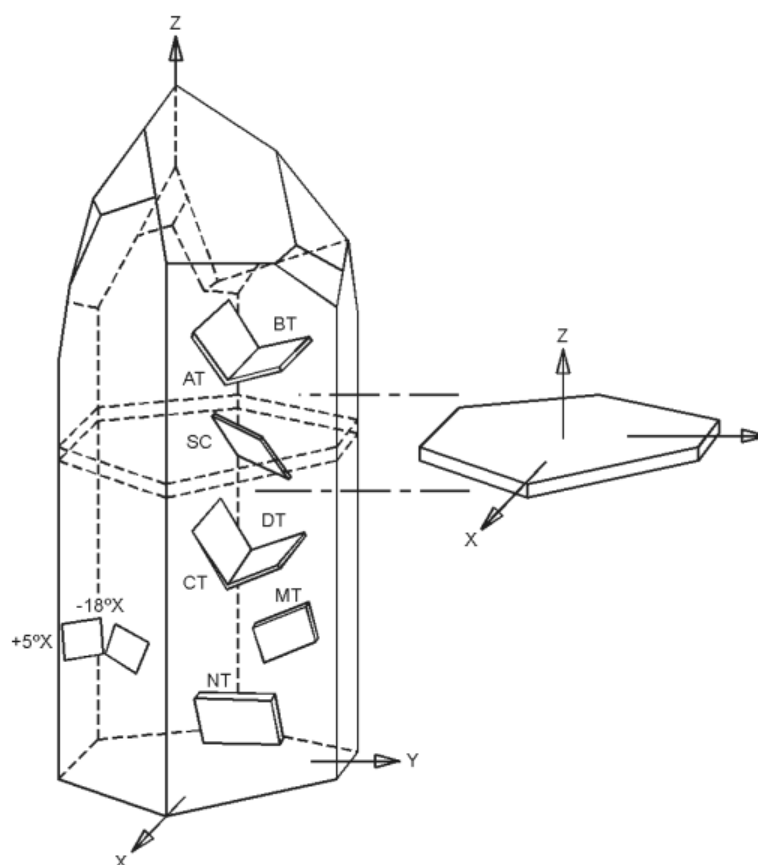


Obr. 1.16 Obrácený piezoelektrický jev – elektrostrikce [10].

Krystal křemene SiO_2

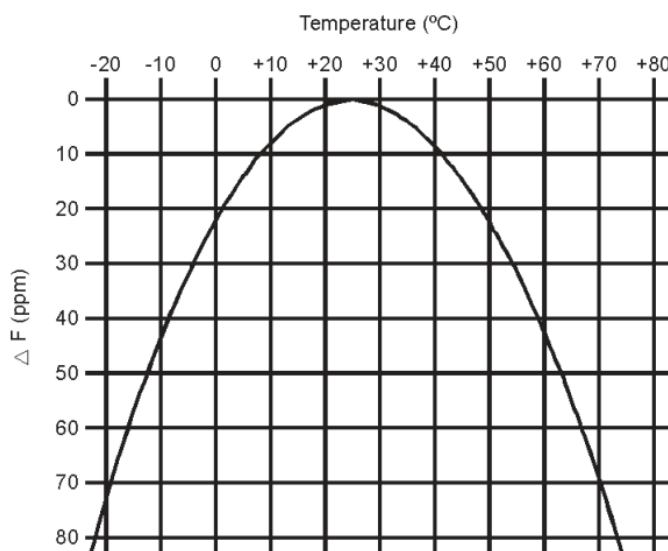
V piezoelektrických snímačích síly je často využíván krystal křemene. Deformace ploch krystalu umožňuje jeho vibraci s konkrétní rezonanční frekvencí. Opačně při působení střídavého napětí dochází ke vzniku stejného typu mechanických vibrací. Křemen je jeden z několika forem oxidu křemičitého (SiO_2), který se nachází v přírodě, nejčastěji na území Brazílie. Těžba přírodního křemene je velmi drahá, proto se v průmyslu využívá převážně jen uměle kultivovaných krystalů, jejichž výroba běžně trvá 30 – 45 dní a často jsou vyráběny ve tvaru tenkých plátek [12].

Výstupní frekvence kmitů je mimo jiné závislá na teplotě. Vlastnosti závislosti frekvence a teploty krystalu křemene jsou primárně dány úhlem orientace, pod kterým jsou z tělesa krystalu řezány plátky křemene. Tyto charakteristiky jsou závislé na referenčních směrech uvnitř krystalu, které jsou vztaženy k osám. V krystalu rozlišujeme tři osy, osu x, y a z [12].



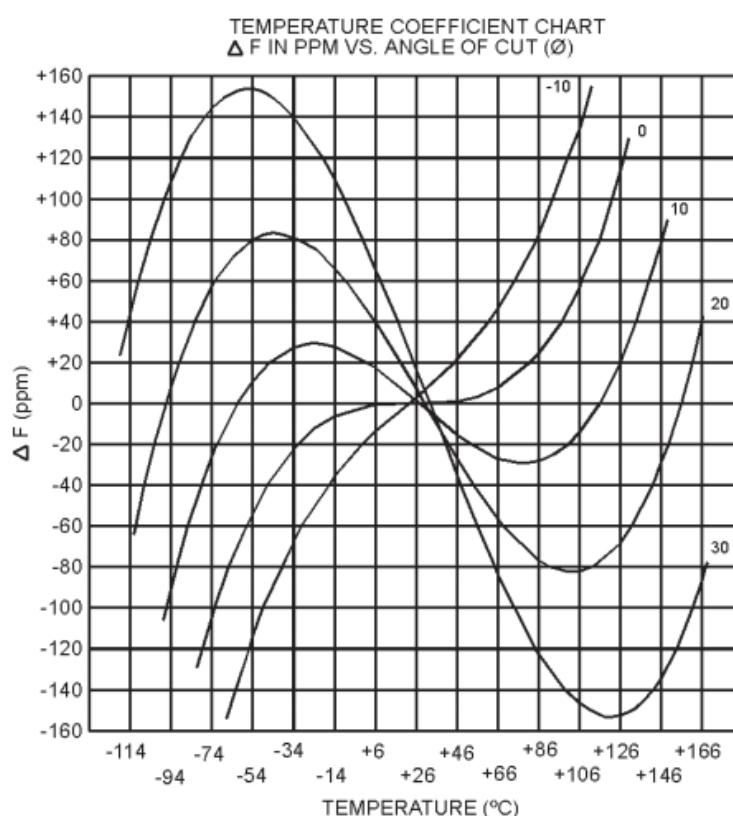
Obr. 1.17 Ideální krystal křemene s příčným výřezem [12].

Ideální krystal (obr. 1.17) by byl šestistěnný hranol, s šesti fazetami na konci každé ze stěn, přičemž jeho příčný výřez je znázorněn na obr. 1.17. Osa z je nazývána „optickou osou“. Opakuje svoje fyzikální vlastnosti po 120° při rotaci krystalu kolem osy z. Osa x je totožná s přímkou půlící vrcholový úhel mezi dvěma sousedními stěnami a kolmá k ose z. Tato se také nazývá „elektrická osa“. Při silovém působení dochází k posunutí těžišť kladných a záporných iontů právě v tomto směru. Element XT-cut, mimo jiné často v dynamometrech používaný pro snímání sil ve vertikální ose, je výřez z hranolu krystalu, který je kolmý k jeho elektrické ose. Závislost jeho frekvence kmitů a teploty je znázorněna na obr. 1.18 [12].

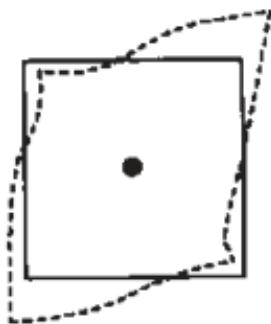


Obr. 1.18 Závislost změny frekvence na teplotě u XT-cut krystalu [12].

Osa y, známá také jako „mechanická osa“ je kolmá ke stěně krystalu a ose x. Většina výřezů osy y vibruje tzv. „smykovým způsobem“. Smyk stěny (obr. 1.20) využíván pro nižší frekvence, kdy se jedná o CT a DT-cut výřezy (viz. obr. 1.17) a smyk šířky krystalu pro vyšší frekvence, kdy jde o výřezy AT a BT-cut. Díky vynikajícím frekvenčně-teplotním charakteristikám je nejpopulárnější ze skupiny výřezů osy y AT-cut krystal. Je vyřezán z tělesa křemene přibližně pod úhlem $35^{\circ} 15'$ od osy z [12].



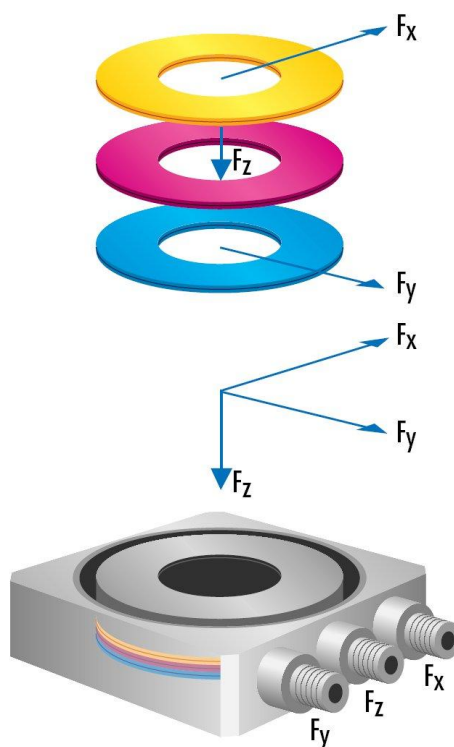
Obr. 1.19 Závislost změny frekvence na teplotě při různých úhlech řezu AT-cut [12].



Obr. 1.20 Smyk stěny [12].

Dynamometry

Stejně jako u dříve zmíněných snímačů lze i v tomto případě měřit různé složky síly. Pro oblast obrábění jsou obvykle vyráběny dynamometry umožňující snímat síly ve třech osách nebo krouticí moment. Dále jsou vytvářeny různé kombinace pro měření např. síly v jedné ose a krouticího momentu kolem této osy. Jak již bylo výše zmíněno, snímače většinou využívají krystalu křemene. Tento je v přesně definovaných směrech nařezán na destičky (obvykle X-cut), často ve tvaru mezikruží (obr. 1.21), přičemž každá umožňuje snímání síly v daném směru [2].



Obr. 1.21 Pláty krystalů pro snímání sil ve třech směrech [2].

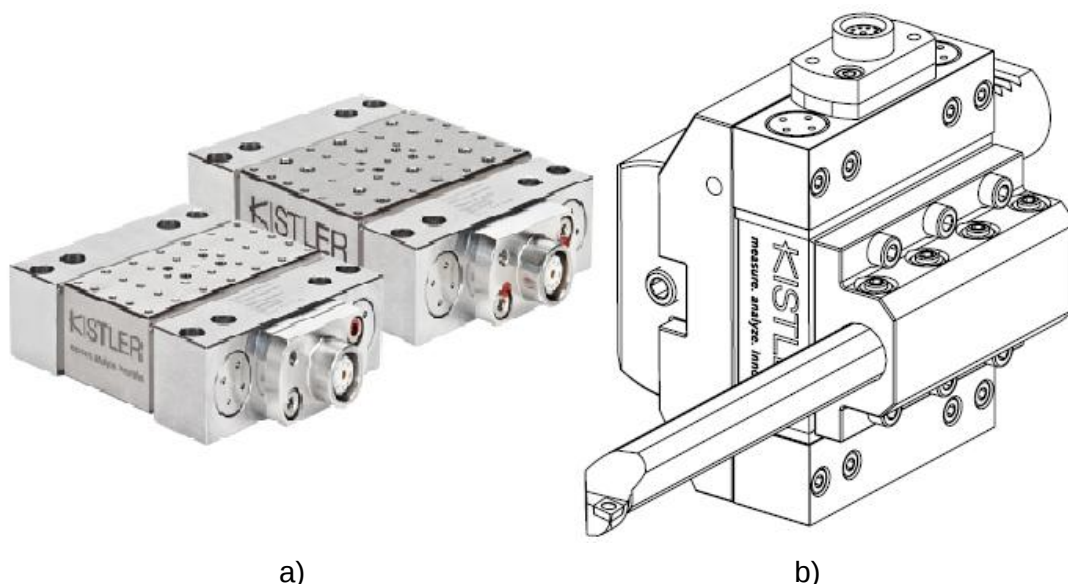
Významným výrobcem těchto dynamometrů je firma Kistler Group. V oblasti senzorů sil vyrábí velkou škálu různých modifikací piezoelektrických dynamometrů, které jsou uzpůsobeny pro specifické účely. Při prováděném experimentu, který je v dalších kapitolách zpracován, byl použit právě jeden z dynamometrů tohoto výrobce. Jedná se o zařízení, patřící do skupiny snímačů pro měření řezných sil. Níže je uvedena charakteristika některých z této skupiny.

- MiniDyn – multikomponentní deskový dynamometr – určen pro měření tří ortogonálních složek síly. Vyznačuje se vysokou citlivostí a umožňuje měření extrémně malých sil. Jeho modulární systém lze sestavit tak, aby vyhovoval měření sil při soustružení. Výhodné je zejména jeho použití při superfinišování nebo obrábění křehkých materiálů. Rozsah měření dynamometru v modulární sestavě pro snímání sil při soustružení je uveden v tab. 1.1 [13].

Tab. 1.1 Rozsah měření modulárního systému dynamometru Kistler 9119AA2 [13].

Měřená složka	Maximální přípustný rozsah [kN]	Kalibrovaný rozsah* [kN]
Fx, Fz	-2 ; 2	0 ; 2
Fy	-3 ; 3	0 ; 3

* Dynamometr Typ 9119AA2 je kalibrovaný s upnutým strojním adaptérem Typ 9119AB30S, nožovým držákem Typ 9119AE16 a maketou nástroje s vyložení 25 mm.



a) typ 9119AA2, b) modulární sestava pro soustružení

Obr. 1.22 a) Kistler MiniDyn [13].

- Multikomponentní deskový dynamometr – Typ 9253B – deskový snímač síly určený pro měření sil i momentů. Tento typ je složen ze čtyř měřicích prvků, jednotlivě obsahujících snímač síly. Snímač síly je složen z prstenců křemene, které jsou do uložení senzoru vloženy mezi dvěma ocelovými deskami. Dva z křemenných prstenců, které jsou citlivé na smyk, snímají dílčí složky Fx a Fy. Zatímco třetí křemenný prstenec, citlivý na tlak, měří složku Fz. Celkem dvanáct elektrických signálů (tři složky ze všech čtyř měřicích prvků) je přivedeno na sumární box, kde výstupem jsou jednotlivé měřené výsledné silové složky Fx, Fy a Fz, zatímco momenty Mx, My a Mz jsou na základě těchto tří složek síly dopočítány. Dynamometr je dodáván v několika modulárních verzích, přičemž právě daná sestava určuje, které složky lze měřit. Resp. zda lze mít na výstupu i dopočítané krouticí momenty [14].



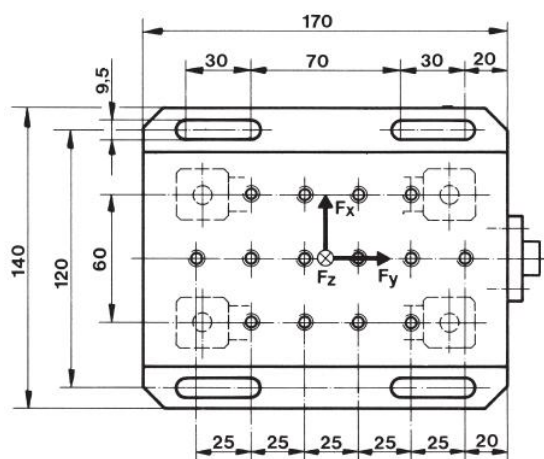
Obr. 1.23 Kistler Multikomponent Force Plate – Typ 9253B [14].

Dynamometr je dle výrobce vhodný pro měření dynamických i kvazistatických ortogonálních složek síly, pro měření řezných sil při frézování a broušení na větších strojích a obráběcích centrech nebo snímání posuvových sil na loži stroje. Vhodný je například i pro měření dopadových sil. Následující tab. 1.2 zobrazuje rozsahové možnosti měření u všech tří modulárních typů tohoto zařízení [14].

Tab. 1.2 Rozsah měření modulárních sestav dynamometru Kistler 9253B [14].

	Složka	Typ 11/B12	Typ 21/22	Typ 23
Rozsah [kN]	F_x, F_y	-10 ; 10	-15 ; 15	-12 ; 12
	F_z	-10 ; 20	-15 ; 30	-12 ; 25
Kalibrovaný dílčí rozsah [kN]	F_x, F_y	0 ; 1	0 ; 1,5	0 ; 1,2
	F_z	0 ; 2	0 ; 3	0 ; 2,5

- Multikomponentní dynamometr – Typ 9257B – tento typ dynamometru firmy Kistler Group byl použit pro experiment v této práci. Jedná se o tříkomponentní snímač, též pro měření tří ortogonálních složek síly. Tento typ je charakteristický svou vysokou tuhostí a díky jeho vysoké rozlišovací schopnosti umožňuje měřit velmi malé silové změny i při měření vysokých silových zatížení [15].



Obr. 1.24 Kistler Multikomponent Dynamometr – Typ 9257B [15].

I tento je sestaven ze čtyř tří-komponentních senzorů, které jsou umístěny mezi základnou a vrchní částí. V tomto případě každý z těchto senzorů obsahuje tři páry desek krystalu křemene. Jeden citlivý na tlak ve směru osy Z a další dva reagující na smyk ve směru os x a y. Celkem lze získat šest výstupů, tři složky síly a tři krouticí momenty. V našem případě sestava měřila pouze složky síly F_x , F_y a F_z . Možné měřicí rozsahy složek jsou uvedeny v tab. 1.3 [15].

Tab. 1.3 Rozsah měření multikomponentního dynamometru Kistler 9257B [15].

Měřená složka	Rozsah [kN]	Kalibrovaný dílčí rozsah 1 [N]	Kalibrovaný dílčí rozsah 2 [kN]
F_x, F_y	-5 ; 5 ¹⁾	0 ; 500	0 ; 50
F_z	-5 ; 5 ¹⁾	0 ; 1000	0 ; 100
F_z pro F_x a $F_y \leq 0,5 F_z$	-5 ; 10 ²⁾	-	-

¹⁾ Působení síly uvnitř a max. 25 mm nad horní plochou.

²⁾ Rozsah pro soustružení, působení síly v bodě A (viz. příloha 1).

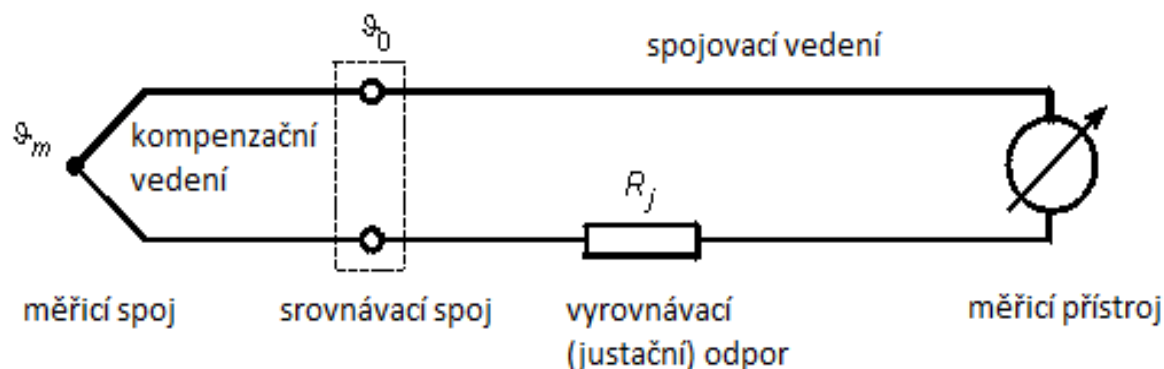
Výhodami tohoto typu je např. též možnost měřit dynamické i kvazistatické složky síly. Je vhodný pro měření sil při soustružení, frézování, broušení apod. S využitím kalibrovaných dílčích rozsahů měření umožňuje vysoká citlivost přesné měření na malých nástrojích i při broušení. Rozměry dynamometru a další technická data jsou uvedena v příloze 1 [15].

1.4 Měření teploty a tepla

Při obrábění dochází k přeměně téměř veškeré práce řezání v teplo, které negativně ovlivňuje řezné vlastnosti nástroje, mechanické vlastnosti obráběného materiálu apod. Proto i zde mají experimentální metody využití [2].

Termočlánky

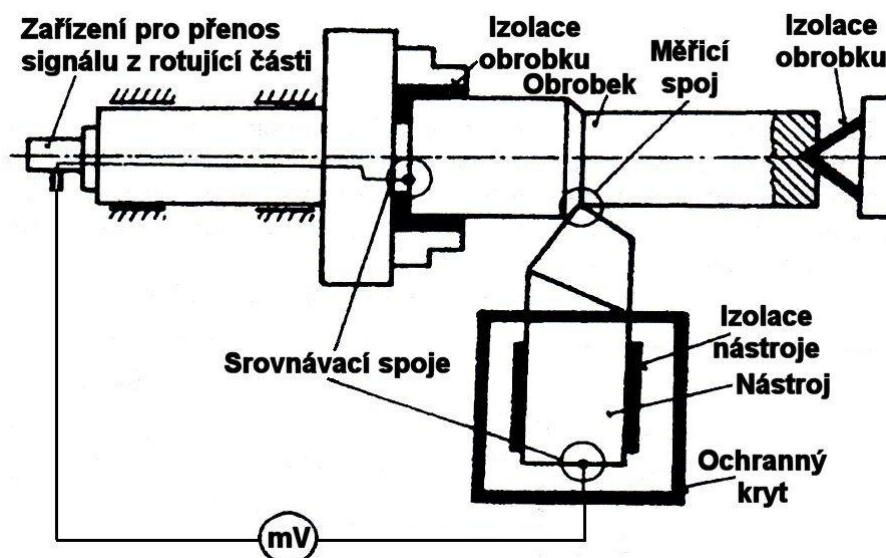
Jednou z možností jak měřit teplotu při obrábění je využití termočlánků. Termočlánky využívají znalosti termoelektrického Seebeckova jevu. Seebeckův jev se projevuje vznikem napětí, pokud existuje teplotní rozdíl mezi dvěma kovy nebo polovodiči spojenými do uzavřeného obvodu. Princip termočlánku je na obr. 1.25 [2].



Obr. 1.25 Princip termočlánku [2].

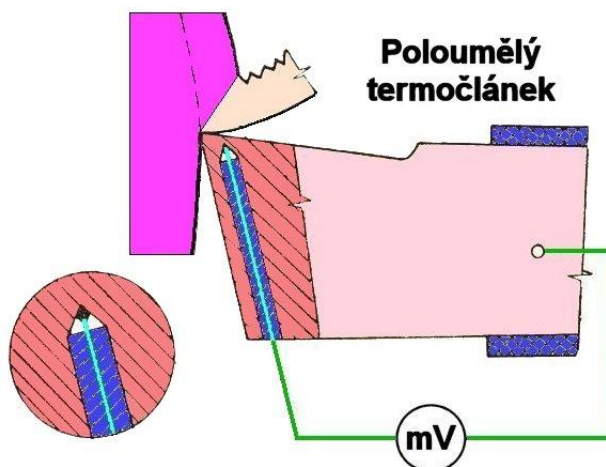
Existuje několik druhů termočlánků, které jsou při obrábění využívány. Následně jsou tyto pro použití při soustružení zobrazeny a popsány.

- Přirozený termočlánek (obr. 1.26) – měří střední teplotu všech stykových míst mezi nástrojem a obrobkem. Umožňuje zachycovat okamžité změny teploty řezání, proto je využitelný nejen při experimentálních činnostech, ale může sloužit i jako jeden ze snímačů obráběcího procesu u strojů s adaptivním řízením. Měřicí spoj je umístěn v místech, kde dochází ke styku obrobku s nástrojem, přičemž nástroj a obrodek jsou vzájemně elektricky izolovány. Nevýhodou toho typu je, že pro každou kombinaci materiálu nástroje a obrobku musí být stanovena cejchovní křivka [16].



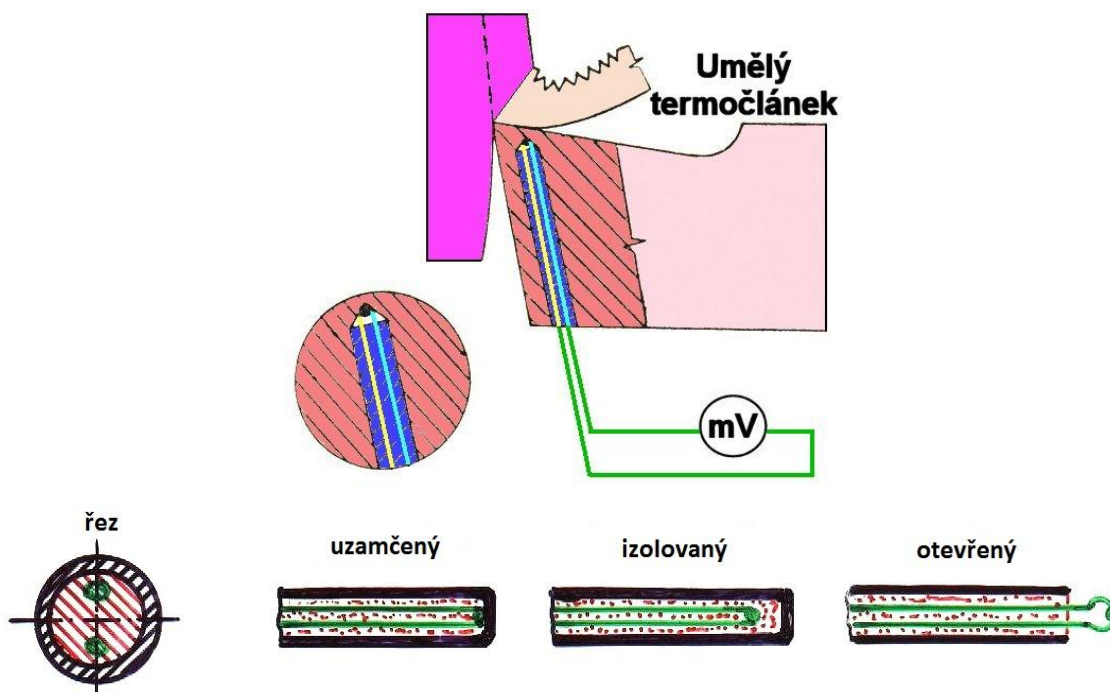
Obr. 1.26 Přirozený termočlánek [2].

- Poloumělý termočlánek (obr. 1.27) – jeden z kovových materiálů měřicího spoje reprezentuje materiál nástroje, stejně jako v případě přirozeného termočlánku. Druhým zde ovšem není obrodek, ale zvolený kov v podobě tenkého vodiče. Tento je umístěn v těle nástroje tak, aby byl co nejbližší místu s největší teplotou [2].



Obr. 1.27 Poloumělý termočlánek [16].

- Umělý termočlánek (obr. 1.28) – oba vodiče měřicího spoje jsou uměle umístěny v těle nástroje. V tomto případě může být zkonstruován jako uzamčený, izolovaný nebo otevřený. I zde je snaha umístit měřicí spoj co nejblíže k místu s největší teplotou [2].



Obr. 1.28 Umělý termočlánek [2, 16].

Pyrometry

Pyrometry jsou bezdotykové snímače teploty, které určují teplotu z teplotního záření vydávaného měřeným tělesem. Velké využití mají při měření vysokých teplot, např. v metalurgii, kdy nelze použít jiná metoda měření [2]. Rozlišujeme několik typů pyrometrů, které jsou níže popsány.

- Radiační – pro určení teploty tělesa využívá širokého rozsahu vlnových délek měřených v určitém směru [2].
- Fotoelektrické – měří záření v úzkém pásmu vlnových délek. Toto pásmo vymezuje použitá optika, filtry a spektrální citlivost snímačů [2].
- Spektrální – je snímáno tepelné záření odpovídající pouze jedné vlnové délce elektromagnetického spektra. Intenzita přijatého záření je porovnávána s intenzitou záření pomocného srovnávacího zdroje [17].
- Barvové – využívají oblast viditelného záření, přičemž k měření teploty využívají tzv. barevnou teplotu (teplotu chromatičnosti). Světlo, které má určitou barevnou teplotu, má barvu tepelného záření vydávaného černým tělesem, zahřátým na tuto teplotu. Barevná teplota tedy charakterizuje spektrum bílého světla [18].

Termovize

Ke snímání povrchové teploty tělesa je využíváno speciální kamery, jež snímá teplotu v mnoha bodech současně. Z těchto bodů je rekonstruován obraz rozložení teplot, který je poté zobrazován na monitoru v barevném provedení [17].

2 CHARAKTERISTIKA TECHNOLOGIE FRÉZOVÁNÍ

Frézování je metoda třískového obrábění, kdy materiál obrobku je odebírán břity rotujícího nástroje. Posuv nejčastěji koná obrobek, většinou ve směru kolmém k ose nástroje. Každý zub frézy odřezává krátké třísky proměnné tloušťky, proto se jedná o přerušovaný řezný proces. Dle použitého nástroje lze rozlišovat frézování válcové, tj. obvodem nástroje a frézování čelem nástroje, nazývané čelní [16].

Hlavní pohyb koná fréza, přičemž tento je definován řeznou rychlostí v_c [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$] dle vztahu (1).

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (1)$$

kde: n [min^{-1}] – otáčky frézy,

D [mm] – průměr frézy.

Vedlejší pohyb, většinou přímočarý, který koná obrobek, je závislý na druhu frézy. Je definován posuvovou rychlostí v_f [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$] dle vztahu (2).

$$v_f = \frac{f_z \cdot z \cdot n}{1000} \quad (2)$$

kde: f_z [mm] – posuv na zub,

z [-] – počet zubů,

n [min^{-1}] – otáčky frézy.

Dle kinematiky procesu se frézování rozděluje na nesousledné (protisměrné, nesousměrné) a sousledné (sousměrné). V následujících podkapitolách jsou dané typy dále přiblíženy [16].

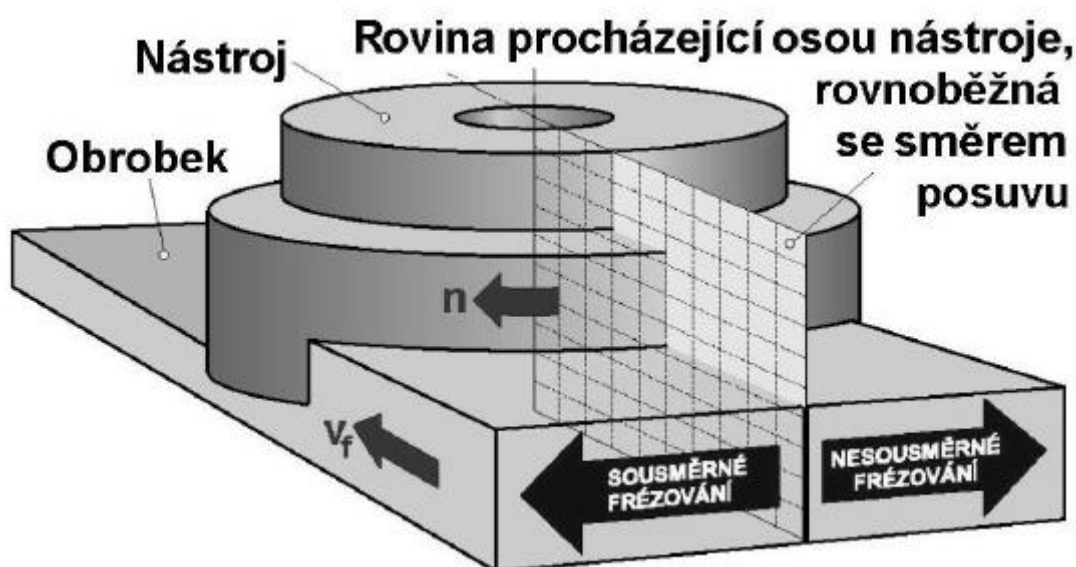
2.1 Nesousledné frézování

Pokud je smysl rotace proti směru posuvu obrobku, jedná se o nesousledné frézování. Vznik obrobené plochy probíhá při vnikání nástroje do obrobku. Řezná síla působí ve směru, kdy odtahuje obrobek od stolu stroje. Výhodami tohoto způsobu je např. menší opotřebení šroubu a matic, není třeba vymezení vřutů mezi posuvovým šroubem a maticemi stolu [16].

2.2 Sousledné frézování

Smysl rotace při sousledném frézování je ve směru posuvu obrobku. Obrobená plocha je vytvářena když zub vychází ze záběru. Řezné síly při sousledném frézování působí obvykle směrem proti stolu stroje. Výhodou sousledného frézování je např. vyšší trvanlivost břitů, díky které je umožněno použití vyšších řezných rychlostí a posuvů, menší potřebný řezný výkon, menší sklon ke kmitání nebo menší drsnost obrobeného povrchu [16].

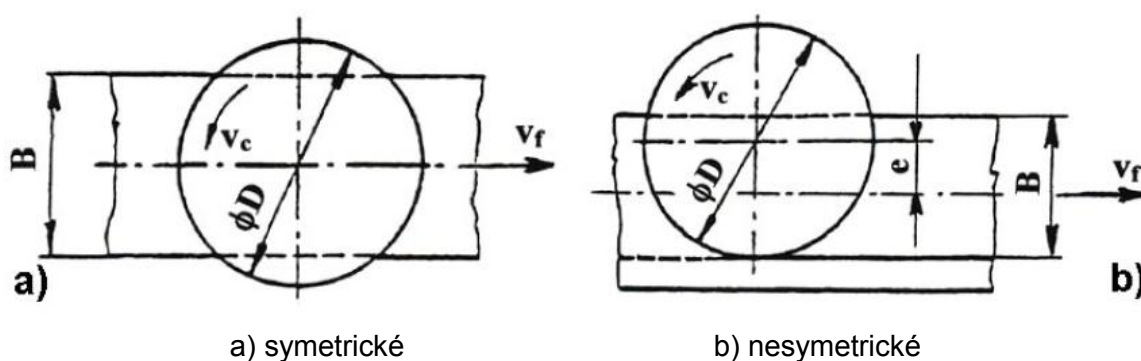
Čelní sousledné a nesousledné frézování je obr. 2.1.



Obr. 2.1 Čelní frézování [16].

2.3 Nesymetrické a symetrické frézování

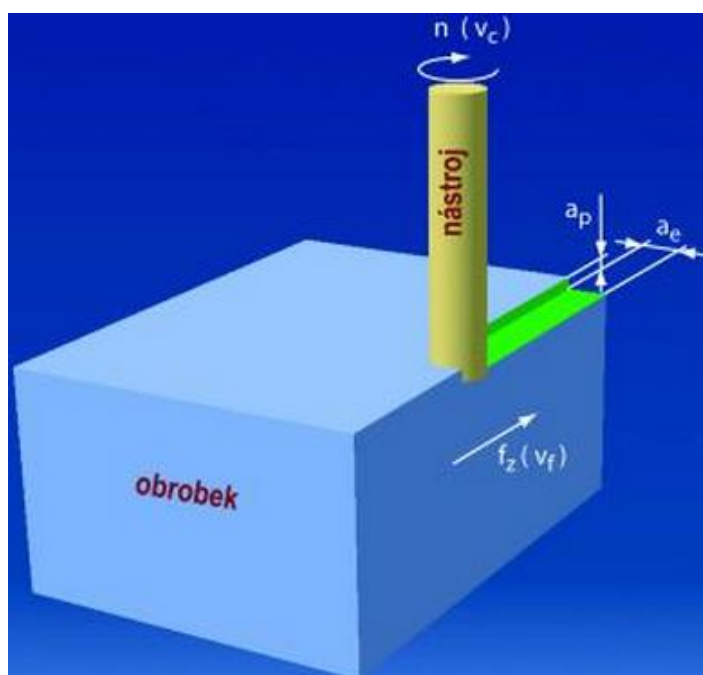
U čelního frézování jsou používány frézy s břity vytvořenými na obvodě i čele nástroje. Dle polohy osy frézy vzhledem k frézované ploše lze rozlišit frézování na symetrické a nesymetrické (viz. obr. 2.2). Při symetrickém frézování osa nástroje prochází středem frézované plochy, kdežto u nesymetrického je mimo střed [16].



Obr. 2.2 Čelní frézování [16].

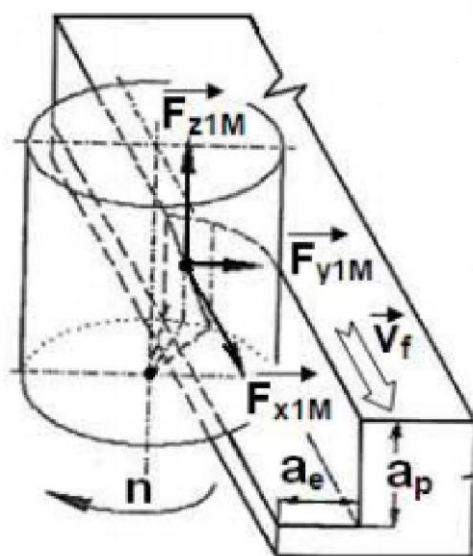
2.4 Použitý způsob frézování při experimentu

Experimentální část, kdy je uplatňována technologie frézování, využívá ve všech částech stejným způsob. Dle firmy Frentech Aerospace s.r.o. bylo frézováno sousledným způsobem, čelní válcovou frézou. Tento způsob je pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů, mezi něž patří např. Ti, výhodnější, než nesousledný. Schematické znázornění způsobu obrábění, použitého při testech je na obr. 2.3.



Obr. 2.3 Čelní sousledné frézování [19].

Vyhodnocení experimentu pracuje s měřenými silami, působících v jednotlivých osách. Schematické zobrazení nástroje a obrobku při daném čelním válcovém frézování je na obr. 2.4.



Obr. 2.4 Silové zatížení zubu frézy při čelním frézování (podle orientace snímače) [20].

Obráběcí metodu frézování by bylo možné charakterizovat množstvím dalších známých informací, přičemž to by vyžadovalo značný prostor. Pro podstatu experimentu jsou dostačující uvedené informace, jež byly sepsány v kap. 2, proto zde již dále není uvedena širší charakteristika této problematiky.

3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY FIRMY FRENTech AEROSPACE S.R.O.

Firma Frentech Aerospace s.r.o. je ryze českou společností se sídlem v Brně. Založena byla v roce 1994, kdy vystupovala pod názvem Frencen Brno s.r.o. V současné době funguje ve výrobní hale o rozloze 2000 m². K dispozici má klimatizovanou kontrolní místo včetně bezprašného prostoru k čisté montáži [21].



Obr. 3.1 Frentech Aerospace s.r.o – sídlo firmy

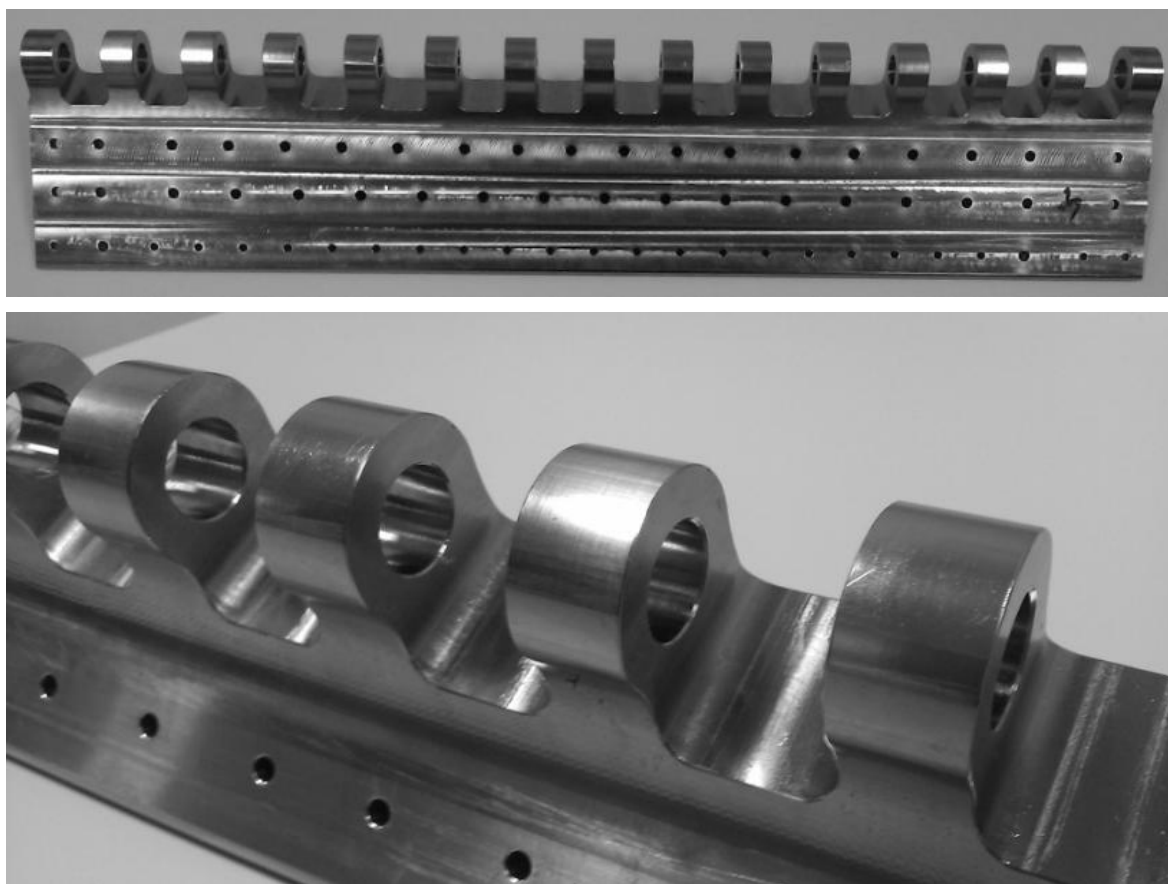
Produkce byla zpočátku orientována na obor lékařské techniky, mikroelektroniky a výrobu speciálních strojů včetně dodávek náhradních dílů. Dále v roce 1997 firma pracovala na první zakázce pro letecký průmysl. Jednalo se o spolupráci s leteckou společností Airbus. Následně společnost masivně investovala do moderních technologií a rychle v tomto oboru zvyšovala své Know-How [21].

Roku 2006 byla ustanovena skupina firem Frentech Aerospace s.r.o. a Frentech Investments s.r.o. Tyto jsou ze 100% vlastněny holdingovou společností Aerospace Systems s.r.o. Od tohoto data také probíhá další rozvoj společnosti, kdy došlo k rozšíření původní výrobní plochy z 1000 m² na 2400 m². K tomu také v roce 2009 přibýlo nových 400 m² montážních prostor včetně administrativní budovy. V roce 2012 byl instalován čistý prostor o rozloze přibližně 80 m² (clean room) s parametrem 10 000 a termální komora pro teploty -180 °C až 200 °C [21].

Tato firma spolupracující se zákazníky vyžadujícími Hi-Tech produkty je dnes kvalifikovaným dodavatelem především pro letecký a vesmírný průmysl, mikroelektroniku, lékařskou techniku, vakuovou a přístrojovou techniku, mikrovlnné radarové a rádiové systémy. Firma se podílí na dodávkách pro projekty ESO (European Organization for Astronomical Research in the Southern Hemisphere), ESA (European Space Agency). Zároveň je držitelem certifikátů ISO9001:2008, AS 9100 – C, ISO14001:2004 a QSF – A (Premium Aerotec). Též má zaveden systém managementu bezpečnosti a ochrany zdraví při práci podle: OHSAS 18001:2007 [21].

3.1 Problematika výroby závěsu pantu

Jednou z vyráběných součástí pro letecký průmysl je závěs pantu (obr. 3.2), který slouží k zajištění pohybu a upevnění nákladových dveří velkých letadel. Na tento díl jsou kladeny velké nároky na přesnost, především otvoru, který prochází všemi oky po celé délce závěsu.



Obr. 3.2 Závěs pantu.

Dle informací od Ing. Valáška byla tato součást původně vyráběna z plného materiálu. Při obrábění této slitiny nedocházelo k problémům. Jedná se o titanovou slitinu Ti55531, jejíž analýza je zpracována v kap. 4.1.2. Později ovšem byl zadavatelem dodáván jiný polotovár. Jedná se o tažený polotovár ze slitiny titanu Ti64, jehož analýza je v kap. 4.1.1. Z materiálového hlediska je obrábění tohoto polotovarů výhodnější, jelikož nedochází k velkému odpadu v porovnání s obráběním do plného materiálu. Ovšem z hlediska obrábění, je ve firmě Frentech Aerospace s.r.o. pozorováno vyšší opotřebení nástrojů v porovnání s předchozím materiálem. Zhoršené vlastnosti obráběcího procesu jsou pozorovány především při frézování, kdy dochází k odebírání povrchové vrstvy materiálu. Tato je též samostatně analyzovaná v kap. 4.1.1, zobrazená na obr. 4.7.

Experiment této práce měří silová zatížení při použití několika variant nástrojů a upínačů, které jsou v současnosti používány při obráběním taženého polotovarů ze slitiny Ti55531. Dále pak sleduje silová zatížení nástrojů při frézování obou materiálů.

4 EXPERIMENT – FRÉZOVÁNÍ TITANOVÝCH SLITIN

Experimentální část práce je založena na identifikaci problému řešeného firmou Frentech Aerospace s.r.o., popsaného výše v kap. 3.1. První části experimentu se zabývá analýzou obou frézovaných materiálů, pro přesné určení struktury a chemického složení. V následující části je provedeno měření sil při frézování těchto dvou slitin, vyráběných odlišnými způsoby. Závěrečná část pracuje s naměřenými daty a vyvozuje závěry v korespondenci se získanými informacemi o materiálech.

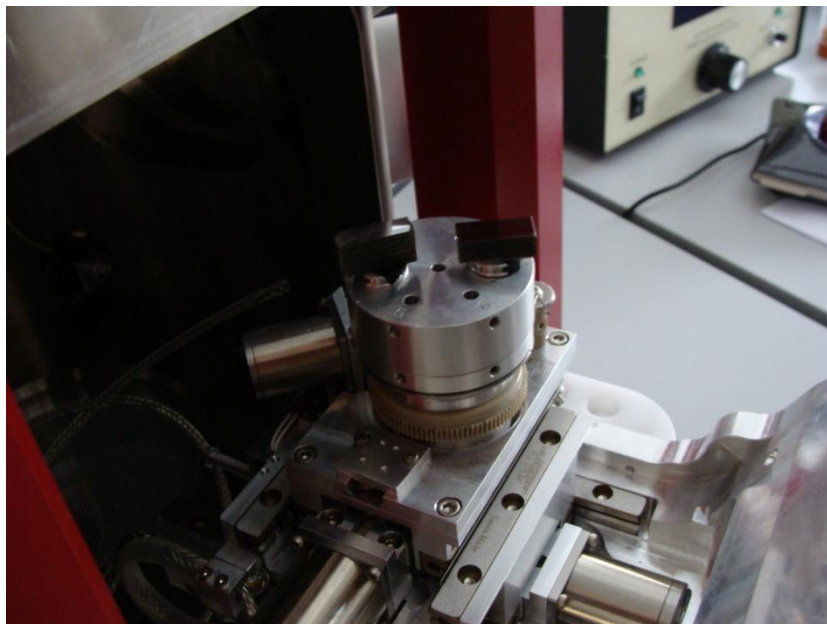
4.1 Metalografický rozbor frézovaných materiálů

Jak již bylo zmíněno v kap. 3.1, závěs je vyráběn ze dvou materiálů. Každý z nich vykazuje jiné vlastnosti, mající mimo jiné vliv na opotřebení nástrojů. K těmto materiálům nebylo možné získat bližší specifikace na základě dokumentací, které by byly pro tento účel potřebné. Experiment práce se především zabývá porovnáním silových zatížení při frézování jednotlivých materiálů, nicméně je vhodné mít jisté informace o konkrétních frézovaných materiálech. Z důvodů malého množství informací o materiálech byla ve spolupráci s firmou TESCANA, a.s. provedena analýza obou materiálů. Některé vzorky pro analýzu byly připraveny firmou TESCANA, a.s. ve spolupráci s Ústavem fyziky materiálů AV ČR, a jiné na Ústavu materiálových věd a inženýrství FSI – VUT Brno. Pro samotné pozorování, které proběhlo ve firmě TESCANA, a.s. byl použit autoemisní elektronový rastrovací mikroskop MIRA3 LMU. Tento mikroskop je na obr. 4.1 (obr. poskytnut výrobcem).



Obr. 4.1 Autoemisní elektronový rastrovací mikroskop MIRA3 LMU (obr. poskytnut výrobcem).

Umístění vzorků na platformě před vsunutím do vakuové komory je na obr. 4.2.



Obr. 4.2 Vkládání vzorků Ti64 do komory mikroskopu.

4.1.1 Ti64

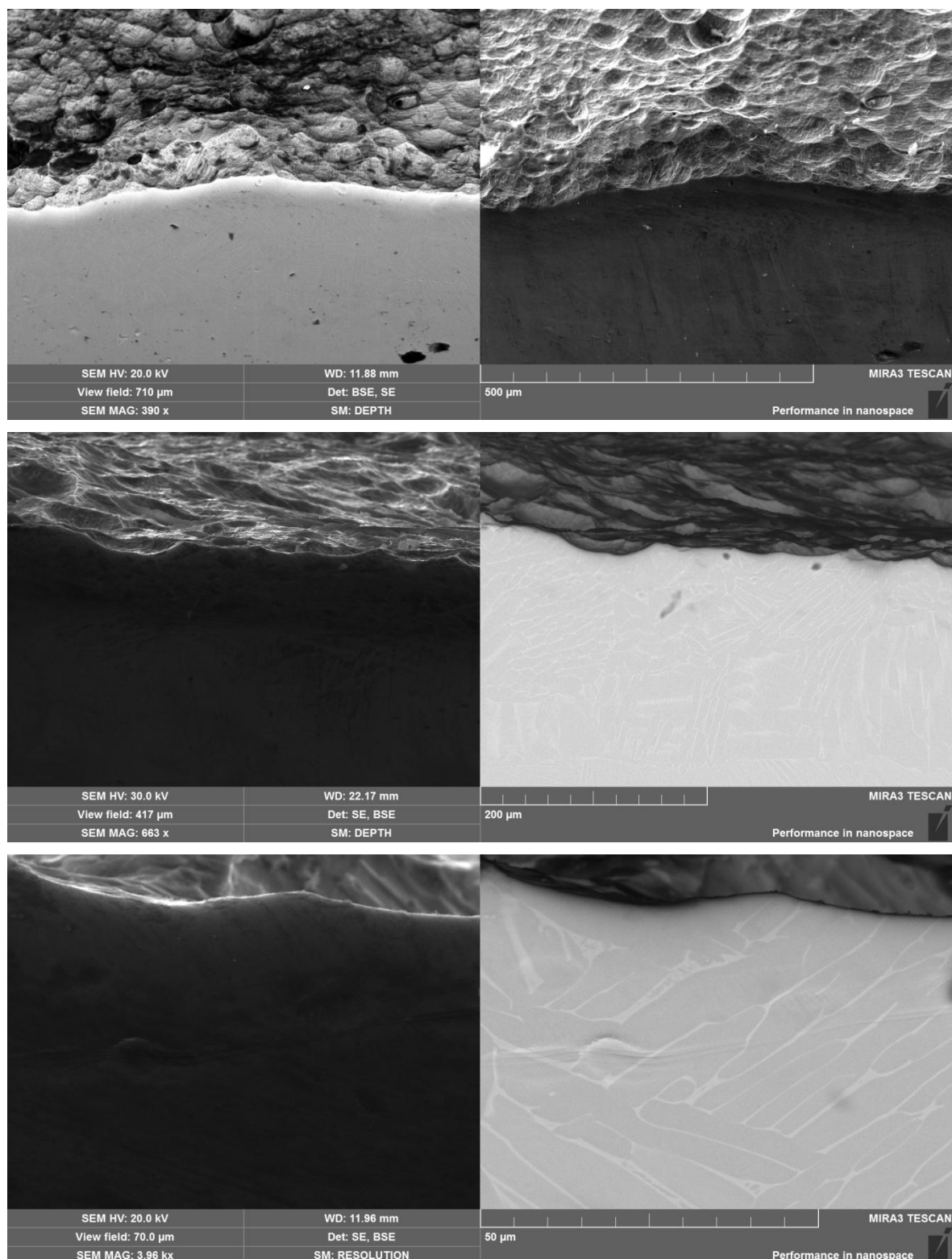
Pro pozorování tohoto materiálu byly vytvořeny dva vzorky, následně řezány ve dvou vzájemně na sebe kolmých směrech. Umístění těchto vzorků na platformu vkládanou do komory mikroskopu je na obr. 4.3.



Obr. 4.3 Umístění vzorků Ti64 na platformu vkládanou do komory mikroskopu.

Polotovary z materiálu Ti64 se v porovnání s Ti55531 obrábí hůře. Tzn., že dochází k rychlejšímu opotřebení nástrojů. Mělo by se jednat o polotovary vyráběné tažením za tepla. Firma obrábějící tento materiál navíc pozoruje největší problémy při obrábění, kdy dochází k odebírání povrchové vrstvy. Na povrchu materiálu je již pouhým okem vidět značně nerovnoměrný povrch. Tento byl postupně více přiblí-

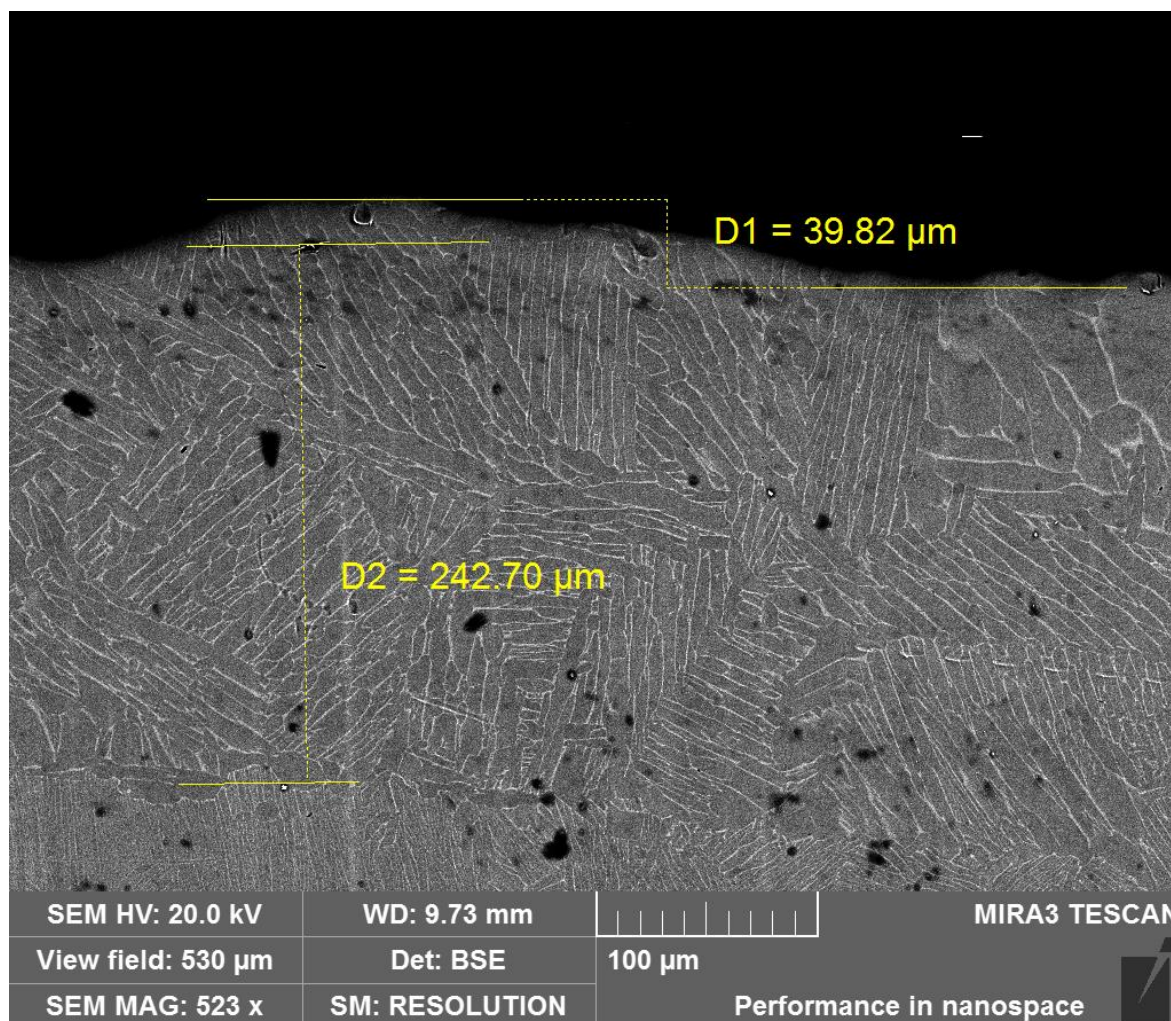
žován mikroskopem – viz. obr. 4.4, kde bylo při jednotlivých zvětšeních použito dvou detekcí, a to SE a BSE. Vznik takto nerovného povrchu lze připisovat nástrojům, které byly v kontaktu s materiálem při tažení.



Obr. 4.4 Nerovnoměrný povrch Ti64 – detekce SE vs. BSE.

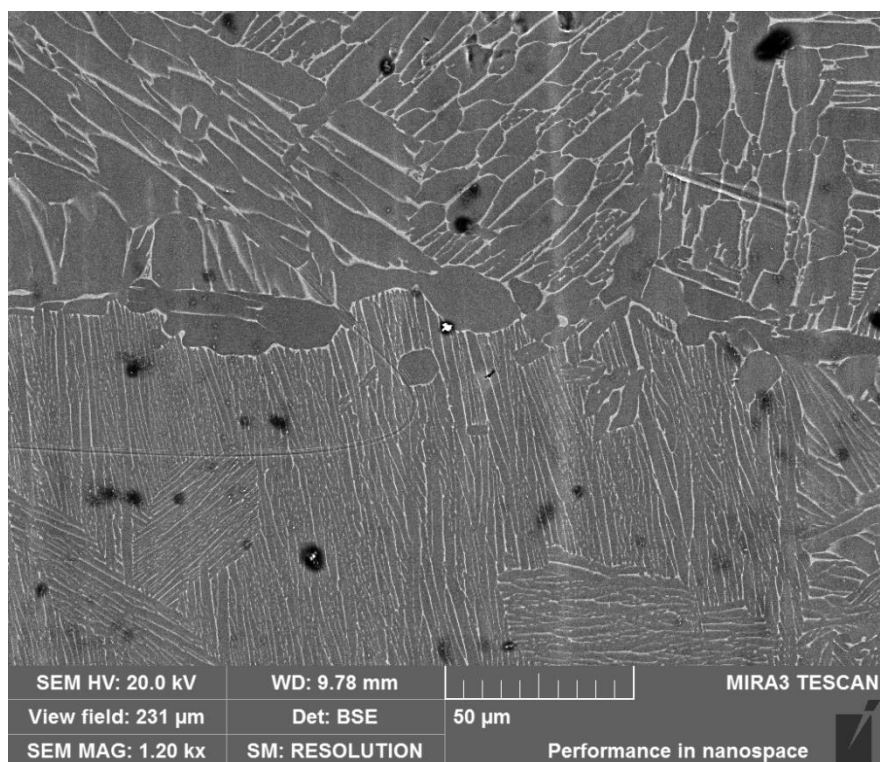
Na následujícím obr. 4.5 je orientačně zakótována hloubka jedné z těchto prohlubní respektive rozměr (D1) od vybraného lokálního maxima k minimu. Jak lze vidět, tato hloubka se pohybuje okolo 40 μm . Dle předchozího obr. 4.4 je zřejmé, že tento rozměr je značně proměnný, tedy v některých oblastech může dosahovat vyšších i nižších hodnot.

Další viditelná vlastnost tohoto materiálu je rozdílná struktura povrchové vrstvy materiálu a zbývajících objemu materiálu. Rozměr D2 na obr. 4.5 ukazuje přibližnou hloubku, kde se nachází rozhraní rozdílných struktur.

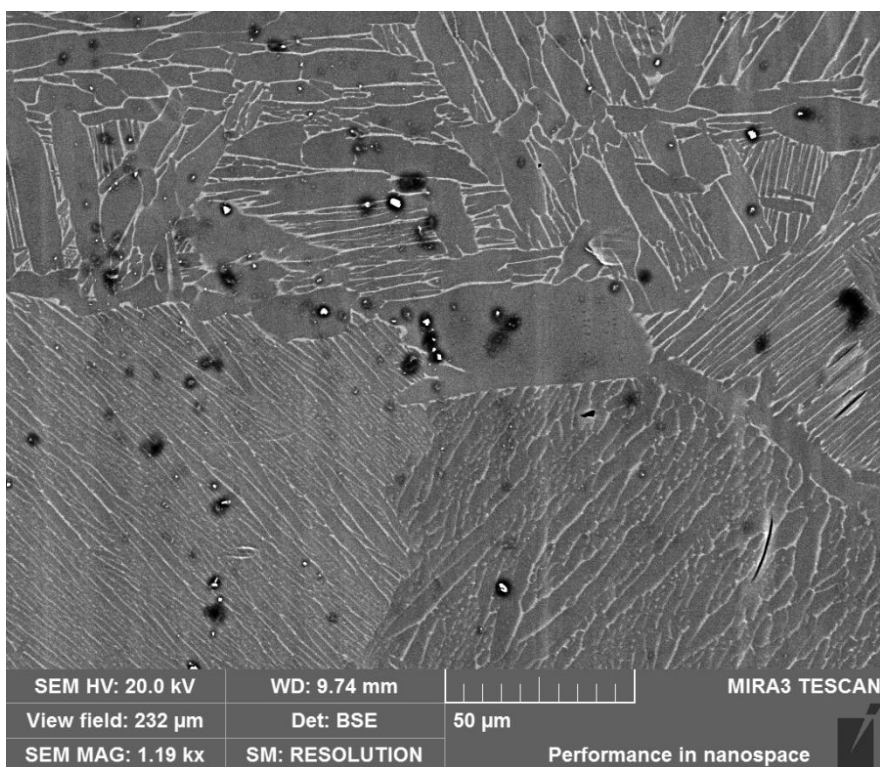


Obr. 4.5 Struktura pod povrchem, hloubka výmolu.

Obr. 4.6 zobrazuje detail na toto rozhraní struktur, obr. 4.7 poskytuje stejný pohled v jiném místě, kde lze mimo jiné pozorovat i hranice zrn.



Obr. 4.6 Rozhraní odlišných struktur.



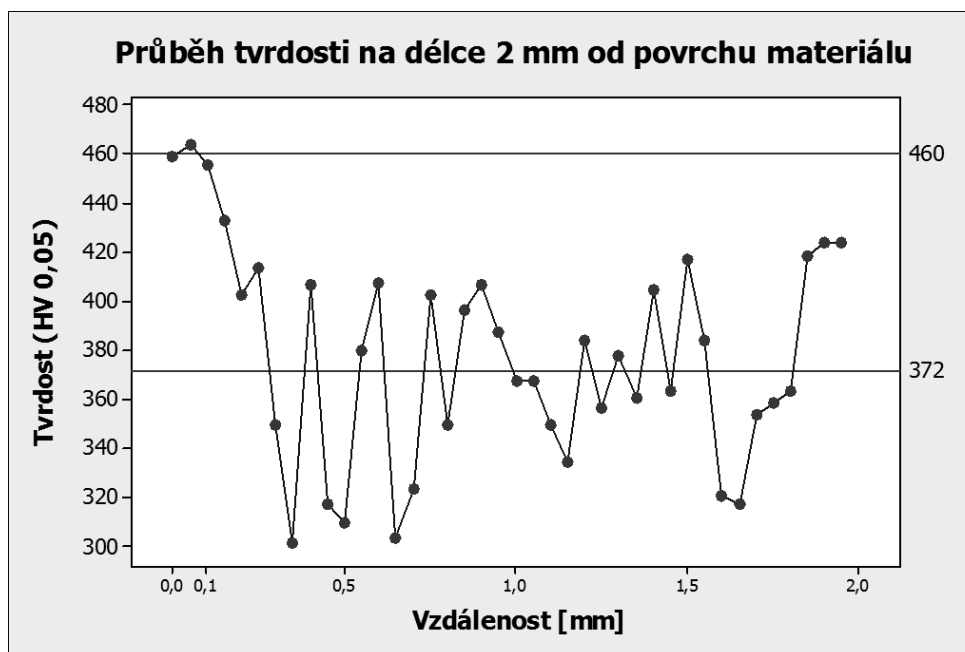
Obr. 4.7 Rozhraní odlišných struktur s viditelnou hranicí zrn.

Ze získaných fotografií lze usoudit, že se jedná o slitinu s lamelární strukturou, která je charakteristická pro materiály, podléhající stabilizačnímu žíhání (tzn. stabilizace struktury – zejména beta fáze). Struktura je tvořena dominantní fází alfa (mající HCP mřížku) a malým množstvím fáze beta (BCC mřížka). Literatura k těmto materiálům uvádí podíl přibližně (10 – 20) % fáze beta ve struktuře.

Cílem stabilizačního žíhání je stabilizace struktury materiálu, zejména fáze beta. Obecně je uváděno, že se provádí při teplotách (700 – 800) °C po dobu (1 – 8) hodin. Ochlazení probíhá na vzduchu. Přesný režim žíhání v případě tohoto konkrétního materiálu nebylo možné zjistit.

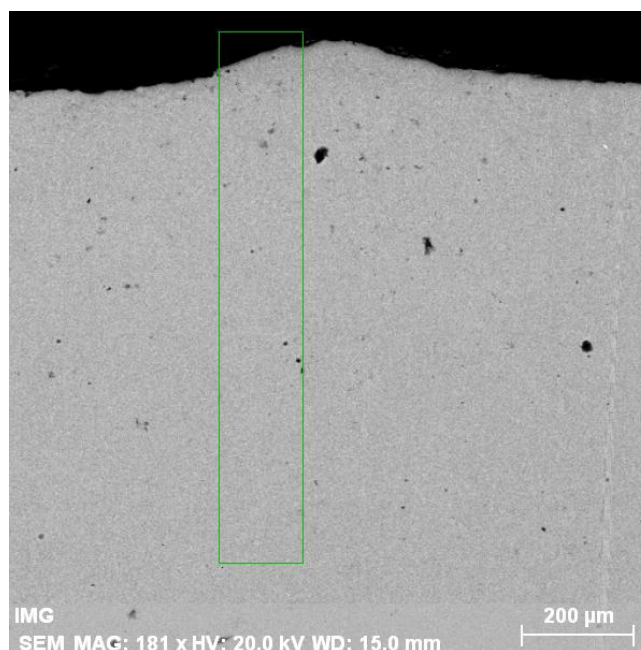
V povrchové vrstvě materiálu, přibližně do hloubky 250 µm (viz. obr. 4.5), je zřejmé zhrubnutí struktury. Toto je pravděpodobně způsobeno vlivem zvýšené teploty na povrch materiálu, ke kterému dochází právě např. při tváření za tepla. Z tohoto lze usoudit, že v průběhu hrubnutí, při působení teplot vyšších než 500 °C došlo k nasycení povrchu. Následná spektrální analýza prokázala, že vrstva je nasycena prvky obsaženými ve vzduchu (N, O), díky čemuž mohlo dojít ke zkřehnutí povrchu materiálu a tudíž ke zhoršení obrobitelnosti.

Pro potvrzení zvýšené tvrdosti materiálu pod povrchem a v hloubce bylo provedeno měření mikrotvrdosti. Měřeno bylo s inkrementem 0,05 mm do výsledné vzdálenosti 2 mm od povrchu materiálu. Výsledný průběh je na obr. 4.8. Z grafu je zřejmé, že první tři hodnoty, měření do hloubky přibližně 0,1 mm, se pohybují řádově výše než ostatní, což souvisí především s nasycením povrchové vrstvy O a N. Rozdíl mezi střední hodnotou těchto tří prvních hodnot (460 HV) a střední hodnotou vypočtenou z ostatních měření (372 HV) je 88 HV. Oblast do délky 0,2 mm reprezentuje povrchovou vrstvu s hrubozrnnou strukturou (viz. obr. 4.5, obr. 4.6, obr. 4.7). Naměřená tvrdost v povrchové vrstvě do hloubky okolo 0,1 mm od povrchu je tedy přibližně o 24 % vyšší, než průměrná hodnota tvrdosti pod touto vrstvou.



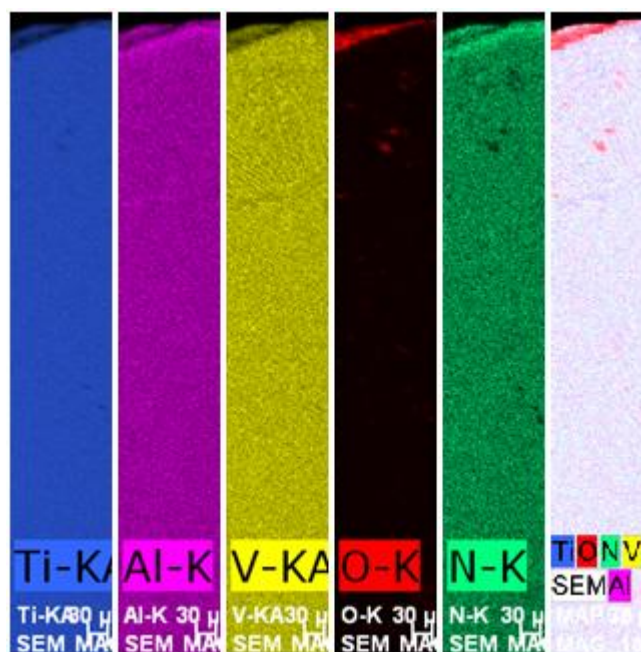
Obr. 4.8 Průběh tvrdosti.

Další částí analýzy bylo určení chemického složení. K tomuto byla použita EDX analýza, jednak bodová a také plošná. Prvním výstupem je rozložení jednotlivých pozorovaných prvků v materiálu. Pro pozorování byla vybrána oblast (obr. 4.9), která zahrnuje samotný povrch materiálu, zhrublou povrchovou vrstvu sahající do hloubky okolo 200 μm a také základní neovlivněný materiál.



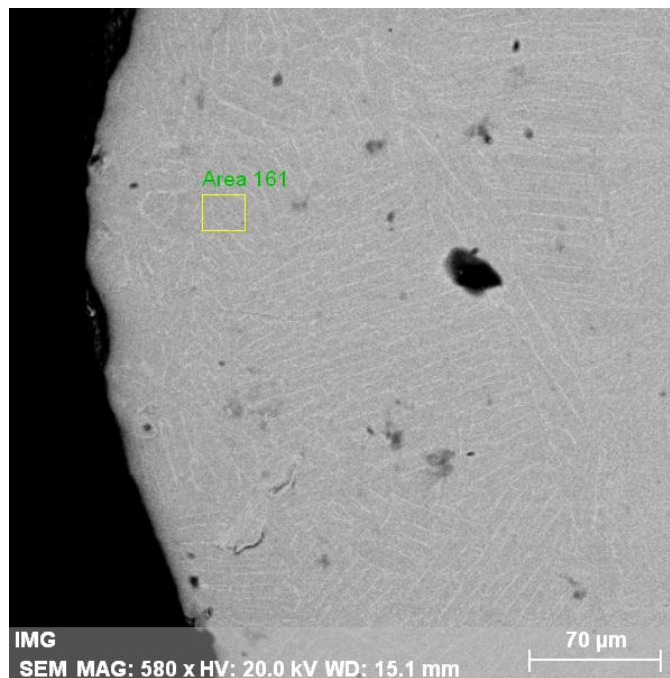
Obr. 4.9 Analyzovaná oblast rozložení prvků – Ti64.

Jednotlivé prvky rozložené ve vybrané pozorované oblasti jsou na obr. 4.10. Poslední blok zobrazuje společné rozložení prvků. Z obr. lze vidět, že Ti, Al a V je rozložen rovnoměrně, naopak O a obdobně N je nahromaděn na povrchu a ve viditelných lokálních oblastech ve zhrublé povrchové vrstvě.

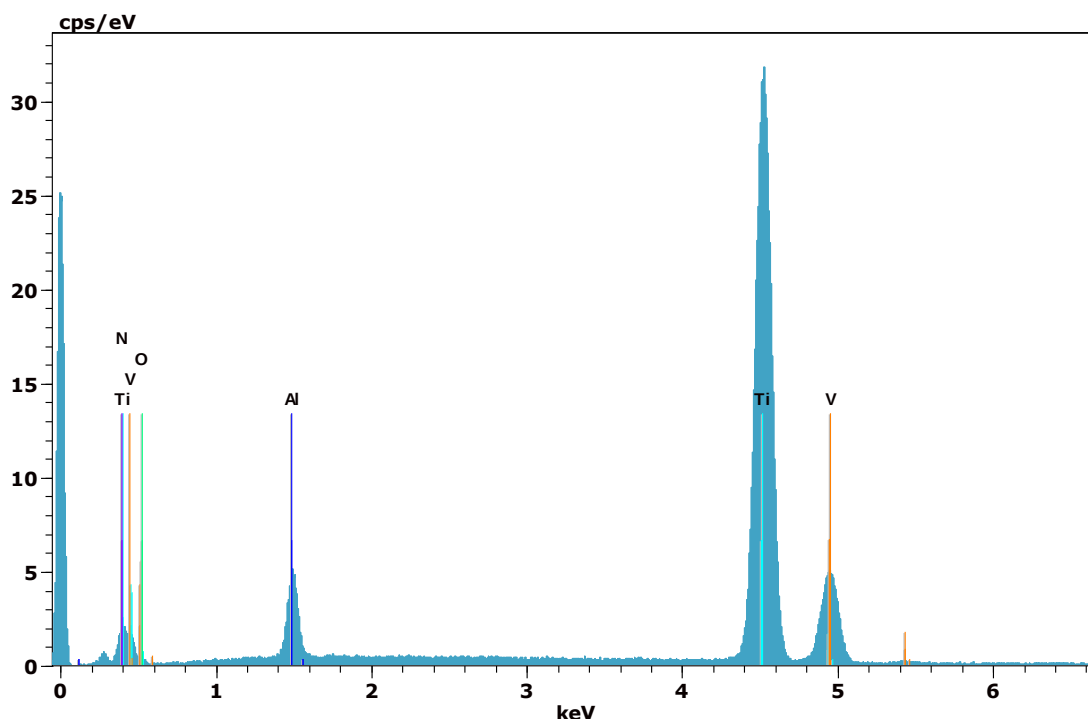


Obr. 4.10 Rozložení prvků – Ti64.

Procentuální zastoupení jednotlivých prvků bylo sledováno ve dvou oblastech. První oblast, označená jako Area 161, se nachází ve zhrublé struktuře (viz. obr. 4.11). Plošná EDX analýza této oblasti je znázorněna na obr. 4.12.



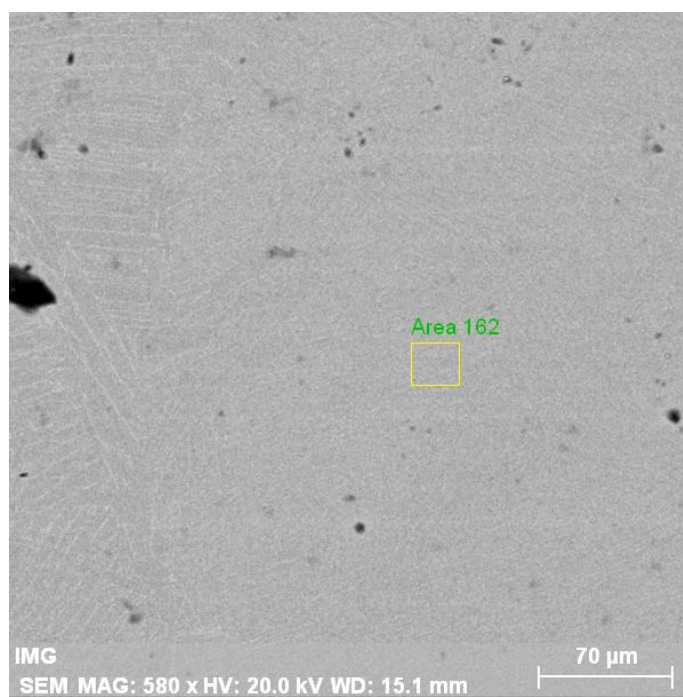
Obr. 4.11 Area 161 – analýza chemického zastoupení prvků.



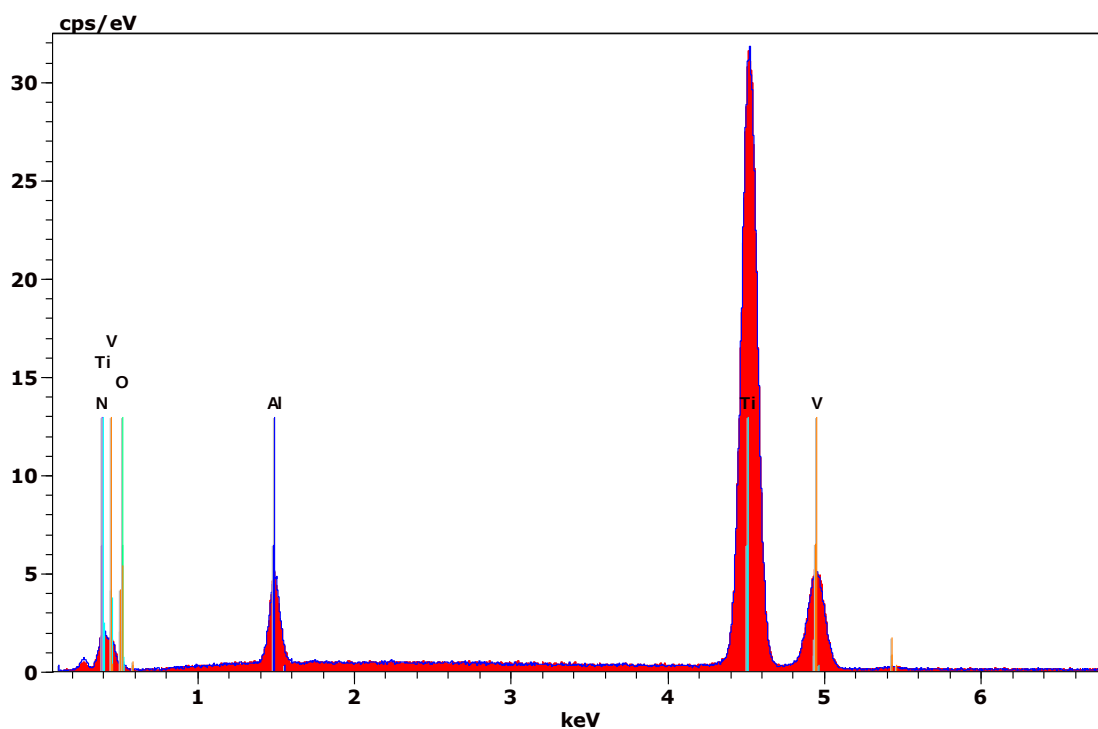
Obr. 4.12 Area 161 – plošná EDX analýza.

Stejným způsobem byla provedena plošná EDX analýza oblasti nacházející se mimo vrstvu se zhrublou strukturou. Oblast je označená jako Area 162

(viz. obr. 4.13). Na obr. 4.14 je samotná analýza, přičemž tato byla vykreslena do grafu předchozí analýzy oblasti 161, která je vyznačena modře. Lze vidět, že EDX analýza oblasti 161 (vyznačena modře) je překrývána analýzou oblasti 162 (vyznačena červeně), tedy chemické složení obou oblastí je velmi podobné.



Obr. 4.13 Area 162 – analýza chemického zastoupení prvků.



Obr. 4.14 Area 162 vs. 161 – plošná EDX analýza.

Sumarizované množství zastoupených prvků v obou pozorovaných oblastech je v tab. 4.1. K jednotlivým prvkům je uvedeno jejich zastoupení v hmotnostních procentech a daná nepřesnost určení.

Tab. 4.1 Procentuální zastoupení jednotlivých prvků.

Prvek	Area 161		Area 162	
	Hm. %	σ [Hm. %]	Hm. %	σ [Hm. %]
Ti	87,32	2,45	88,05	3,00
Al	5,82	0,28	5,63	0,31
V	2,91	2,36	3,25	2,23
O	0,00	0,00	0,00	0,00
N	3,95	5,89	3,07	5,21

Analýza materiálu Ti64 neboli Ti-6Al-4V potvrdila chemické složení slitiny. Navíc chemické složení v jednotlivých oblastech se výrazně neliší, což potvrzují samotné EDX analýzy na obr. 4.12 a obr. 4.14, stejně tak i procentuální zastoupení prvků. Procentuální zastoupení některých prvků bylo určeno s větší nepřesností, jiné s menší. Analýza rozložení prvků, která je na obr. 4.10, naopak prokázala nahromadění kyslíku a dusíku na povrchu materiálu. Jak již bylo výše zmíněno, zhrublá struktura povrchové vrstvy materiálu je pravděpodobně způsobena vlivem teploty vyšší než 500 °C, při níž zároveň dochází k nasycování povrchu kyslíkem nebo dusíkem. Tato skutečnost byla chemickou analýzou potvrzena.

Další fotografie získané při pozorování jsou v příloze 2.

4.1.2 Ti55531

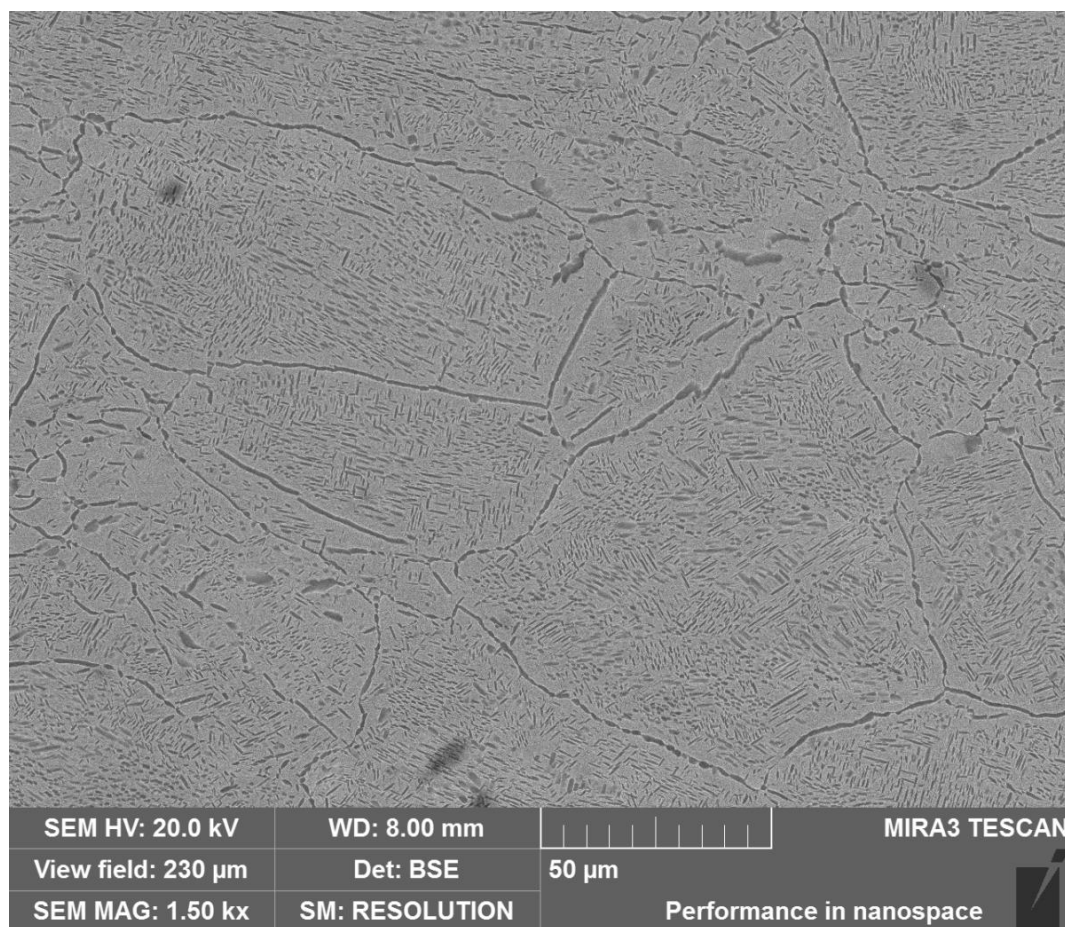
Materiálem, který se dle firmy Frentech Aerospace s.r.o. jeví v porovnání s Ti64 jako dobře obrobitelný, je slitina Ti55531 neboli Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-1Zr.

Tato slitina patří do skupiny slitin, které se nazývají „near beta titanové slitiny“. Jsou to slitiny, které se blíží beta slitinám. Často je využívána pro aplikace v leteckém průmyslu. Near beta titanové slitiny jsou v současnosti velmi atraktivní pro letecký průmysl, díky širokému rozpětí mechanických vlastností, které lze získat danými způsoby tepelných zpracování. Později byl do této slitiny přidáván Zr kvůli snížení teploty beta transformace. Nominální chemické složení v hmot. % je: 5,04 V, 5,51 Al, 5,01 Mo, 2,85 Cr, 0,32 Fe, 1,125 Zr, 0,0655 O, 0,0045 C, 0,0085 N a Ti. Teplota T_{β} je 803 °C [22].

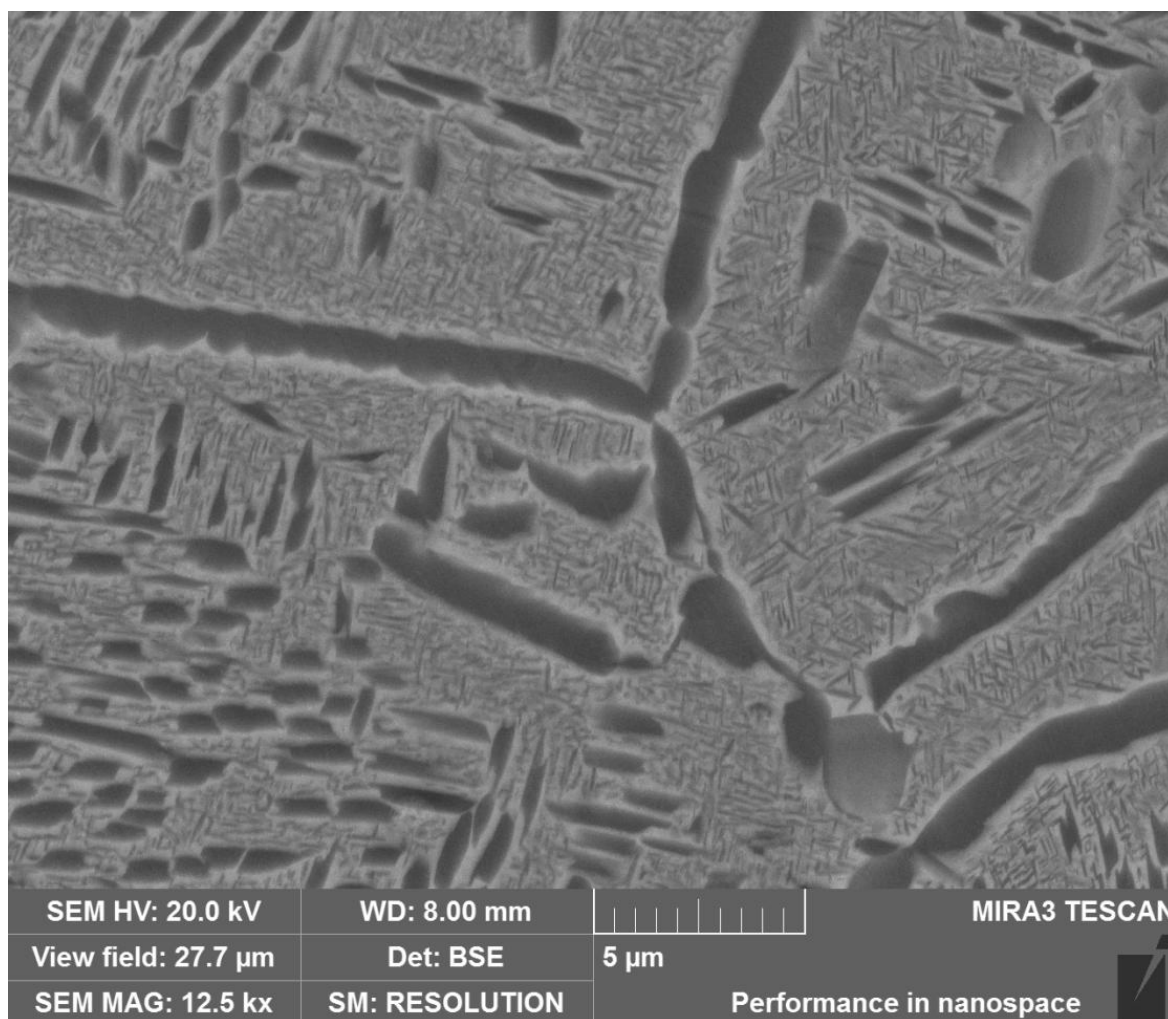
Dodaný polotovár pro testování, byl přířez z válcované tyče. Z tohoto byl vyříznut, vybroušen a naleptán vzorek. Umístění vzorku na platformě vstupující do komory elektronového mikroskopu je na obr. 4.15.



Obr. 4.15 Umístění vzorků Ti55531 na platformu vkládanou do komory mikroskopu. Struktura materiálu je zobrazena na Obr. 4.16, kde jsou jasně viditelné hranice zrn. Na následujícím Obr. 4.17 je detail struktury v oblasti hranic několika zrn.



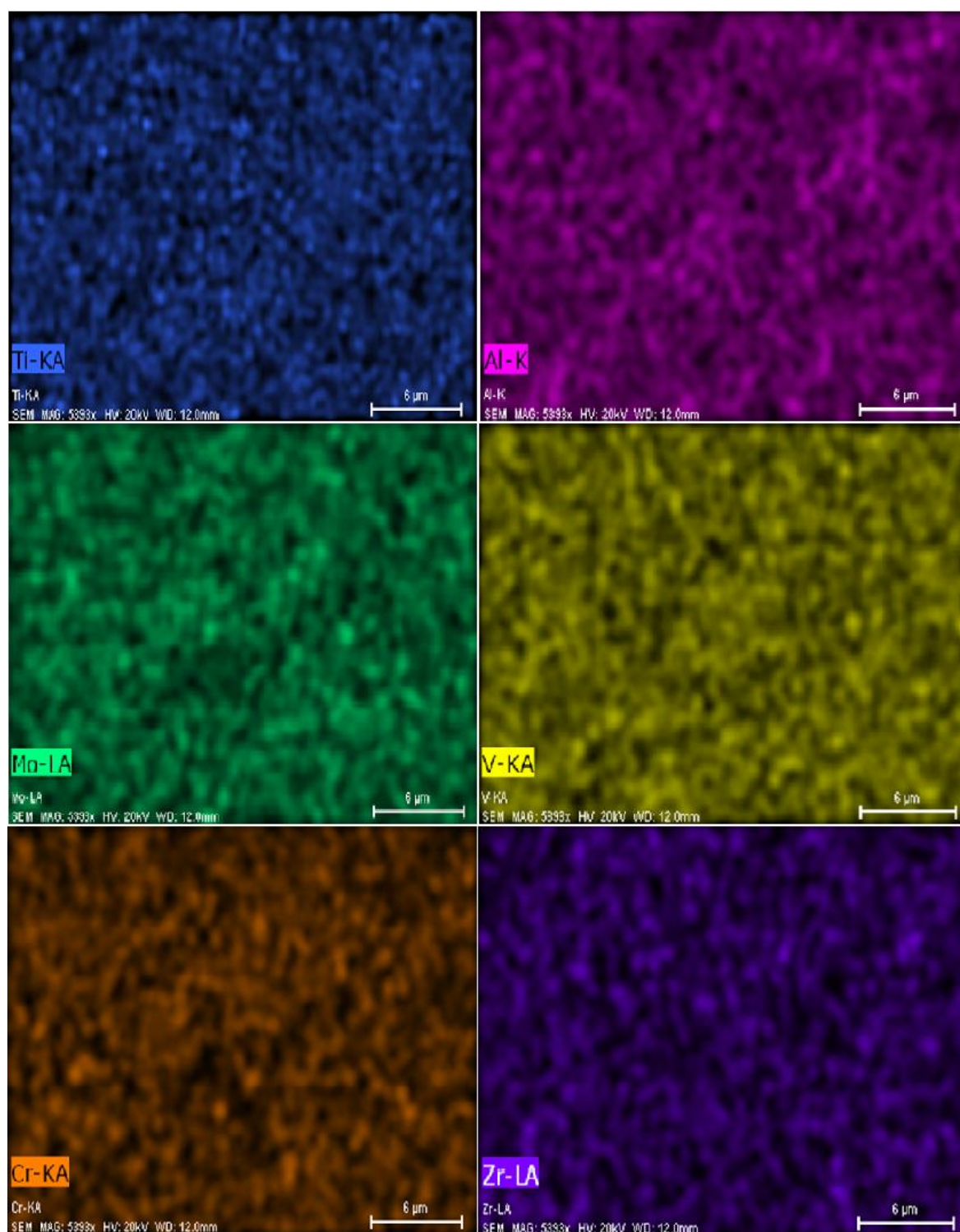
Obr. 4.16 Struktura – hranice zrn.



Obr. 4.17 Struktura – detail rozhraní několika zrn.

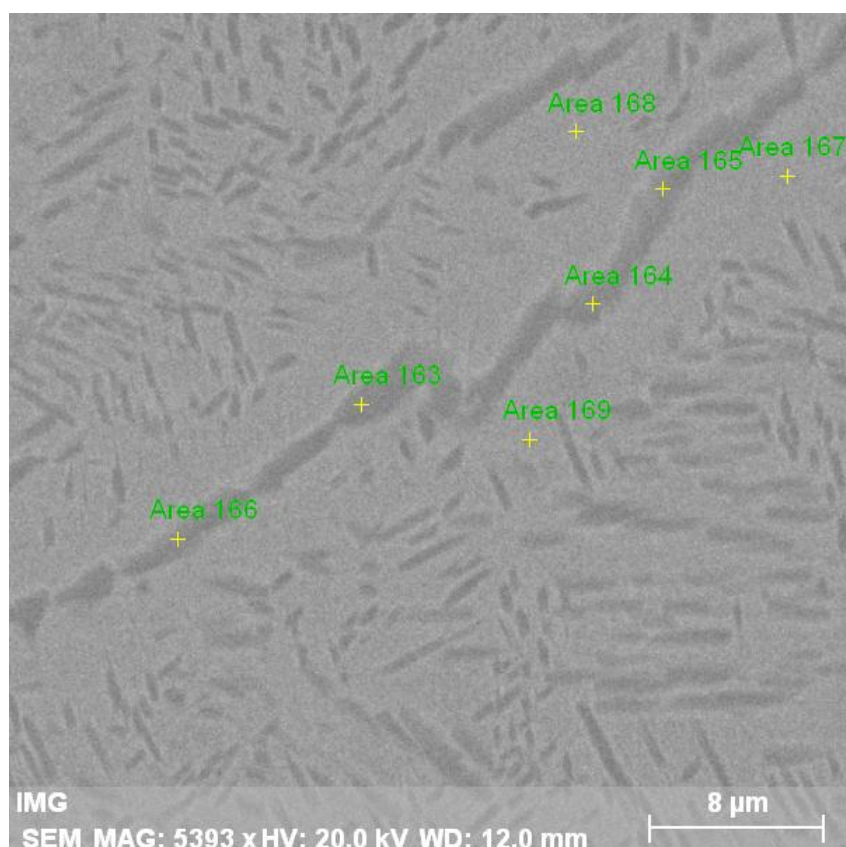
Obdobně jako u materiálu Ti64 byla i zde provedena chemická analýza. Rozložení prvků v dané oblasti je na obr. 4.18, kde je zřejmé, že všechny prvky jsou rozloženy rovnoměrně bez jakýchkoliv lokálních výrazných oblastí.

Struktura je tvořena fázemi alfa a beta, přičemž beta je zde dominantní fází (matrice – světlejší plochy) a alfa, která je zde zastoupena ve dvou formách. Primární alfa vzniklá při výrobě (větší tmavé oblasti) je rozložena zejména po hranicích zrn. Sekundární alfa fáze (menší tmavé oblasti) vyprecipitovala v průběhu tepelného zpracování. Ačkoliv přesný režim tepelného zpracování, kterému tato slitina podléhala, nebylo možné zjistit, lze díky dostupným informacím o těchto materiálech přinejmenším předpokládat, že se jednalo o ochlazení z teploty okolo 700 °C.



Obr. 4.18 Rozložení prvků – Ti55531.

Zastoupení jednotlivých prvků, vyjádřené v hm. %, bylo analyzováno bodově. Pozorováno bylo celkem sedm bodů. Jednotlivé body jsou označeny jako Area 163 - 169 (viz. obr. 4.19). Výsledné podíly zastoupených prvků jsou v tab. 4.2.



Obr. 4.19 Area 163 -169 – analýza chemického zastoupení prvků.

Tab. 4.2 Procentuální zastoupení jednotlivých prvků – Ti55531.

Prvek [Hm. %]	Ti	Al	Mo	V	Cr	Zr
Area 163	85,56	4,92	2,66	4,16	0,96	0,73
Area 164	85,07	4,95	3,07	4,61	1,50	0,80
Area 165	84,63	4,70	3,42	4,80	1,75	0,69
Area 166	82,68	4,13	4,39	5,73	2,43	0,65
Area 167	82,74	3,88	4,69	5,49	2,48	0,71
Area 168	83,07	3,94	4,44	5,54	2,31	0,69
Area 169	83,08	4,00	4,41	5,45	2,32	0,75
$\bar{x}$ [Hm. %]	83,98	4,36	3,87	5,11	1,96	0,72
σ [Hm. %]	1,48	0,48	0,80	0,59	0,58	0,05

Z tabulky je zřejmé, že jednotlivé prvky se svým procentuálním zastoupením v materiálu pohybují okolo nominálních hodnot. V případě některých prvků, např. Mo, jsou rozdíly mezi pozorovanými oblastmi větší, v jiných případech menší. Stejně tak nepřesnosti určení jsou v jednotlivých případech rozdílné.

Další fotografie pořízené na elektronovém mikroskopu jsou v příloze 3.

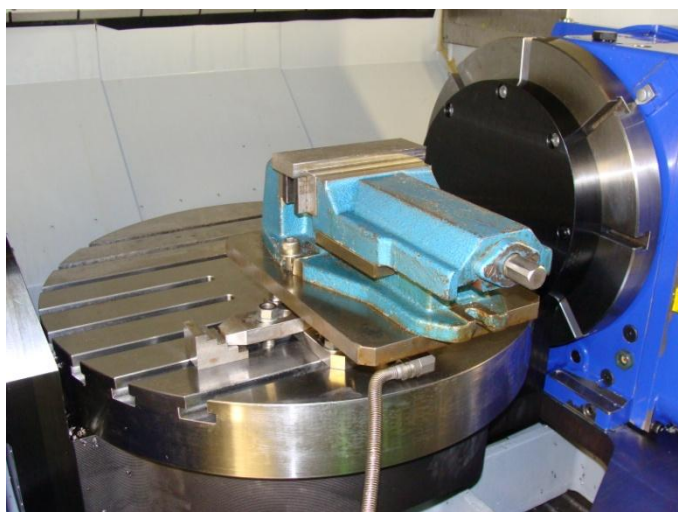
4.2 Testování

Testování bylo provedeno v prostorách dílen ÚST na pětiosé CNC frézce MCV 1210. K měření sil byl využit dynamometr KISTLER včetně softwaru DynoWare. Tento měří silové odpory ve třech osách. Osa x – vodorovná podélná, osa y – vodorovná příčná, osa z – svislá. Jak již bylo zmíněno, dynamometr měří silové odpory, výsledné silové působení nástroje je tedy v opačném směru, než jaký udávájí znaménka u naměřených dat. Snímací frekvence byla nastavena na 5000 Hz, jednalo se tedy o měření s časovým inkrementem 0,0002 s.



Obr. 4.20 Osciloskop KISTLER včetně PC.

Dynamometr byl upnut na stole stroje, následně na dynamometru ustaven univerzální svěrák, v němž byl postupně upnut první a poté druhý testovaný polotovár. Sestava je zobrazena na obr. 4.21.

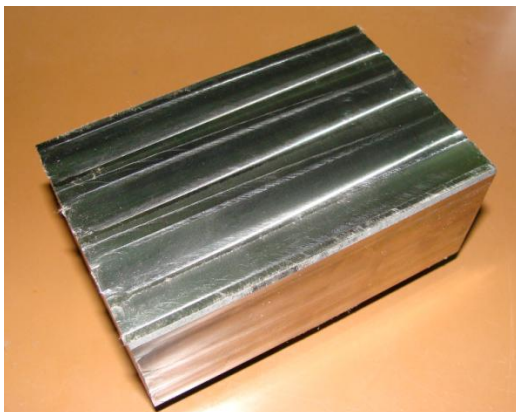


Obr. 4.21 Sestava – dynamometr, svěrák, obrobek.

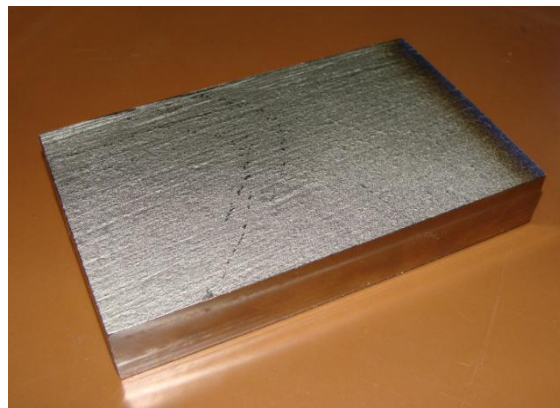
4.3 Příprava zkušebních vzorků

V první části testování byly připraveny polotovary. Z důvodu přesného upnutí bylo nutné z každého materiálu vytvořit hranol. První polotovár byl válcový přířez průměru 82 mm. Následně z něj byl stopkovou frézou D16 mm vyfrézován hranol

o rozměrech 58x70 mm. Druhý dodaný materiál byl ve tvaru taženého profilu, z něhož byla odfrézována plochá část o rozměrech 18x71x116,4 mm. V tomto případě bylo nutné hranol připravit tak, aby nedošlo k odstranění povrchové vrstvy.



a) válcový polotovár



b) tažený profil

Obr. 4.22 Připravené vzorky k testování.

4.4 Použité nástroje a upínače nástrojů

K testu byly použity dva typy nástrojů a dva typy upínacích trnů. Celkem dva kusy čtyřbřité frézy GUHRING RF 100 F průměru 16 mm a dva kusy pětibřité frézy KENNAMETAL HARVI II série UDDE. Následující tab. 4.3 zobrazuje kombinace fréz a upínačů, které vstupující do testu jako jeden z pozorovaných parametrů. Každé kombinaci byl přidělen název, který je dále v práci používán k jasné identifikaci sestavy upínače vs. nástroje. Stejně tak byly přiděleny zkratky pro samostatné nástroje a upínače, pomocí kterých jsou dále v práci označovány.

Tab. 4.3 Použité kombinace fréz vs. upínače.

Označení sestavy	Výrobce - typ frézy	Počet břitů	Zn.	Upínač	Zn.
4W	GUHRING - RF 100 F	4	G4	Weldon	W
4T	GUHRING - RF 100 F			Tepelný	T
5W	KENNAMETAL - HARVI II UDDE	5	K5	Weldon	W
5T	KENNAMETAL - HARVI II UDDE			Tepelný	T

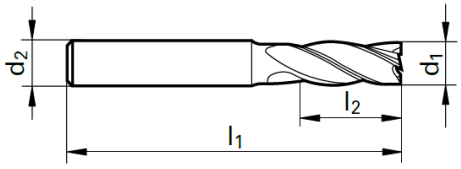
4.4.1 Fréza GUHRING - RF 100 F

Fréza GUHRING RF 100 F patří do skupiny vysoce výkonných fréz RF 100 firmy GÜHRING s.r.o., která je součástí koncernu Gühring o.H.G. [23]. Skupina RF 100 zahrnuje tři typy fréz. V našem případě byla použita fréza bez vnitřního chlazení a s ploškou na stopce proti pootočení nástroje v upínači. Celé označení frézy dle normy je DIN 6527L R-RF1 [24].

Frézy skupiny RF 100 jsou frézy s nepravidelným úhlem stoupání šroubovice, přizpůsobeny tak, aby zamezily chvění nástroje a tzv. efektu vytažení. K tomuto efektu dochází u nástrojů s velkým úhlem stoupání šroubovice. Úhel stoupání

je v rozmezí $40^\circ - 42^\circ$. Tyto nástroje navíc mají po obvodu nerovnoměrně rozdělené šroubovitě drážky, tím tedy i samotné břity, přičemž s tímto je třeba při vyhodnocení počítat. V experimentu použité rozměry frézy obsahuje tab. 4.4 [24, 25].

Tab. 4.4 Rozměry frézy GUHRING, počet zubů [24].

d1 [mm]	d2 [mm]	l1 [mm]	l2 [mm]	z [-]	
16,000	16,000	92,000	32,000	4	

Jako materiál nástroje výrobce uvádí „Tvrdokov“ [24]. Jedná se tedy o monolitní frézu ze slinutého karbidu. Bližší informace o materiálu nejsou v katalogu nástrojů uvedeny. Název povlaku je FIREX[®]. Ve své podstatě jde o vícevrstvý povlak složený z povlaku TiN, který poskytuje odolnost proti rázu (shock) a z TiAlN jenž zabezpečuje tepelnou odolnost. Zpočátku byl vyvinut pro suché obrábění, nyní je ovšem využíván všestranně. Vícevrstvá kombinace povlaků poskytuje tepelnou stabilitu a odolnost proti otěru za vysokých teplot, stejně tak je ale používán i při procesech kdy nedochází ke vzniku nadměrných teplot. Vlastnosti povlaku dále uvádí tab. 4.5 [25].

Tab. 4.5 Vlastnosti povlaku FIREX[®] [25].

Vlastnost	Údaj
Materiál povlaku	TiN, TiAlN
Tvrdost [HV 0,05]	3000 – 3300
Teplota povlakování [°C]	499 (930 °F)
Tloušťka [μm]	1,5 - 5
Maximální provozní teplota [°C]	799 (1470 °F)
Barva	Červeno-fialová

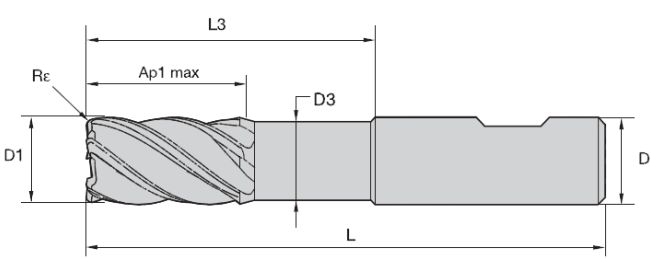
4.4.2 Fréza KENNAMETAL HARVI II UDDE

Frézy KENNAMETAL skupiny HARVI II jsou monolitní frézy používané pro obrábění korozivzdorných ocelí, titanových slitin apod. Celé označení v případě použité frézy je UDDE1600B5ARC. Jedná se o nástroj série fréz UDDE vyvinutých pro frézování titanových slitin. Firma Kennametal Inc. vyvinula tyto frézy jako univerzální nástroje vhodné jak pro hrubovací tak i dokončovací operace. Frézy mají pět zubů, přičemž rozdělení šroubovitých drážek a tím pádem i rozdělení zubů po obvodu není rovnoměrné. Tato vlastnost by měla snižovat chvění a celkový proces frézování by měl být plynulejší. Rozměry frézy, jež byla použita pro test, jsou uvedeny v tab. 4.6 [27, 28]. Nerovnoměrně rozdělené břity způsobují jisté ztížení vyhodnocení naměřených dat. Informaci o přesné poloze řezných hran nebyly k dispozici u této, ani u předchozí frézy. Nicméně s touto skutečností

je třeba následně při filtraci naměřených dat počítat a zohlednit jistý posun od rovnoměrného rozdělení.

Tab. 4.6 Rozměry frézy KENNAMETAL, počet zubů [26].

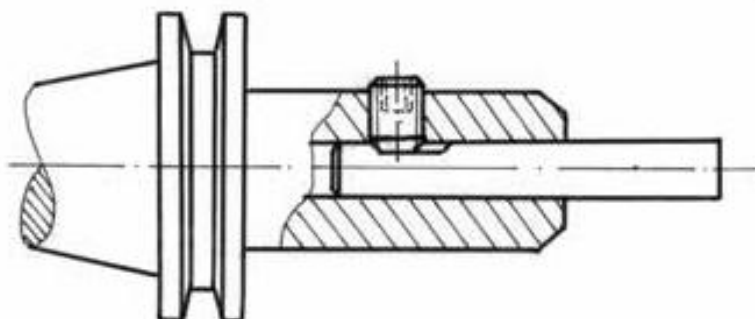
D1 [mm]	D [mm]	D3 [mm]	Ap1 max [mm]
16	16	15	32
L3 [mm]	L [mm]	R ϵ [mm]	z [-]
48	100	2	5



Materiál nástroje je slinutý karbid typu S. Tedy typ slinutého karbidu, který je mimo jiné určený právě k obrábění titanových slitin. Povlak, označován KC643M, je Al-TiN povlak nanášený metodou PVD. Výrobce udává, že jde o velmi tvrdý povlak nanášený v tenké vrstvě, který je obzvláště vhodný pro obrábění většiny materiálů. Díky těmto vlastnostem jej lze dle informací výrobce použít pro obrábění materiálů s tvrdostí dosahující 52 HRC [27].

4.4.3 Upínací trn WELDON

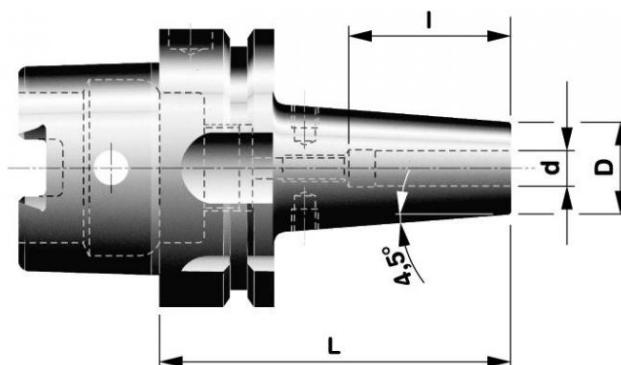
Jeden z používaných upínacích trnů byl tzv. weldonový upínací trn. Označení dle normy je DIN 6535 HB. Tento upínač nástrojů patří k nejjednodušším typům upínačů, kdy k upnutí nástroje dochází pomocí jeho stopky. Přenos krouticího momentu zajišťuje šroub, dosedající kolmo na plochu vyfrézovanou na stopce nástroje. Vyfrézovaná plocha je rovnoběžná s osou. Nespornou výhodou tohoto upínače je jeho jednoduchost a malá cena. Nevýhodou je naopak vysoká obvodová házivost pohybující se v rozmezí (15 – 20) μm a možnost použití upínače pouze pro jeden konkrétní průměr stopky frézy. Poměrně vysoká házivost je zapříčiněna právě způsobem upnutí, kdy je nástroj šroubem odtlačován a dochází k vychýlení z osy upínače [28].



Obr. 4.23 Upínač Weldon DIN 6535 HB [28].

4.4.4 Tepelný upínací trn

Druhým použitým upínačem byl tepelný upínací trn (obr. 4.24). Tepelné upínání patří v současnosti k moderním způsobům upínání nástrojů všech druhů s válcovou stopkou. Upínací pouzdra jsou vyráběna ze speciálních tepelně roztažných materiálů. Tato pouzdra jsou při upínání nahřívána indukční cívkou. Díky tepelné roztažnosti dojde k rozšíření otvoru, které je nutné pro vsunutí stopky nástroje. Důležité je, aby k ohřevu došlo co nejrychleji, obvykle se jedná o jednotky sekund. Vedení tepla od místa ohřevu do dalších částí nástroje bývá minimalizováno. Díky tomu může proběhnout relativně rychlé ochlazení a tím i pevné upnutí nástroje. Ochlazovacím médiem bývá obvykle vzduch nebo voda. Tepelné upnutí je přesné, vykazuje minimální házivost ($<0,003$ mm [29]), má vysokou dynamickou tuhost, vysokou upínací sílu. Vykazuje dobré výsledky tedy vysokou přesnost při opakovaném upnutí a vynikající kvalitu vyvážení pouzdra s nástrojem. Dobrá je možnost využití dlouhých trnů, díky nimž lze obrábět i hluboké kapsy [30].



Obr. 4.24 Tepelný upínač [31].

Při využití těchto upínačů je dobré, v rámci možností, zvážit vyložení nástroje. Při testování z důvodu aktuálních možností nutné použít upínače, jejichž vyložení nebylo plně optimální. Na obr. 4.25 lze vidět rozdíl ve vyložení fréz upnutých v upínači Weldon a tepelném upínači. Nicméně pro tento test lze tuto skutečnost na základě několikanásobně nižší obvodové házivosti oproti upínači Weldon do jisté míry neuvažovat.



Obr. 4.25 Použité nástroje a upínače (2x GUHRING 4 břity, 2x KENNAMETAL 5 břitů, 1x fréza na přípravu zkušebních polotovarů, 2x Weldon, 2x tepelný upínač).

4.5 Postup měření

Při testování byl postupně frézován tažený materiál Ti64 všemi čtyřmi kombinacemi fréz a upínačů. Dále proběhlo frézování dvou sad průjezdů, každá jiným nástrojem. Na druhém materiálu bylo provedeno pouze frézování dvou analogických sad. Přehlednější informace o jednotlivých průjezdech a použitých podmínkách frézování jsou rozebrány v následujících podkapitolách.

Vzhledem k omezeným materiálovým a nástrojovým možnostem nebylo možné provést sady několika stejných po sobě jdoucích průjezdů pro každé testované podmínky obrábění. Ovšem k vyhodnocení rozdílů v silovém zatížení mezi prvním a druhým materiálem bylo možné opakovaná měření při stejných podmínkách provést. Vždy se jednalo o sadu pěti po sobě jdoucích průjezdů. Testování tedy obsahuje celkem čtyři sady opakovaných měření. Ostatní měření nebylo možné víckrát opakovat.

4.5.1 Podmínky frézování

Hlavními výchozími parametry jsou řezné podmínky. Jelikož hlavním cílem experimentu je porovnání fréz a upínačů na dvou materiálech, je důležité, aby byly zajištěny stejné podmínky frézování u následně porovnávaných měření. Tento fakt se týká části statistického zpracování dat. V druhé části experimentu postupně dochází v některých případech ke změně řezných podmínek. Některé z podmínek jsou však zachovány ve všech případech měření. Tyto jsou uvedeny v následující tabulce (tab. 4.7).

Tab. 4.7 Řezné podmínky stejné pro všechna měření.

v_c [m·min ⁻¹]	f [mm ⁻¹]	a_e [mm]	Chlazení	Typ frézování
35	200	4	ANO	Sousledné

Ve všech případech je nástroj ve výchozí poloze postaven vpravo před testovaným materiálem. Následně probíhá frézování dle uvedených podmínek, kdy frekvence snímání dat byla po celou dobu testu 5000 Hz. Doba snímání dat dynamometrem byla nastavena na 50 s. V každém měření bylo tedy naměřeno celkem 250000 hodnot pro každý kanál (každou osu). Postavení nástroje ve výchozí poloze vůči upnutému obrobku je vidět na obr. 4.26.



Obr. 4.26 Výchozí postavení nástroje vůči obrobku.

4.5.2 Test materiálu s povrchovou vrstvou – Ti64

U materiálu vyráběného tažením (obr. 4.22b) postupně proběhlo celkem osmnáct měření. V tomto případě byly testovány všechny kombinace nástrojů a upínačů. Nejdříve bylo provedeno frézování sestavou 4W (viz. tab. 4.3). Zde šlo celkem o sedm průjezdů. Poté sestavou 5T, též sedm měření. Následovalo frézování sestavou 4T, kdy byly provedeny pouze dva průjezdy. Dále test sestavy 5W, také pouze dva průjezdy. Na závěr byly frézovány tři doplňující samostatné průjezdy. Následně je zpracována charakteristika jednotlivých měření.

1) Měření 1, 8, 15 a 17

První průjezd byl proveden za účelem získání informace o chování povrchové vrstvy, která je charakteristická pro tento polotovár. Dle informací z firmy Frentech Aerospace s.r.o. je právě tato vrstva podezřelá z vyššího opotřebení nástrojů v porovnání s druhým obráběným materiálem, který tedy tuto viditelnou vrstvu nemá. Analogicky k měření 1 byla provedena měření 8, 15 a 17. U všech průjezdů se vždy jedná o frézování, kdy $a_p = 4$ mm, v místě, kde dochází k frézování povrchové vrstvy materiálu. Jednotlivá měření jsou rozdílná sestavami fréz a nástrojů.

2) Měření 2, 9, 16 a 18

Cílem druhého průjezdu bylo získání dat k porovnání s daty z měření 1, 8, 15 a 17. Jediným rozdílem v podmínkách je frézování bez povrchové vrstvy. Frézování tedy bylo postupně prováděno na místech, kde již byla odfrézovaná povrchová vrstva, tedy v oblasti předchozího frézování. Šířka záběru ostří tedy zůstává stejná. Každé měření reprezentuje jednu sestavu nástroje a upínače.

3) Sada 3 – 7

V sadě třetího až sedmého měření, tedy celkem v pěti po sobě jdoucích průjezdech, byly vždy zachovány stejné podmínky frézování. Jedná se o sadu stejných měření vhodných pro následné statistické vyhodnocení. Získání více stejných měření umožňuje přesnější vyvození statistických závěrů.

4) Sada 10 – 14

Sada 10 – 14 analogicky odpovídá Sadě 3 – 7, kdy bylo opět provedeno pět po sobě jdoucích stejných průjezdů z důvodu přesnějších statistických výsledků získaných při následném vyhodnocení dat. Rozdílem zde je použitá sestava 5T (viz. tab. 4.3)

5) Měření 30, 31

Tyto dva analogické průjezdy byly provedeny, aby bylo možné zkoumat faktoriální vliv více faktorů na měřené síly provázející proces obrábění. Tyto vlivy jsou dále více popsány v části vyhodnocení (kap. 5.3).

Následující tabulka obsahuje přehled všech měření prováděných na prvním materiálu, tedy materiálu s povrchovou vrstvou vyráběného tažením. Jednotlivá měření jsou v tabulce uspořádána podle pořadí, v jakém byla postupně prováděna. Každé číslo měření odpovídá jeho pořadí. Jednotlivé výše popsané skupiny analogicky odpovídajících si měření jsou v tab. 4.8 odlišeny barevně.

Tab. 4.8 Podmínky frézování jednotlivých měření na Ti64.

Číslo měření	Označení sestavy nástroj vs. upínač (viz. tab. 4.3)	Frézování vč. povrchové vrstvy	a_p [mm]
1	4W	ANO	4
2	4W	NE	4
3	4W	ANO	8
4	4W	ANO	8
5	4W	ANO	8
6	4W	ANO	8
7	4W	ANO	8
8	5T	ANO	4
9	5T	NE	4
10	5T	ANO	8
11	5T	ANO	8
12	5T	ANO	8
13	5T	ANO	8
14	5T	ANO	8
15	4T	ANO	4
16	4T	NE	4
17	5W	ANO	4
18	5W	NE	4
30	4T	ANO	8
31	5W	ANO	8

4.5.3 Test materiálu bez povrchové vrstvy – Ti55531

Na druhém materiálu bylo provedeno celkem deset měření. Zde šlo primárně o získání opakovaných měření při frézování postupně oběma nástroji. V první části došlo k frézování sady pěti po sobě jdoucích měření sestavou 4T. Následovalo obdobné testování, tedy druhá sada pěti průjezdů při použití sestavy 5W. Tento materiál v porovnání s předchozím popisovaným nemá viditelně rozeznatelnou povrchovou vrstvu lišící se od zbytku materiálu. Proto v tomto případě odpadá jakékoliv testování k určení rozdílů v zatížení mezi povrchem a hlubší částí polotovaru.

1) Sada 19 – 23

Tato sada pěti opakujících se měření byla provedena k získání informace o chování vlivu čtyřbřité frézy. Frézování proběhlo sestavou 4T, ovšem primárně byla tato sestava frézování realizována k získání dat pro porovnání s druhým testovaným materiálem při frézování stejným nástrojem. Tedy důležitou roli zde hraje hlavně nástroj.

2) Sada 24 – 28

Tento následující soubor měření analogicky odpovídá předchozí sadě 19 – 23. Jedinou změnou je sestava nástroje a upínače. I zde je měření prováděno s cílem získat více měření jedním nástrojem pro další porovnávání.

Níže uvedená tab. 4.9 obsahuje přehled všech měření, která byla provedena na druhém materiálu, tedy válcovaném polotovaru. Jednotlivé sady jsou v tabulce barevně odlišeny.

Tab. 4.9 Podmínky frézování jednotlivých měření na Ti55531.

Číslo měření	Označení sestavy nástroj vs. upínač (viz. Tab. 4.3)	a_p [mm]
19	4T	8
20	4T	8
21	4T	8
22	4T	8
23	4T	8
24	5W	8
25	5W	8
26	5W	8
27	5W	8
28	5W	8

5 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Před vyhodnocováním získaných dat byla nejdříve provedena filtrace dat pomocí vytvořených maker a funkcí v softwaru Microsoft Excel 2007. Po filtraci bylo provedeno několik statistických analýz, zpracovávaných ve statistickém softwaru Minitab 16. V následujících podkapitolách je provedeno zpracování dat, kdy při každé dílčí analýze je nejdříve aplikována popisná statistika na jednotlivé průjezdy, se kterými je v daném testu následně pracováno.

5.1 Analýza procesu frézování – filtrace klíčových dat

Podmínky, za kterých bylo frézováno lze využít pro základní identifikaci frézování. Zároveň díky jistým výpočtům lze globálně analyzovat data a zároveň získat některé další informace o nerovnoměrnosti rozdělení zubů fréz.

Každý jednotlivý průjezd poskytuje celkem 250000 hodnot v každém sloupci. Celkem obsahuje čtyři sloupce. První podává informaci o aktuální časové pozici, k níž jsou v následujících třech sloupcích přiřazena data o silách působících ve třech osách. První sloupec je tedy čas t , druhý je F_{xM} , třetí F_{yM} a čtvrtý F_{zM} . Práce se všemi těmito daty není pro účel správného porovnání vhodná, proto je provedena filtrace určitých klíčových hodnot. Cílem je vyhledat hodnoty, odpovídající maximálním zatížením jednotlivých zubů frézy v průběhu jedné otáčky.

5.1.1 Matematická identifikace – výpočtová analýza procesu

Před samotným zpracováním dat je vhodné určit několik charakteristik plynoucích z podmínek, za nichž byl test prováděn. Byly provedeny následující výpočty, z nichž nejdříve bylo nutné vypočítat otáčky, kterými bylo při testu frézováno.

Pro výpočet otáček byl použit následující vztah:

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D} \quad (3)$$

kde: n [min^{-1}] – otáčky frézy,

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

D [mm] – průměr frézy.

$$n = \frac{1000 \cdot 35}{\pi \cdot 16} = 696,3 \text{ min}^{-1}$$

Dle vypočteného vztahu vychází otáčky frézy $696,3 \text{ min}^{-1}$. Na stroji byla nastavena konstantní hodnota 700 min^{-1} .

Dále je možné určit dobu, za kterou se fréza otočí o 360° . Pro výpočet doby jedné otáčky byl použit vztah (4).

$$t_{ot} = \frac{60}{n} \quad (4)$$

kde: t_{ot} [s] – doba jedné otáčky frézy,

n [min^{-1}] – nastavené konstantní otáčky frézy.

$$t_{ot} = \frac{60}{700} = 0,085714285 \text{ s}$$

Počet naměřených hodnot reprezentujících jedno otočení frézy:

$$hod_{ot} = t_{ot} \cdot f = \frac{60}{n} \cdot f \quad (5)$$

kde: hod_{ot} [-] – počet hodnot reprezentujících jedno otočení frézy,

t_{ot} [s] – doba jedné otáčky frézy,

f [Hz] – vzorkovací frekvence,

n [min^{-1}] – nastavené konstantní otáčky frézy.

$$hod_{ot} = \frac{60}{700} \cdot 5000 = \frac{60}{7} \cdot 50 = 428,57$$

Počet hodnot, po kolika se fréza (jakýkoliv bod na vnější obvodové ploše nástroje) dostává do stejného bodu je přibližně 428,57. Jelikož se nejedná o celé číslo, není tedy možné vyfiltrovat z celého měření hodnotu jednoho konkrétního bodu opakujícího se po jedné otáčce, aniž by nedocházelo k postupnému posunutí. Bylo by tedy možné hledat pouze buď každou 428. nebo 429. hodnotu, přičemž díky velkému množství hodnot by mohlo docházet k velmi značným posunům.

Následující výpočet slouží k určení počtu měřených hodnot, po kolika se bod na nástroji dostane do matematicky přesně určené stejné pozice.

$$hod_{per} = hod_{ot} \cdot x_{ot} = t_{ot} \cdot f \cdot x_{ot} = \frac{60}{n} \cdot f \cdot x_{ot} \quad (6)$$

kde: hod_{per} [-] – počet hodnot po kolika je jeden určený bod ve stejné pozici,

hod_{ot} [-] – počet hodnot reprezentujících jedno otočení frézy,

x_{ot} [-] – počet otáček po kolika se určený bod dostane do stejného místa,

t_{ot} [s] – doba jedné otáčky frézy,

f [Hz] – vzorkovací frekvence,

n [min^{-1}] – nastavené konstantní otáčky frézy.

Po dosazení známých hodnot vzniká vztah, v němž zůstává neznámá x_{ot} .

$$hod_{per} = \frac{60}{700} \cdot 5000 \cdot x_{ot} = \frac{60}{7} \cdot 50 \cdot x_{ot}$$

V případě, že za hod_{per} hledáme celé číslo, je po dosazení za hod_{ot} evidentní, že x_{ot} je číslo eliminující hodnotu ve jmenovateli vztahu. Proto je počet otáček x_{ot} po kolika se určený bod (v rámci dat) dostane do stejného místa roven sedmi.

$$hod_{per} = \frac{60}{7} \cdot 50 \cdot 7 = 3000$$

Dle x_{ot} lze určit dobu sedmi otáček dle vztahu (7). Výpočet je především kontrolní, tzn., hodnota musí být beze zbytku dělitelná číslem 0,0002, což je časový přírůstek záznamu dat, plynoucí ze vzorkovací frekvence.

$$t_{ot7} = t_{ot} \cdot x_{ot} = \frac{60}{n} \cdot x_{ot} \quad (7)$$

kde: t_{ot7} [s] – doba sedmi otáček frézy,

t_{ot} [s] – doba jedné otáčky frézy,

x_{ot} [-] - počet otáček po kolika se určený bod dostane do stejného místa.

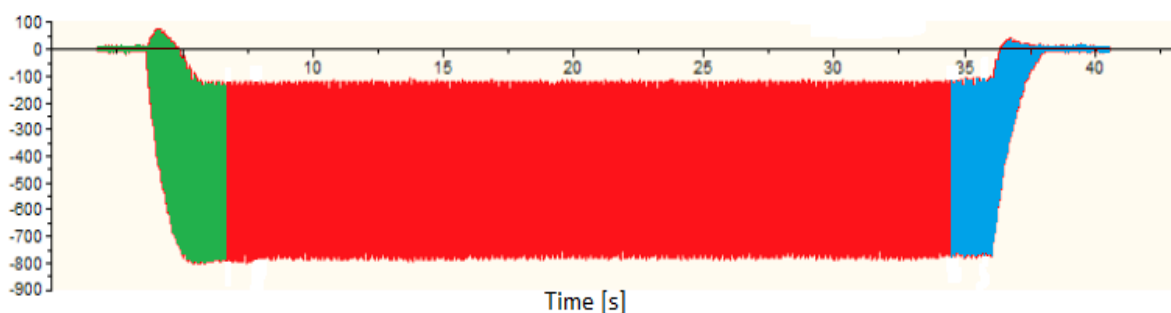
$$t_{ot7} = \frac{60}{700} \cdot 7 = 0,6 \text{ s}$$

Na základě vypočteného hod_{per} je známý počet hodnot, po kolika by se nástroj teoreticky měl dostávat do periodicky stejného místa.

5.1.2 Výběr oblasti dat pro zpracování

Každý průjezd byl samostatně filtrován. Data získaná testováním obou nástrojů jsou do jisté míry poměrně složitě filtrovatelná, jelikož oba nástroje mají nerovnoměrně rozloženy zuby po obvodu. Zároveň ale v obou případech nedochází k současnému záběru více břitů. Vždy je v záběru pouze jeden břit, i ve chvíli kdy zuby obou fréz nejsou rovnoměrně rozděleny.

Ve všech případech byl nejdříve ručním procházením dat nalezen okamžik, kdy se fréza poprvé dostává do kontaktu s obrobkem. První kontakt se mezi daty jeví jako první výraznější změna v měřených hodnotách. Tato změna byla hledána ve složce síly F_{yM} , jelikož v porovnání se složkou F_{xM} a F_{zM} zde dochází k první výrazné změně nejdříve. Od počátku této změny bylo provedeno posunutí o časový úsek tří sekund, které odpovídají přesně 35 otáčkám nástroje neboli 15000 hodnot. Po posunutí k této hodnotě byla všechna předchozí data smazána, tedy pro následnou analýzu neuvažována. Tento posun je nutný z důvodu náběhu sil na relativně ustálenou hodnotu, který není pro správné porovnání a většinu dalších vyhodnocení relevantní. Po smazání dat popisujících počáteční náběh bylo ručně určeno první maximum a všechna data před tímto okamžikem smazána. V tuto chvíli byl stanoven počátek dat, ze kterých proběhla vlastní filtrace (začátek červeně vyznačené oblasti). Oblast, která byla odříznuta na počátku každého měření, je vyznačena zeleně na obr. 5.1.



Obr. 5.1 Odříznutí dat náběhu a výběhu.

Jelikož na konci každého měření vzniká výrazně odlišný charakter dat, nebyl tento konec při výběru dat uvažován, podobně jako počáteční náběh. Od stanoveného počátku vyhodnocovaných dat byla aplikována filtrace vždy na následující úsek 28,6 sekund, odpovídající 143000 hodnot. Veškerá data za touto hranicí nebyla uvažována. V obr. 5.1 je tento konečný neuvažovaný úsek vyznačen modře. Červený úsek je oblast dat, z níž byla vybrána klíčová data.

5.1.3 Matematické určení okolí pro nalezení posunů mezi maximy břitů

Zuby čtyřbřité frézy GUHRING RF 100 F, stejně jako zuby pětibřité frézy KENNA-METAL HARVI II UDDE, nejsou rovnoměrně rozděleny po obvodu. Přesné informace o rozdělení šroubovitých drážek, zubů apod. na obvodu obou typů fréz nejsou k dispozici, nicméně v případě námi zvolené hodnoty $a_e = 4$ mm, nedochází při frézování nástrojem o průměru $D = 16$ mm k současnému záběru více břitů. Před přibližným hledáním mezer (posunů) mezi břitů je vhodné nejprve určit počet hodnot reprezentujících jednu čtvrtinu, resp. pětinu otáčky.

Stanovený počátek vyhodnocovaných dat (začátek červené oblasti viz. kap. 5.1.2, obr. 5.1) je vyhledané maximum složky F_{yM} (tedy i maximum výsledné síly F , jelikož příspěvek složky síly působící v ose y je výrazně největší) jednoho z břitů. Následně je vhodné stanovit velikost časového úseku k analogické hodnotě následujícího břitu. Takto dále najít časové úseky, v podobě počtu hodnot, mezi jednotlivými zuby. Pokud by byla vzdálenost naprosto stejná, tedy v případě rovnoměrně rozdělených břitů po obvodu nástroje, bylo by pro oba nástroje dostačující matematicky spočítat časový úsek mezi jednotlivými břitů dle vztahu (8), v němž v závislosti na fríze dochází ke změně počtu zubů.

$$t_{z4} = \frac{t_{ot}}{z} = \frac{\frac{60}{n}}{z} = \frac{\frac{60}{700}}{4} = 0,021428571 \text{ s} \quad (8)$$

$$t_{z5} = \frac{\frac{60}{700}}{54} = 0,017142857 \text{ s}$$

kde: t_{z4} [s] – doba otočení čtvrtiny frézy (pro čtyřbřitou frézu),

t_{z5} [s] – doba otočení pětiny frézy (pro pětibřitou frézu),

t_{ot} [s] – doba jedné otáčky frézy,

n [min^{-1}] – nastavené konstantní otáčky frézy,

z [-] – počet zubů frézy.

Dále potom teoretický počet hodnot popisujících jednu čtvrtinu otáčky lze vyjádřit:

$$hod_{ot/4} = t_z \cdot f = \frac{t_{ot}}{z} \cdot f = \frac{\frac{60}{n}}{z} \cdot f \quad (9)$$

Analogicky teoretický počet hodnot popisujících jednu pětinu otáčky dle:

$$hod_{ot/5} = t_z \cdot f = \frac{t_{ot}}{z} \cdot f = \frac{\frac{60}{n}}{z} \cdot f \quad (10)$$

kde: $hod_{ot/4}$ [-] – počet hodnot reprezentujících čtvrtinu otáčky frézy (počet hodnot mezi analogicky stejnými body na jednotlivých zubech),
 $hod_{ot/5}$ [-] – počet hodnot reprezentujících pětinu otáčky frézy (počet hodnot mezi analogicky stejnými body na jednotlivých zubech),
 t_z [s] – doba otočení čtvrtiny resp. pětiny frézy,
 f [Hz] – vzorkovací frekvence,
 t_{ot} [s] – doba jedné otáčky frézy,
 z [-] – počet zubů frézy,
 n [min^{-1}] – nastavené konstantní otáčky frézy.

$$hod_{ot/4} = \frac{60}{700} \cdot 5000 = 107,14$$

$$hod_{ot/5} = \frac{60}{700} \cdot 5000 = 85,71$$

Tento zjištěný počet hodnot reprezentujících čtvrtinu, resp. pětinu otáčky, lze využít pouze k nalezení orientačních pozic jednotlivých maxim. Při ruční kontrole dat, kdy byla u čtyřbřité frézy sledována vždy 107. případně 108. hodnota, byla potvrzena skutečnost nerovnoměrně rozdělených zubů tím, že tato hodnota není vždy maximální v průběhu zatížení jednoho záběru zubu frézy. Stejně tak i v případě druhého typu nástroje, tedy frézy s pěti břity, kdy byla sledována 85. příp. 86. hodnota. V některých případech je maximum o několik hodnot posunuté od pozice, která je vzdálena od maxima o $hod_{ot/4}$, resp. $hod_{ot/5}$. Ačkoliv rozdíl měřené síly mezi maximální hodnotou a údajem na pozici $hod_{ot/4}$ ($hod_{ot/5}$) se zpravidla pohybuje řádově v jednotkách N, v některých případech je díky většímu posunutí výraznější. Nalezení orientačních posunů mezi jednotlivými břity nelze provést výpočtem, je nutné je ručně nalézt. Následující kapitola se zabývá touto problematikou.

5.1.4 Orientační velikost posunů mezi zuby – analýza nerovnoměrnosti

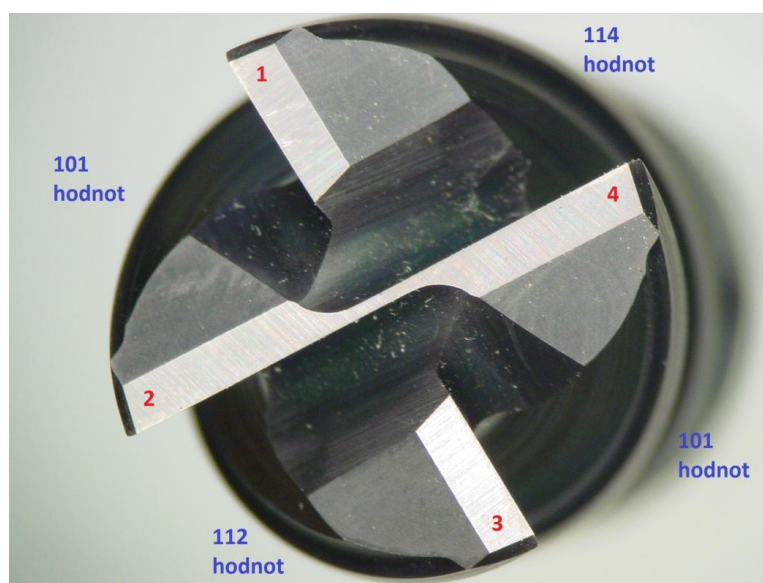
Orientační nalezení posunů mezi maximy břitů je nejprve provedeno pro nástroj se čtyřmi zuby. Poté stejně tak pro druhý nástroj.

Pro nalezení posunů mezi jednotlivými čtyřmi břity, tedy vzájemné vzdálenosti, byla nejprve od první maximální hodnoty, označené jako maximum břitu 1, nalezena další v pořadí maximální hodnota. Tato byla opakovaně 20x pozorována v různých místech souboru F_{YM} . Výsledný posun od maxima břitu 1 k maximu břitu 2 je průměrná hodnota posunutí vypočtená ze všech dvaceti pozorování. Stejným způsobem proběhlo nalezení posunu k maximu břitů 3, 4 a kontrolní posun od maxima čtvrtého břitu k maximu prvního břitu následující otáčky. Součet počtu hodnot reprezentujících jednotlivé difference, se pohybuje v okolí hod_{ot} . Výsledné posuny v podobě počtu měřených hodnot je možné přepočítat na čas posunutí mezi břity. Hodnoty, časy i jejich výsledný kontrolní součet jsou uvedeny v tab. 5.1.

Tab. 5.1 Počet hodnot mezi analogicky stejnými maximy břitů frézy GUHRING - RF 100 F.

Posun mezi břity č.	1 – 2	2 – 3	3 – 4	4 – 1	součet
Počet hodnot zákl. souboru [-]	101	112	101	114	428
Čas posunu [s]	0,0202	0,0224	0,0202	0,0228	0,0856

Pro lepší přiblížení této problematiky zobrazuje obr. 5.2 výsledné určené počty hodnot na použité fréze. Červeně jsou očíslovány jednotlivé zuby frézy, zatímco modře je mezi jednotlivými dvojicemi uveden počet měřených hodnot reprezentující posun k analogicky stejnému místu. Z obrázku lze jasněji vidět, že se v podstatě jedná o dvě dvojice přibližně stejných hodnot. Lze tedy předpokládat, že břity jsou jistým způsobem rozděleny symetricky, kdy dvě stejné mezery leží naproti sobě.



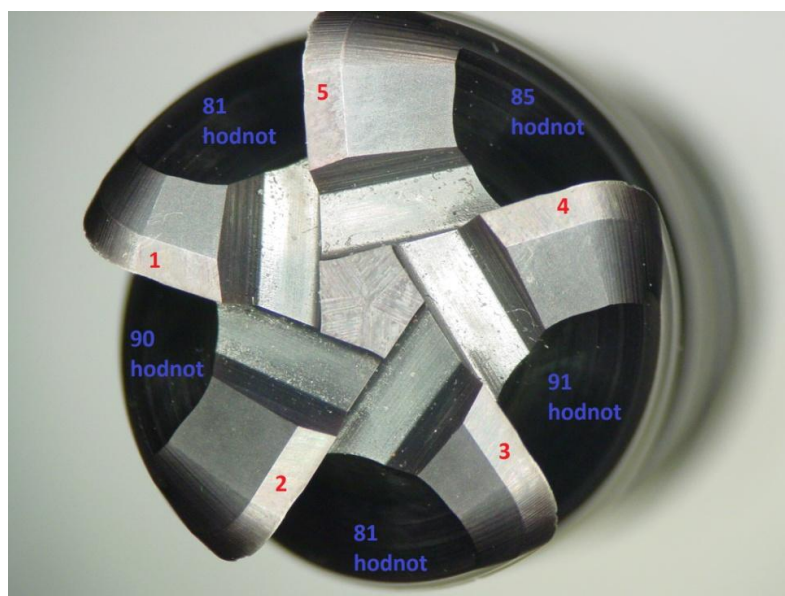
Obr. 5.2 Rozložení zubů na fréze GUHRING - RF 100 F popsané počtem hodnot.

Stejným způsobem proběhlo nalezení těchto úseků mezi břity v případě frézy KENNAMETAL HARVI II UDDE. I zde lze vycházet z přibližného počtu hodnot (určený vztahem 10), kolem něhož se budou nacházet výsledné reálné posuny mezi jednotlivými břity. I zde následuje ruční hledání posunů mezi jednotlivými maximy souboru F_{YM} , které je 20x opakováno na různých místech datového souboru. Výsledné stanovené hodnoty uvádí tab. 5.2.

Tab. 5.2 Počet hodnot mezi analogicky stejnými maximy břitů frézy KENNAMETAL.

Posun mezi břity č.	1 – 2	2 – 3	3 – 4	4 – 5	5 – 1	součet
Počet hodnot základního souboru [-]	90	81	91	85	81	428
Čas posunu [s]	0,0180	0,0162	0,0182	0,0170	0,0162	0,0856

Obr. 5.3 poskytuje přehlednější informaci o zjištěných počtech hodnot popisujících oblast mezi maximy F_{YM} dvou sousedních zubů. I v tomto případě kontrolní součet vychází stejně.



Obr. 5.3 Rozložení zubů na fréze KENNAMETAL popsané počtem hodnot.

Tyto mezery popsané počtem hodnot lze brát pouze jako orientační a nelze je dále přesně přepočítat na skutečné rozměry, tedy úhlové rozteče zubů fréz. Na základě těchto hodnot nelze provést filtraci způsobem vybírání hodnot po konstantním skoku v souboru dat. Při hledání těchto orientačních posunů bylo zjištěno, že dochází k jejich odlišnostem, tedy nejsou ve významném počtu případů stejné. I po zkušební aplikaci filtru, který hledal vždy hodnotou opakující se po 3000 hodnotách ($\text{hod}_{\text{per}} = 3000$, viz. vztah 6), bylo zjištěno, že ani při této periodě, která by dle matematického určení měla přesně odkazovat na stejné místo, nenachází se vždy přesně na této pozici maximum. Při velkém množství dat může docházet k exportu hodnot, které jsou již velmi vzdálené hledaným maximům. Tato analýza rozdělení břitů po obvodu nástroje je tedy v tomto případě vhodná pouze pro orientační popsání míst, v jejichž okolí se v datových souborech vyskytují hledaná data. Pro samotné získání těchto dat je třeba využít spolehlivější metody.

5.1.5 Princip použitého filtračního nástroje

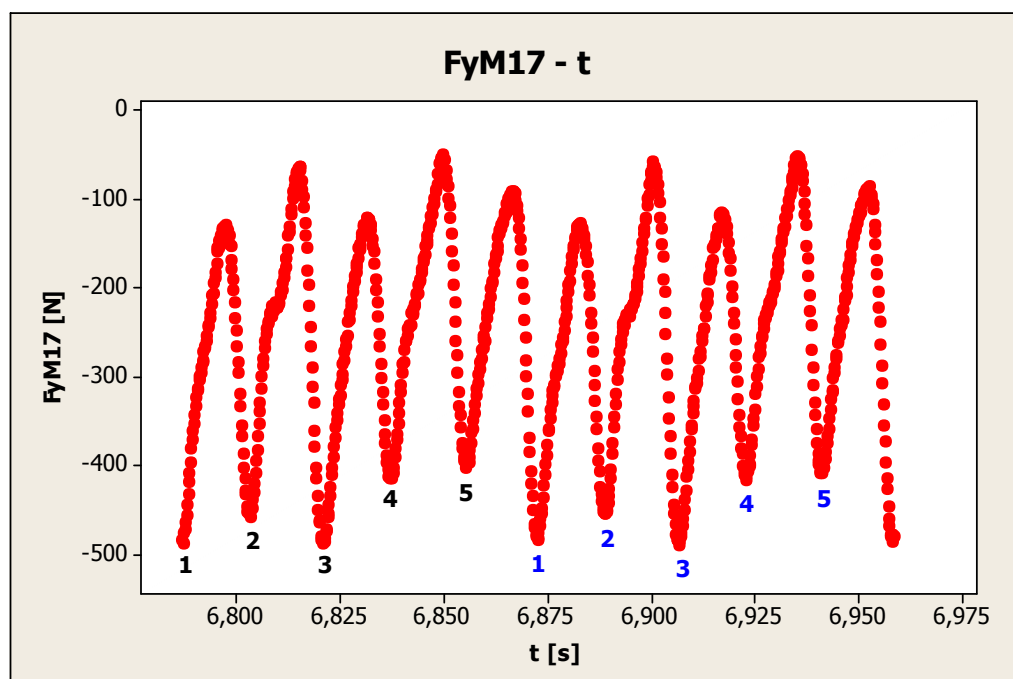
Finálně použitá metoda k filtraci nehledá data po přesně stanoveném kroku. K nalezení maxim byla vytvořena funkce a několik maker v softwaru Microsoft Excel. Principiálně, po spuštění vytvořeného filtru dochází k hledání lokálních maxim. Nástroj prohlíží okolí všech hodnot a hledá ty, které mají ve svém okolí splněno několik zadaných podmínek. Musí být splněno: Hodnota před a za zkoumanou hodnotou musí být menší, stejně tak to platí pro skupiny dvou, tří, čtyř a pěti hodnot. V některých případech dochází ke splnění všech těchto podmínek i v místech, kde není hledané maximum. Pro každý soubor dat je po vizuální kontrole nalezena hodnota, pod kterou se zkoumaný element nesmí nikdy dostat. Filtr tímto způsobem nalezne pouze maxima, která jsou klíčová. Častým jevem je výskyt několika maxim blízko sebe, za současného splnění těchto podmínek. Jedná se o hodnoty téměř stejných velikostí, rozdíl se většinou pohybují okolo jednoho Newtonu. Cílem je získat pouze jednu tuto hodnotu, proto bylo nutné aplikovat další podmínku, která zajistí vykopírování pouze jedné hodnoty v místě maxima. Po splnění všech těchto podmínek dokáže nástroj správně vybrat hodnoty maxim z každého souboru. Tímto způsobem je ze souboru získaného frézováním čtyřbřitou frézou vykopí-

rováno přibližně 1296 hodnot v každém ze čtyř sloupců, ze souborů pětibřité frézy přibližně 1620. Tato data dále slouží jako základ pro vyhodnocení. Pro každý soubor byla provedena namátková kontrola těchto vykopírovaných hodnot, především jejich pozice mezi daty základního souboru, přičemž bylo potvrzeno, že se přibližně vyskytují v okolí určených vzdáleností mezi zuby frézy (viz. tab. 5.1 a tab. 5.2).

Každý soubor byl před zpracováním finálně testován na výskyt statisticky významně odlehých hodnot. K tomuto byl využit Grubbsův test.

5.2 Analýza vybraných dat

Z vyfiltrovaných dat je třeba stanovit jednotlivé charakteristiky, které vstupují do dílčích analýz. Jedná se např. o průměr, směrodatnou odchylku nebo rozptyl. Jednotlivá porovnávání je třeba aplikovat vždy za stejných silových podmínek, tzn. porovnávat např. složky F_{yM} . Dále je třeba nějakým způsobem zohlednit jednotlivé břity. Jak lze vidět z obr. 5.4, každý ze zubů frézy je zatěžován jinak. Černě jsou očíslována jednotlivá maxima břitů v jedné otáčce, modře pak v následující otáčce frézy. Zatížení některých se více podobá, u jiných je odlišnost větší. Tyto rozdíly mohou být do jisté míry způsobeny právě nerovnoměrným rozložením zubů. Je tedy otázkou, zdali porovnávat např. nejvíce zatížený zub, nejméně apod. Jelikož zájemem je popsat celý proces frézování, tedy zatížení celé frézy, lze určit průměrnou hodnotu maximálního zatížení na zub v jedné otáčce. (Obdobným způsobem viditelným na obr. 5.4 jsou zatěžovány i zuby čtyřbřité frézy).



Obr. 5.4 Nestejné zatěžování zubů frézy KENNAMETAL HARVI II UDDE.

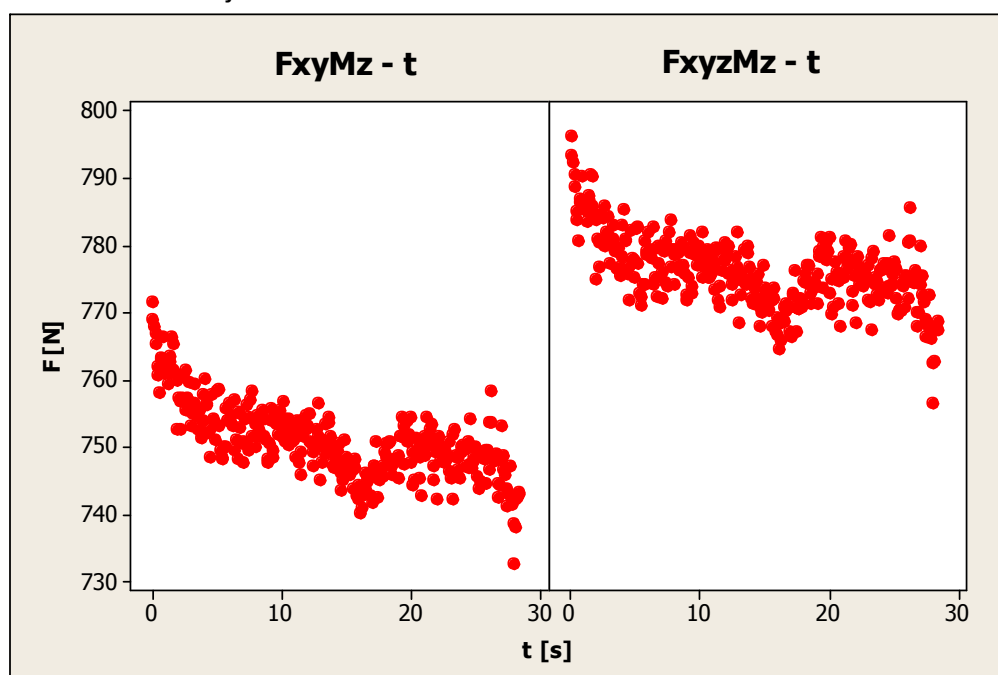
Jako základní vstup do analýz byla stanovena výsledná měřená síla F_{xyzM} , tedy výslednice všech tří složek. Bylo by též možné analyzovat pouze výslednici měřených složek F_{xM} a F_{yM} , nicméně vliv složky F_{zM} (viz. kap. 5.2.1) zde hraje také nezanedbatelnou roli, proto je vhodné s ní počítat. Pokud není uvedeno jinak, každá hodnota vstupující do následujících analýz je tedy průměrná výslednice měřených složek síly F_{xyzM} působící na jeden zub v jedné otáčce, v místě maximálního zatí-

žení břitu (základně označená F_{xyzMz}). Pro zjednodušení je dále v práci F_{xyzMz} označována F_{vM} . Průměrné zatížení jednoho zubu nástroje bylo určeno již při filtraci dat, kdy tedy součet jednotlivých maxim v jedné otáčce je podělen počtem zubů. Použití průměru je potřebné také z důvodu měření dvěma nástroji s rozdílným počtem zubů. Počet výsledných hodnot každého souboru je tím pádem redukován z původních 143000 na 333. Po finální korektuře spočívající v odebrání několika koncových hodnot na 324. Ačkoliv se může na první pohled zdát, že došlo k velké redukci hodnot, kdy počet vybraných je přibližně 441x menší než počet hodnot základního souboru, je toto množství více než dostačující pro následně zpracovávané statistické analýzy.

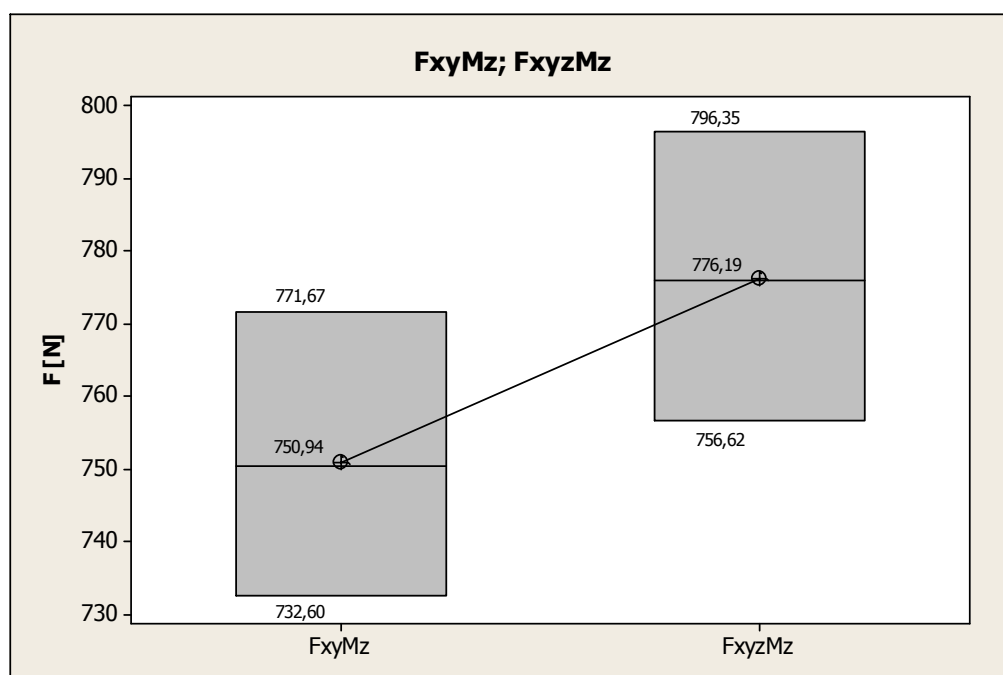
5.2.1 Velikost působení výslednic F_{xyMz} a F_{xyzMz}

Působení složky F_{zM} není zanedbatelné, proto je s ní potřeba počítat. Na obr. 5.5 je vizuálně znatelný rozdíl mezi bodovými grafy obou výslednic. Následující obr. 5.6 poskytuje porovnání krabicových grafů obou souborů hodnot. Průměr souboru F_{xyzMz} je od průměru dat F_{xyMz} posunut o více než 25 N. Podobné rozdíly lze zaznamenat i v případě maximálních, stejně tak minimálních hodnot.

Níže uvedené grafy na obr. 5.5 a obr. 5.6 dokazují, že zahrnutí složky F_z do dalších analýz má smysl. Pokud není uvedeno jinak, je dále pracováno s výslednicí všech tří měřených složek sil F_{xyzMz} (dále jev práci používáno značení F_{vM}), která podává informaci o maximálním průměrném zatížení jednoho zubu frézy. Přehled rozdílů charakteristik je v tab. 5.3.



Obr. 5.5 Bodový graf výslednic F_{xyMz} a F_{xyzMz} .

Obr. 5.6 Krabicový graf výslednic F_{xyMz} a F_{xyzMz} .Tab. 5.3 Rozdíly mezi charakteristikami souborů dat výslednic F_{xyMz} a F_{xyzMz} .

soubor	Průměr [N]	Směrodatná odchylka [N]	Min [N]	Q1 [N]	Medián [N]	Q3 [N]	Max [N]
F_{xyMz}	750,94	5,55	732,60	747,34	750,40	754,00	771,67
F_{xyzMz}	776,19	5,36	756,62	772,57	775,86	779,43	796,35

5.3 Porovnání kombinací nástrojů a upínačů při frézování Ti64

Polotovár vyráběný tažením z materiálu Ti64 se dle informací z firmy Frentech Aerospace s.r.o. obrábí hůře než druhý materiál Ti55531. Proto bylo u tohoto materiálu provedeno testování všech kombinací nástrojů a upínačů. Celkem je v následujících třech podkapitolách provedena analýza pro troje různé podmínky obrábění. tab. 5.4 poskytuje přehled jednotlivých skupin měření a k nim patřící podmínky obrábění.

Tab. 5.4 Podmínky porovnávaných skupin měření.

Data – měření č.	Použitá sestava*	a_p [mm]	Frézování vč. povrchové vrstvy
3	4W	8	ANO
30	4T		
31	5W		
10	5T		
1	4W	4	ANO
15	4T		
17	5W		
8	5T		
2	4W	4	NE
16	4T		
18	5W		
9	5T		

*Vysvětlení jednotlivých označení sestav – viz. tab. 4.3.

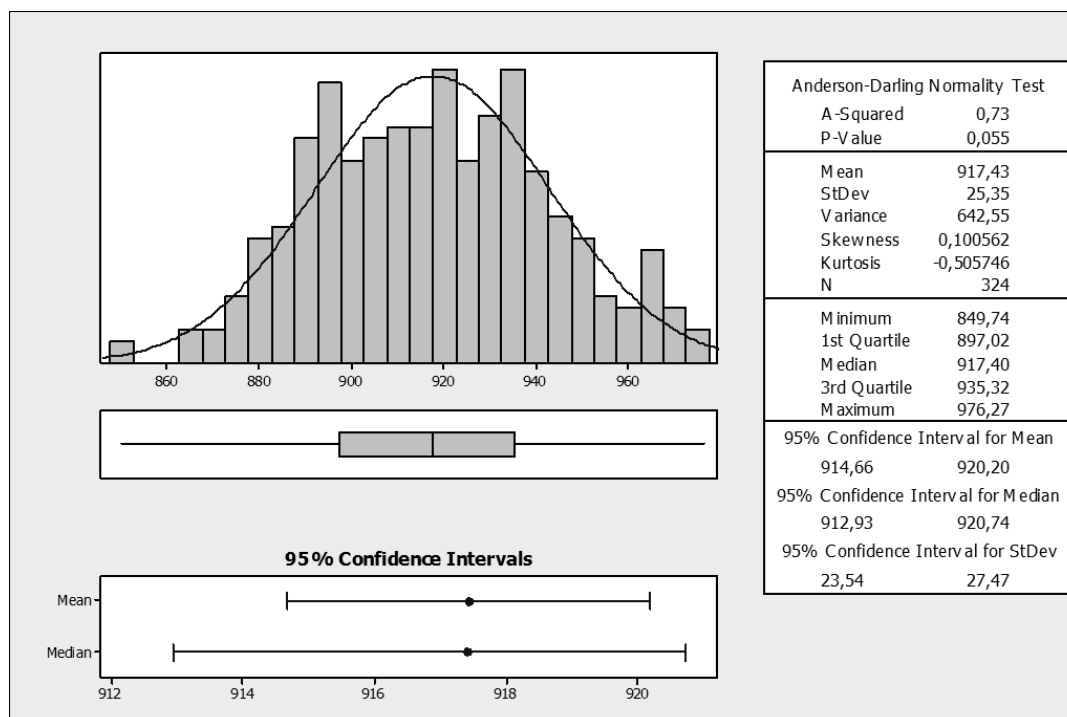
5.3.1 Obrábění včetně povrchové vrstvy za podmínky $a_p = 8$ mm

Tato kapitola poskytuje přehled o rozdílných charakteristikách datových souborů náležících měřením, kde byla frézována i povrchová vrstva za podmínky $a_p = 8$ mm. Nejprve je provedena analýza jednotlivých měření vstupujících do testu.

Interpretace dat z měření č. 3, 30, 31, 10

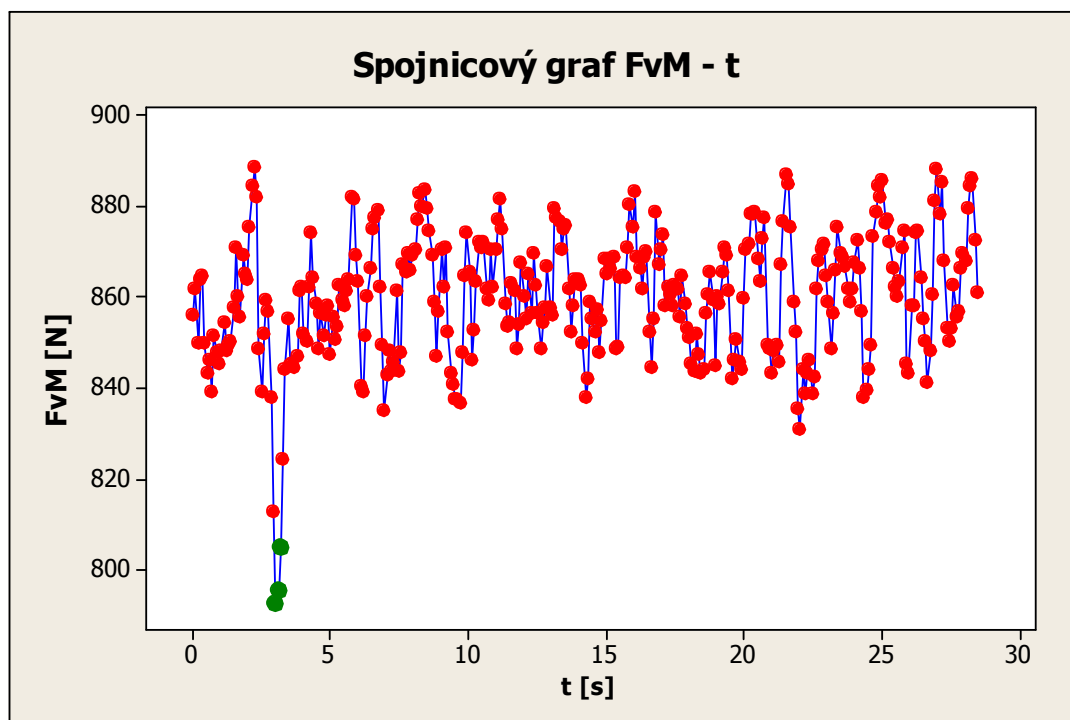
U každého ze souborů dat bylo popisnou statistikou určeno několik charakteristik. Základní vlastnost, kterou je třeba vždy určit, je normalita dat. Ne ve všech případech jsou data rozdělena normálně. Pro dále zpracovávanou analýzu tento fakt není stěžejní, nicméně přehled o rozdělení dat je třeba vždy provést. Základní charakteristiky popisné statistiky byly určeny pro data každého z měření zvlášť. Na následujících čtyřech grafech shrnutí jsou tyto zobrazeny.

Shrnutí – data č. 3 na obr. 5.7 ukazuje, že o těchto datech lze s pravděpodobností 95 % tvrdit, že jsou normální. Toto plyne z p-hodnoty, která je, byť jen o málo, větší než 5 %. Díky této skutečnosti bylo možné provést Grubbsův test pro nalezení statisticky významně odlišných hodnot, při němž nebyly žádné nalezeny.



Obr. 5.7 Shrnutí – data č. 3.

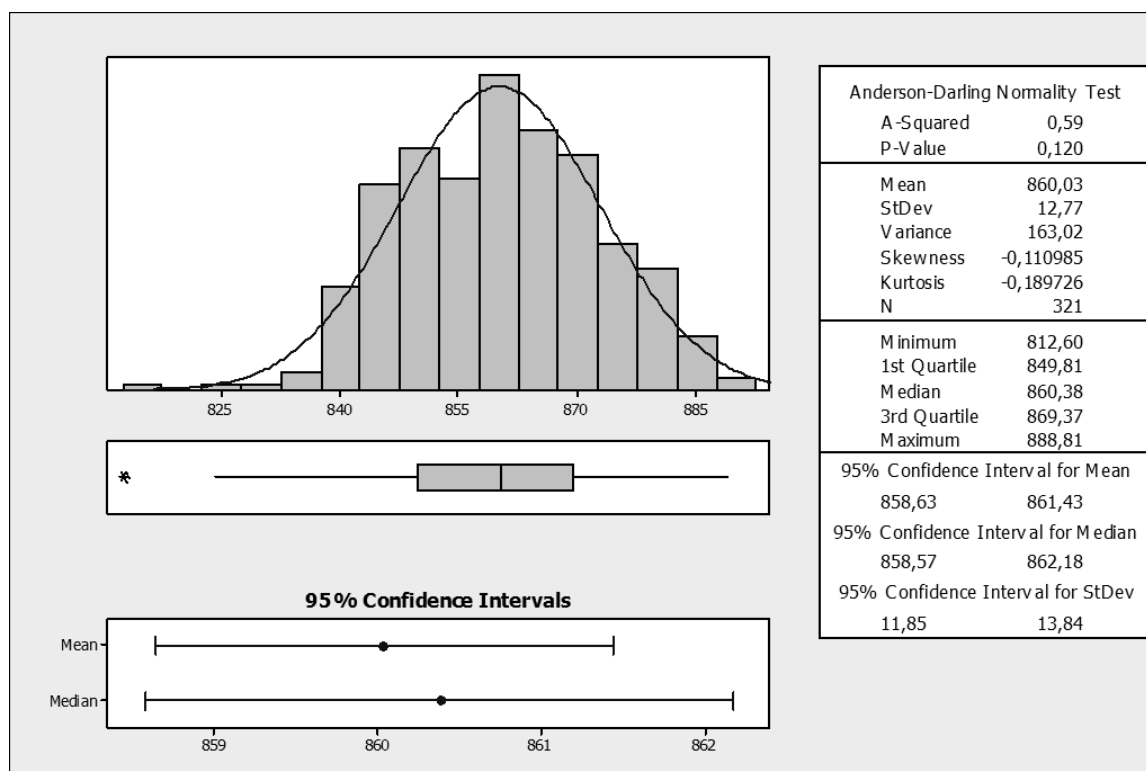
Shrnutí – data č. 30. Test normality ukázal p-hodnotu menší než 5%, hypotéza o normalitě dat byla zamítnuta. V případě dat, která nepochází s normálního rozdělení nelze relevantně aplikovat Grubbsův test. Je tedy pouze možné pohledem na data a dle vlastního uvážení případně viditelně velmi odlišné hodnoty odstranit. Na obr. 5.8 je spojnicový graf původních dat, kde jsou vyznačeny hodnoty, které byly vyhodnoceny jako lokálně odlehlé a následně odstraněny.



Obr. 5.8 Odstranění odlehlých hodnot – data č. 3.

Jelikož máme k dispozici dostatečně velké množství hodnot z dostatečně dlouhého průběhu frézování, je možné oblast těchto bodů považovat za odlehlou, jež nekorektně popisuje celý soubor. Důvod vzniku těchto bodů je diskutabilní, přičemž jeho zjištění by vyžadovalo další měření apod.

Po odstranění těchto odlehlých bodů je na novém shrnutí (obr. 5.9) viditelná p-hodnota větší než 5 %. Odstraněním bodů se rozdělení stává normálním.

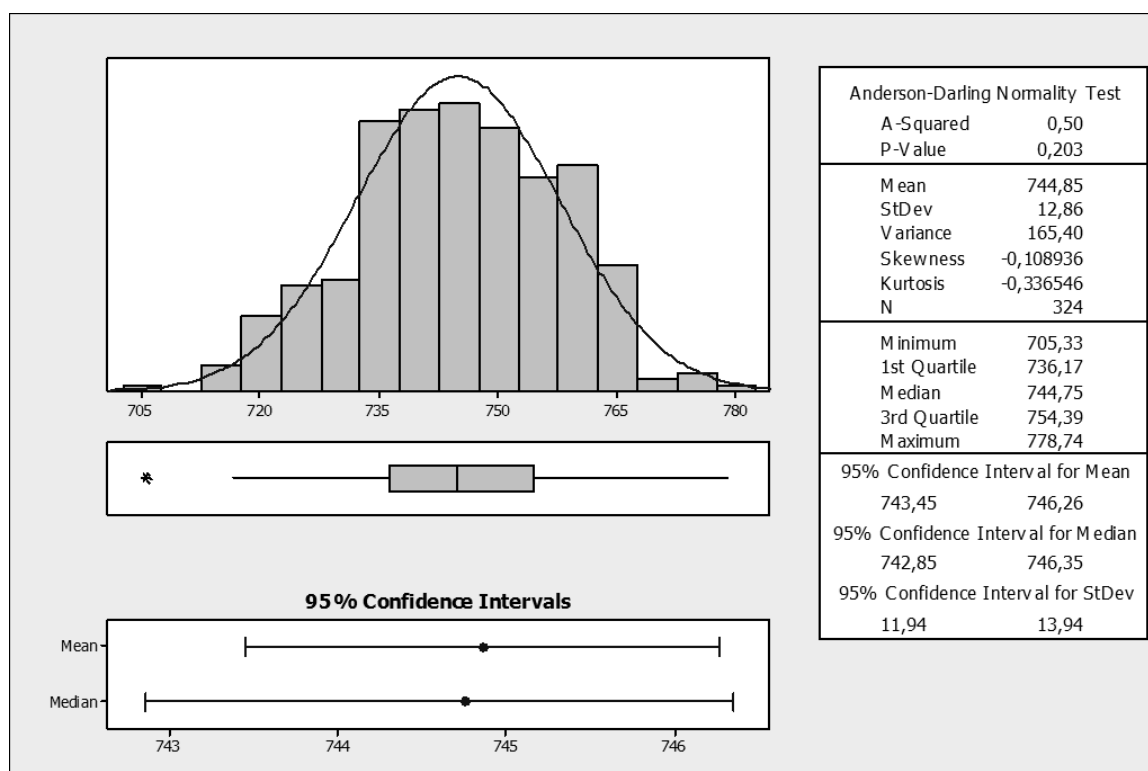


Obr. 5.9 Shrnutí – data č. 30.

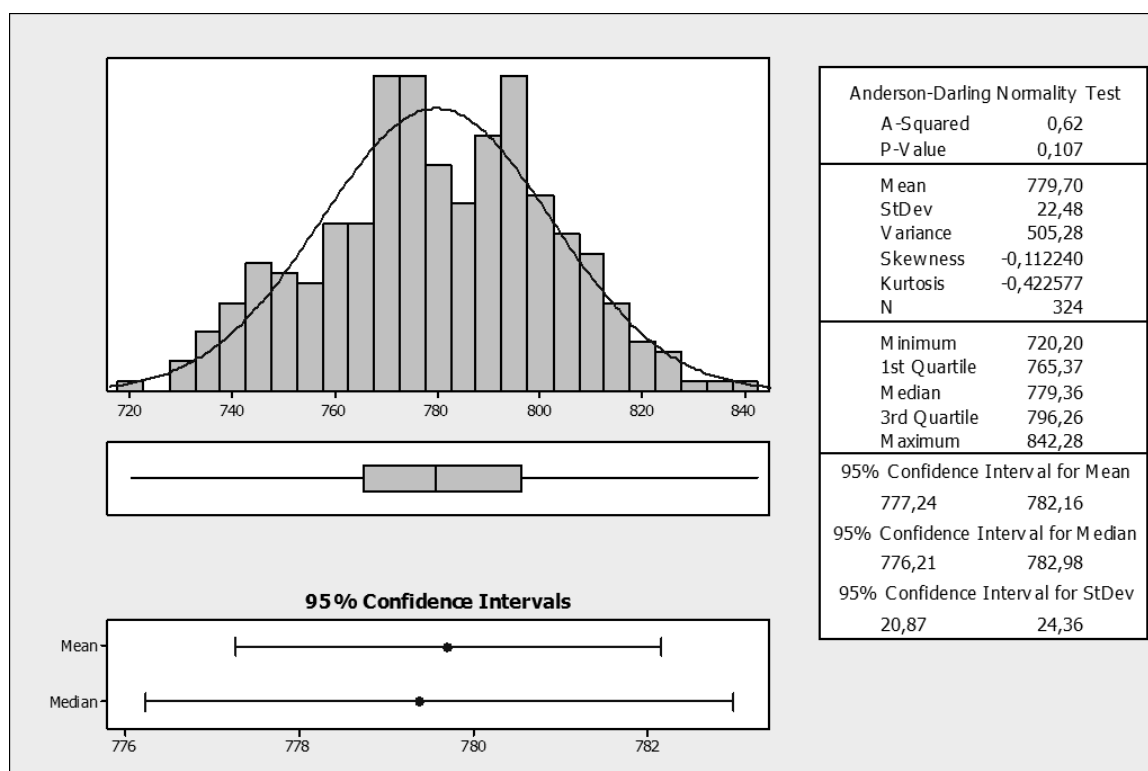
Shrnutí – data č. 31. Test prokázat, že data pochází z normálního rozdělení, při rozhodující p-hodnotě = 0,203, tedy větší než 5%. V tomto případě nebyly nalezeny žádné statisticky významně odlehlé hodnoty, vhodné k odstranění. Všechny charakteristiky jsou na obr. 5.11.

Shrnutí – data č. 10 je na obr. 5.11. Poslední soubor, v této části analyzovaný, je soubor dat z měření č. 10. I zde jsou data rozdělena normálně na hladině významnosti 5 %. P-hodnota = 0,107. I zde nebyly Grubbsovým testem nalezeny žádné odlehlé hodnoty.

Veškeré další počáteční interpretace datových souborů vstupujících do jednotlivých analýz jsou nadále prováděny vždy stejným způsobem. Z tohoto důvodu již v dalších případech analogických úvodních interpretací dat nejsou uváděny tyto zde zobrazené grafické výstupy, ale charakteristiky jsou pouze shrnuty v tabulce.



Obr. 5.10 Shrnutí – data č. 31.



Obr. 5.11 Shrnutí – data č. 10.

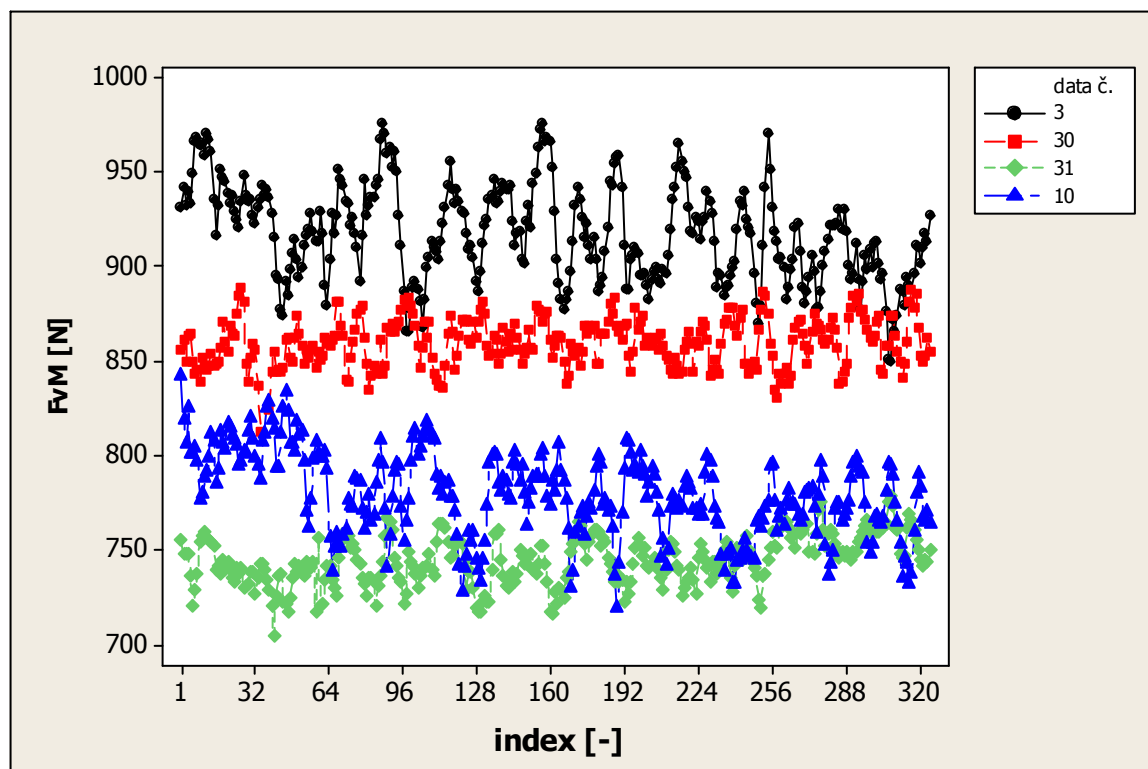
Výsledný přehled určených charakteristik je uveden v tab. 5.5. Některé z těchto zde zjištěných jsou výsledně porovnávány.

Tab. 5.5 Charakteristiky porovnávaných měření při $a_p = 8$ mm (vč. povrch. vrstvy).

Data – měření č.	Použitá sestava	p-hodnota	$\bar{x}$ [N]	s [N]	s^2 [N]	$\tilde{x}$ [N]	Rozsah [N]
3	4W	0,055	917,43	25,35	642,55	917,40	126,54
30	4T	0,120	860,03	12,77	163,02	860,38	76,21
31	5W	0,203	744,85	12,86	165,40	744,75	73,41
10	5T	0,107	779,70	22,48	505,28	779,36	122,08

Spojnicový graf jednotlivých měření

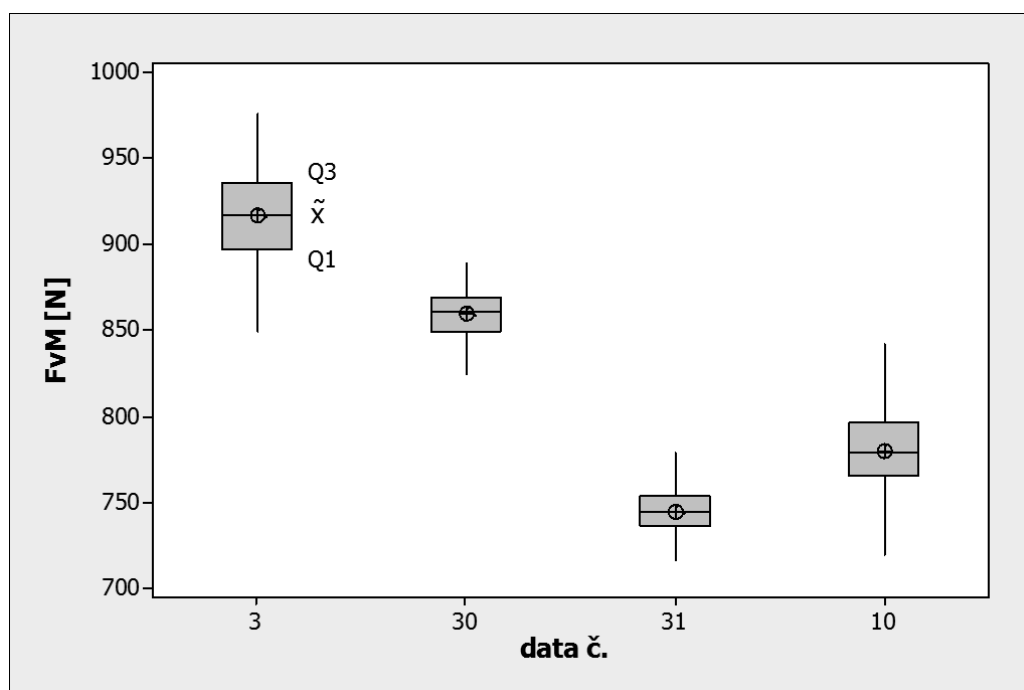
Pro počáteční identifikaci před jakýmkoliv vyhodnocením je vhodné vykreslit data ve společné časové závislosti, se stejným měřítkem. Tento je na obr. 5.12. Vizualně lze odlišit rozdíly ve variabilitách dat, stejně tak jejich odlišnou pozici. Přesné analýzy případných hypotéz je nutno ověřit, k čemuž slouží následující výstupy.



Obr. 5.12 Spojnicový graf – časová řada – data č. 3, 30, 31, 10.

Krabicový graf

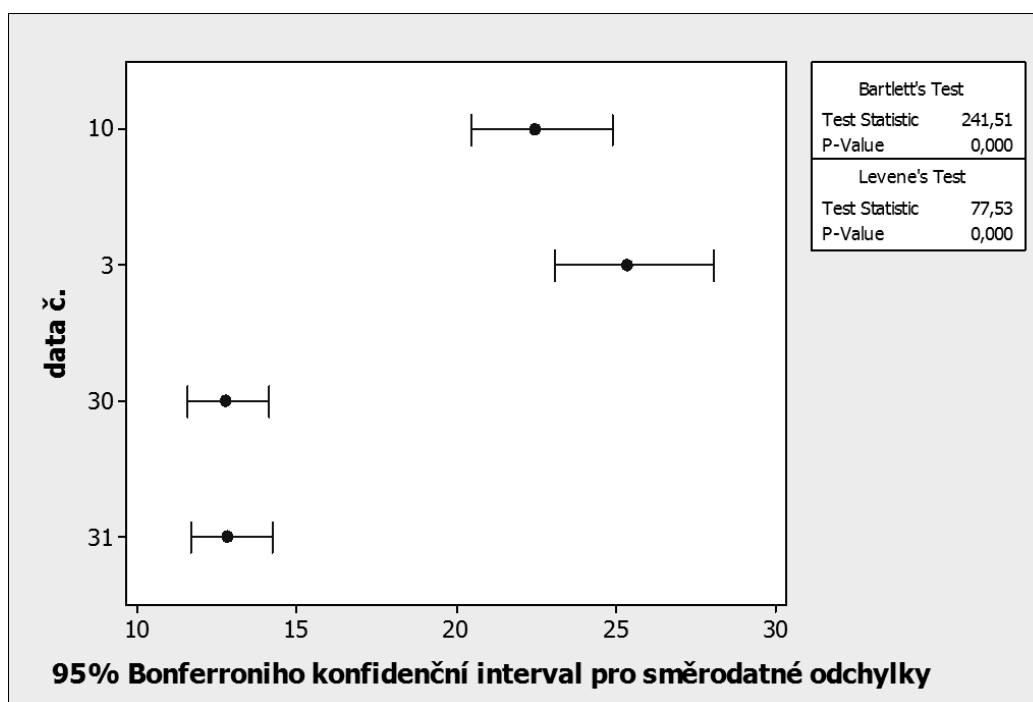
Jeden ze základních výstupů, kterým lze data porovnat je krabicový graf. Poskytuje základní pohled na odlišnost jednotlivých datových souborů. Odlišnost je znatelná na rozdílné poloze boxů. Spodní hrana boxu reprezentuje hodnotu prvního kvartilu, horní třetího. Úsečka uvnitř obdélníku je medián a kruhový symbol zobrazuje polohu průměru. Rozdílné velikosti boxů tedy souvisejí s variabilitou procesu. Z tohoto výstupu (obr. 5.13) po všech stránkách nejlépe vypadá měření č. 31, díky nejnižší pozici na ose y a zároveň i kvůli nejmenší velikosti boxu.



Obr. 5.13 Krabicový graf – data č. 3, 30, 31, 10.

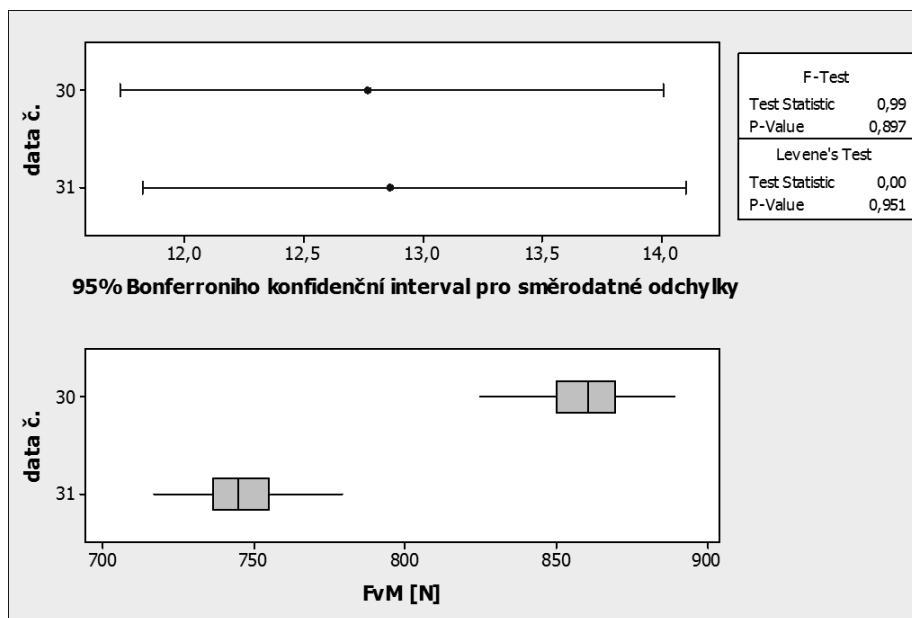
Test rovnosti rozptylů

Z krabicového grafu na obr. 5.13, potažmo již z tab. 5.5 lze vidět, že střední hodnota dat z měření č. 31 je jednoznačně nejnižší. Další v pořadí je poté měření č. 10. Pokud jde o správné vyhodnocení variability dat, je třeba provést samostatný test rovnosti rozptylů. Tento test vezme v úvahu rozptyly dat a vyhodnotí, zdali jsou některé statisticky významně odlišné.



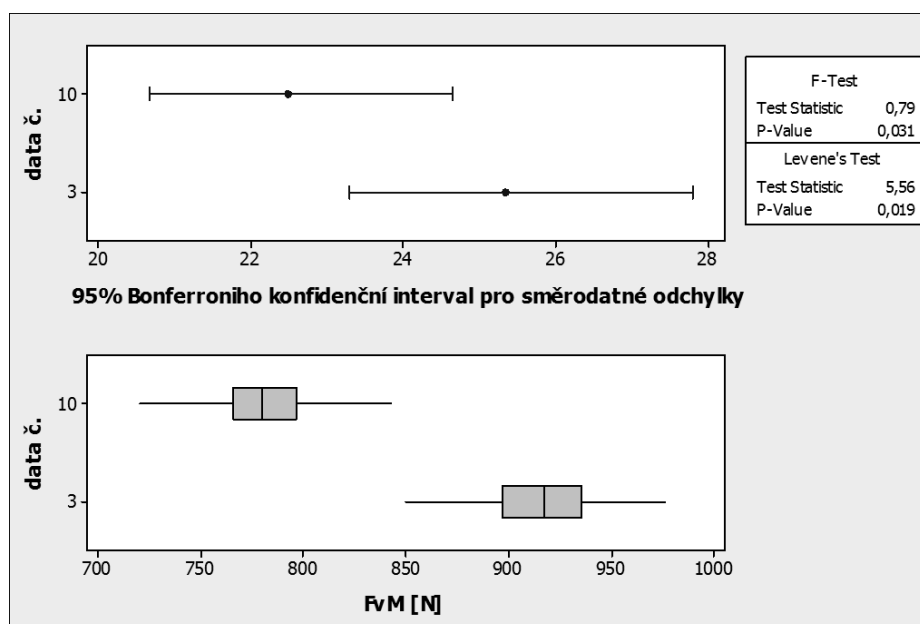
Obr. 5.14 Test rovnosti rozptylů – data č. 3, 30, 31, 10.

Pokud se data řídí normálním rozdělením, je rozhodující Bartlettův test, pro jiné spojité rozdělení Levenův test. Zde v obou případech jsou p-hodnoty menší než 5 %, proto alespoň jeden z rozptylů je významně odlišný. Z grafu (obr. 5.14) lze předpokládat, že rozptyly měření č. 30 a 31 nejsou významně odlišné, naproti tomu variability dat č. 3 a 10 mohou být odlišné. Oba tyto jsou zřejmě odlišné od měření č. 30 a 31. Tyto hypotézy je třeba jednotlivě ověřit.



Obr. 5.15 Test rovnosti rozptylů – data č. 30, 31.

Na obr. 5.15, kde byla testována rovnost rozptylů dat č. 30 a 31 jsou viditelné obě p-hodnoty větší, než 5 %. Nulová hypotéza o rovnosti rozptylů byla potvrzena. Data se svými rozptyly podobají, tyto tedy nejsou významně odlišné.



Obr. 5.16 Test rovnosti rozptylů – data č. 3, 10.

Test pro data č. 3 a 10 (obr. 5.16) naopak ukázal, že jejich rozptyly jsou navzájem významně odlišné.

5.3.2 Obrábění včetně povrchové vrstvy za podmínky $a_p = 4 \text{ mm}$

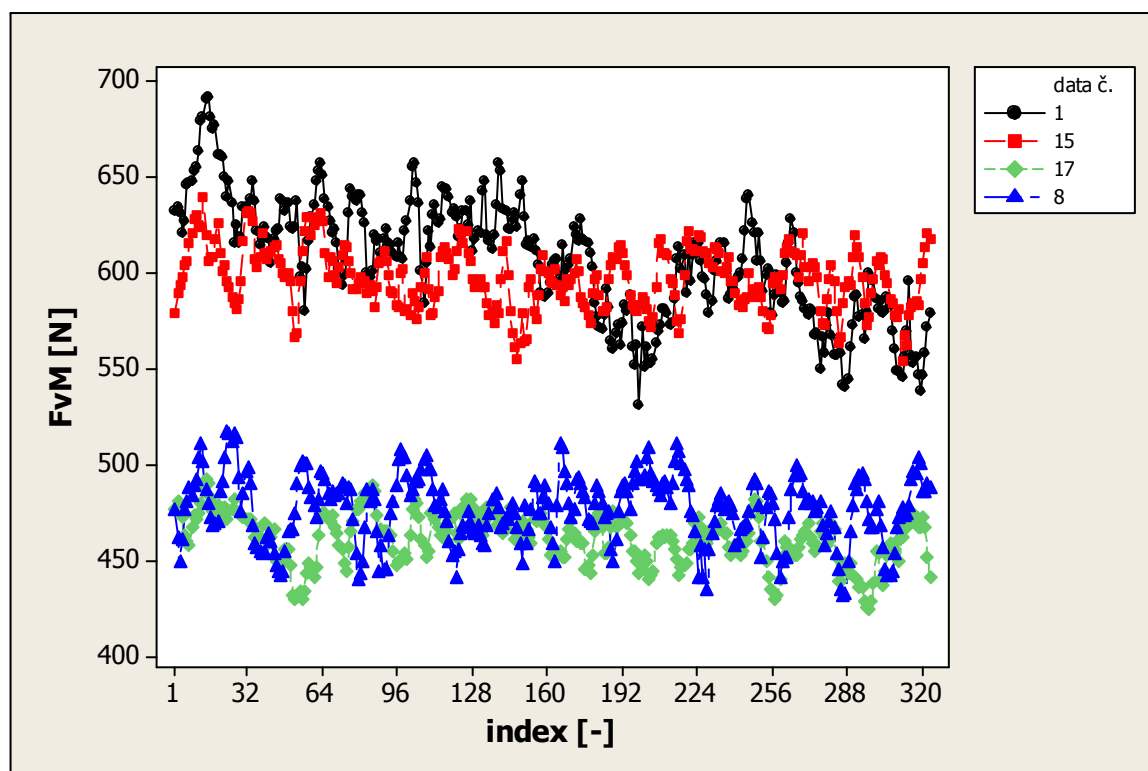
Při tomto vyhodnocování je postupováno stejně jako v kap. 5.3.1. Nejprve je provedena základní interpretace jednotlivých dat, porovnávaných v této kapitole. Výsledné charakteristiky jsou uvedeny v tab. 5.6.

Tab. 5.6 Charakteristiky porovnávaných měření při $a_p = 4 \text{ mm}$ (vč. povrch. vrstvy).

Data – měření č.	Použitá sestava	p-hodnota	$\bar{x}$ [N]	s [N]	s^2 [N]	$\bar{\dot{x}}$ [N]	Rozsah [N]
1	4W	0,015	607,18	30,79	947,90	610,23	160,59
15	4T	0,333	597,92	15,88	252,19	597,64	85,06
17	5W	<0,005	461,97	13,13	172,34	463,28	67,64
8	5T	<0,005	476,51	17,60	309,59	478,48	85,83

Spojnicový graf jednotlivých měření

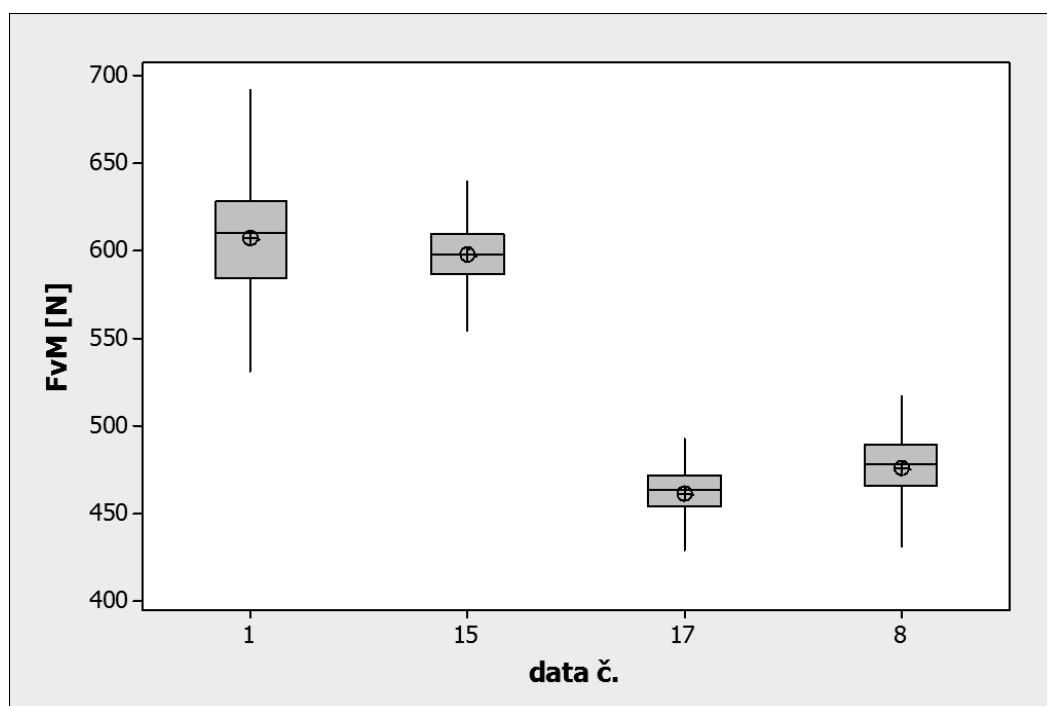
Pro představu o pozici dat na vertikální ose je nejprve vykreslen spojnicový graf všech měření. Jednotlivé řady jsou na obr. 5.17. Jednotlivé řady svými barvami odpovídají měřením v předchozí analýze (viz. obr. 5.12).



Obr. 5.17 Spojnicový graf – časová řada – data č. 1, 15, 17, 8.

Krabicový graf

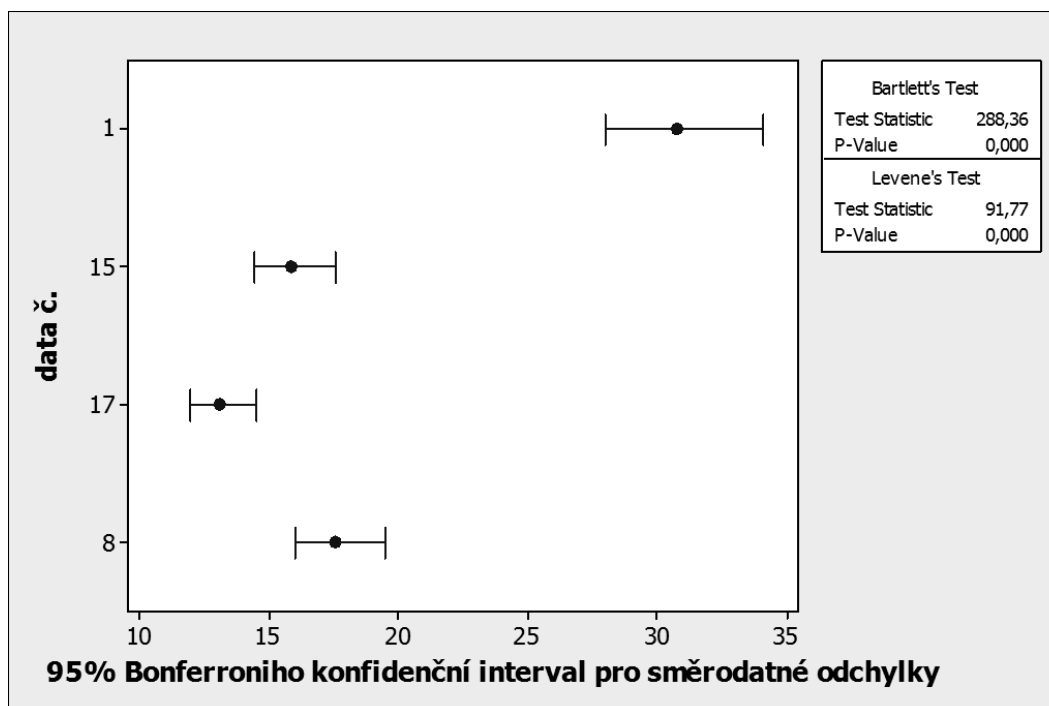
Krabicový graf (obr. 5.18) je v tomto případě do jisté míry obdobný jako při předchozí analýze. I zde jsou první dva boxy znatelně výše, než další dva.



Obr. 5.18 Krabicový graf – data č. 1, 15, 17, 8.

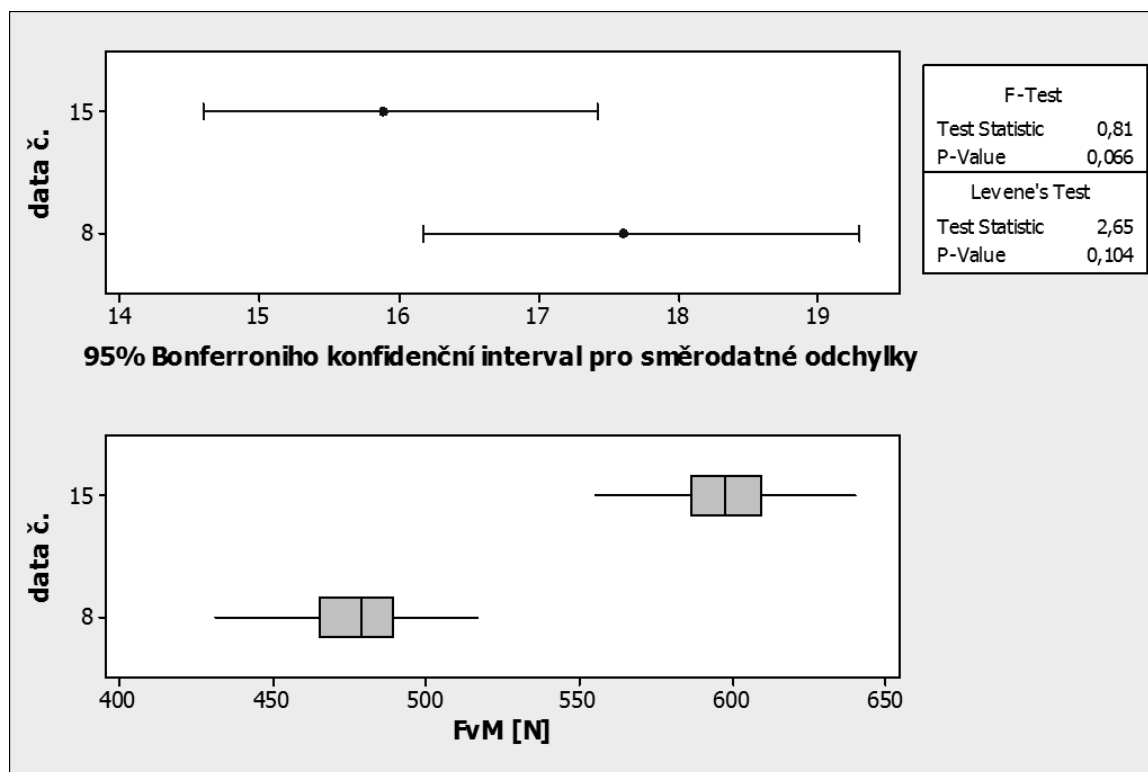
Test rovnosti rozptylů

Z grafu na obr. 5.18 lze rozpoznat nejmenší rozptyl u dat z měření č. 17. Skutečné rozdíly mezi jednotlivými soubory jsou nalezeny testem rovnosti rozptylů, který je proveden nejprve pro všechna měření. Obě p-hodnoty jsou menší než 5 %, minimálně jeden rozptyl je významně odlišný (viz. obr. 5.19).



Obr. 5.19 Test rovnosti rozptylů – data č. 1, 15, 17, 8.

Následně byly provedeny testy rovností rozptylů pro všechny možné kombinace dvojic a trojic datových řad. Bylo zjištěno, že pouze v jednom případě nejsou rozptyly významně odlišné, a to při porovnání měření č. 15 a 8. Jedná se tedy o měření, kdy bylo frézováno odlišnými nástroji, avšak stejnými upínacími. Test je na obr. 5.20.



Obr. 5.20 Test rovnosti rozptylů – data č. 15, 8.

5.3.3 Obrábění bez povrchové vrstvy za podmínky $a_p = 4 \text{ mm}$

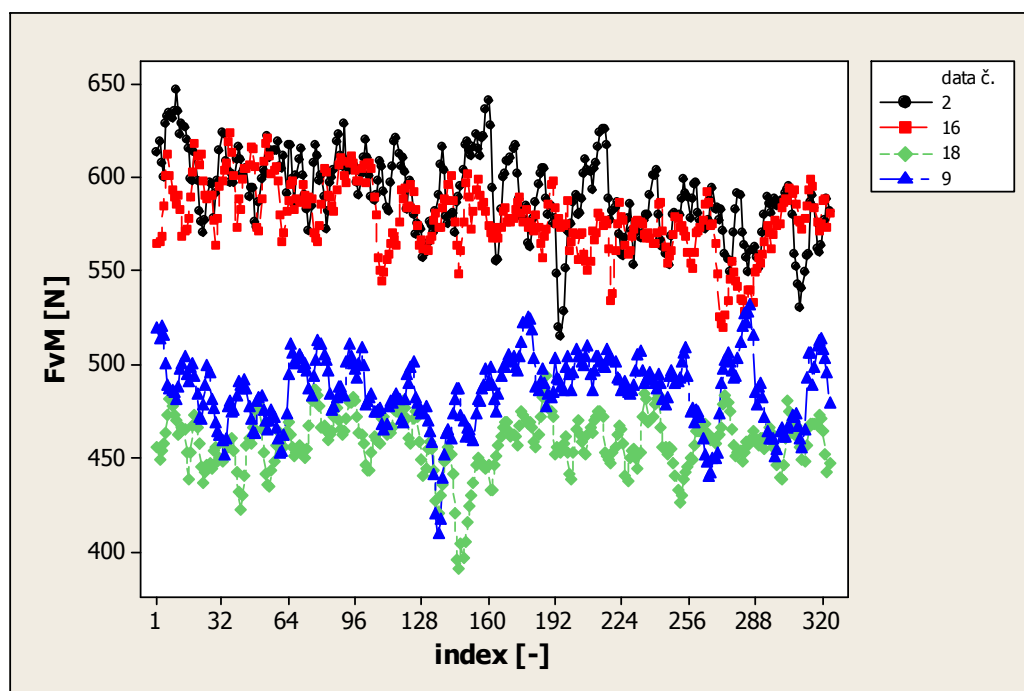
I zde je postupováno stejně jako v kap. 5.3.1. Na začátku je vyhodnocena základní interpretace jednotlivých dat, vstupujících do této analýzy. Zjištěné p-hodnoty, uvedené v tab. 5.7, ukazují, že pouze data č. 2 se řídí normálním rozdělením. Všechna ostatní nikoliv, proto na ně nelze aplikovat Grubbsův test odlehlých hodnot. V těchto případech byly odlehlé hodnoty vyhodnocovány pouze vizuálně.

Tab. 5.7 Charakteristiky porovnávaných měření při $a_p = 4 \text{ mm}$ (bez povrch. vrstvy).

Data – měření č.	Použitá sestava	p-hodnota	$\bar{x}$ [N]	s [N]	s^2 [N]	$\tilde{x}$ [N]	Rozsah [N]
2	4W	0,310	590,58	21,95	481,64	589,69	131,74
16	4T	0,014	578,64	19,01	361,38	577,12	103,58
18	5W	<0,005	458,30	15,28	233,33	459,24	103,12
9	5T	<0,006	485,75	18,79	353,18	487,30	122,37

Spojnicový graf jednotlivých měření

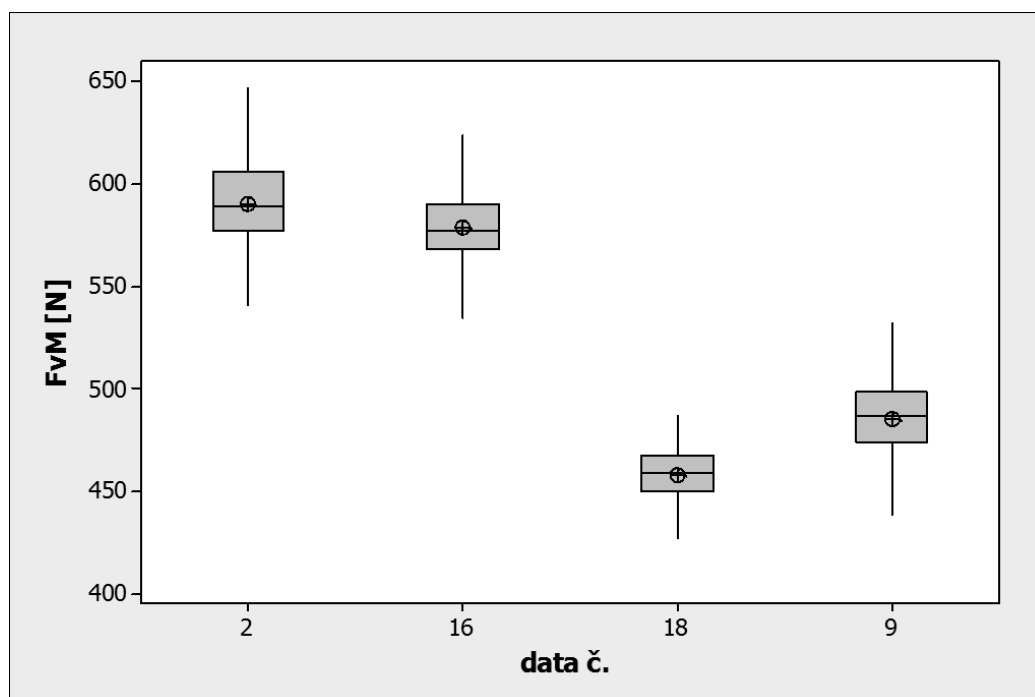
I zde byl nejprve vytvořen spojnicový graf, vytvářející náhled na porovnávaná data.



Obr. 5.21 Spojnicový graf – časová řada – data č. 2, 16, 18, 9.

Krabicový graf

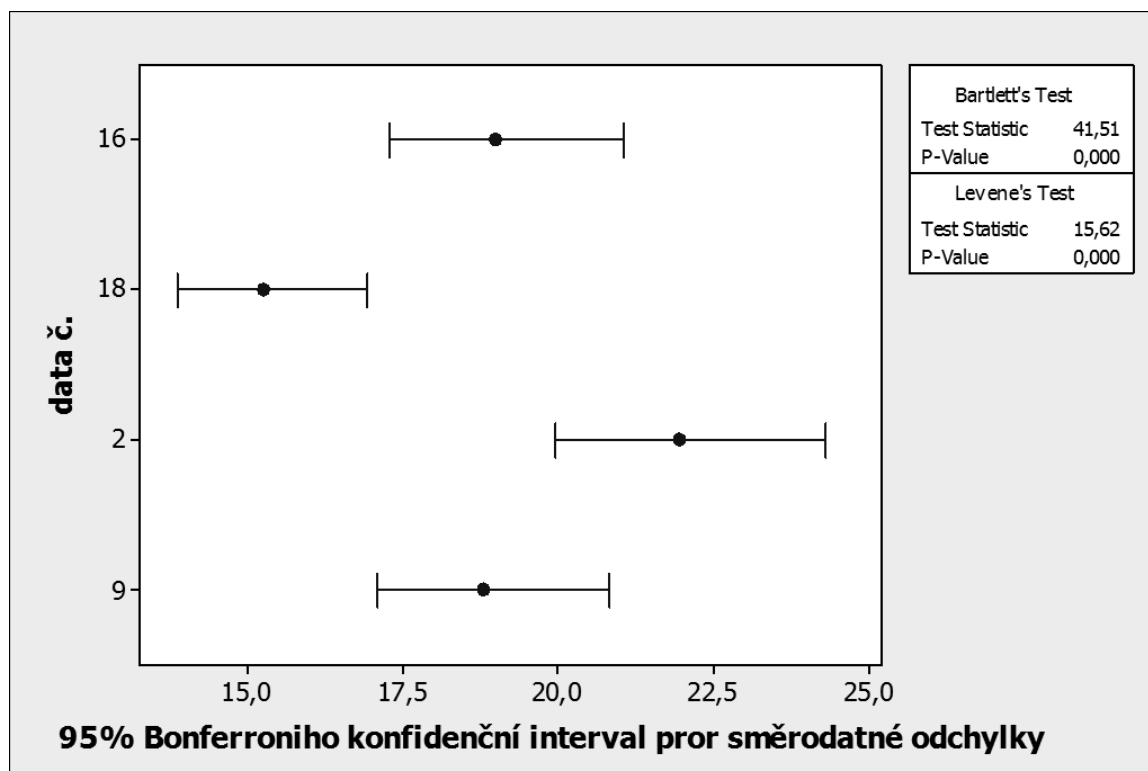
Krabicový graf na obr. 5.22 je velmi podobný předchozímu, tedy variantě, kdy docházelo k obrábění povrchové vrstvy.



Obr. 5.22 Krabicový graf – data č. 2, 16, 18, 9.

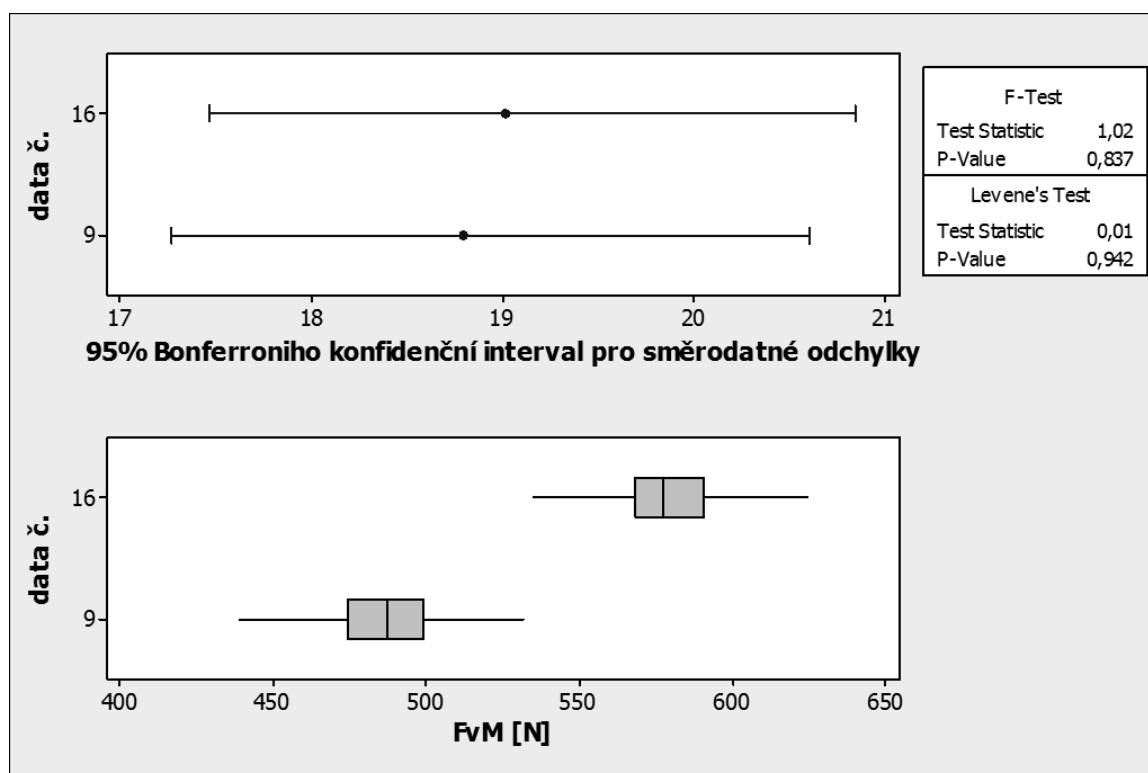
Test rovnosti rozptylů

V tabulce charakteristik porovnávaných měření (tab. 5.7) při frézování bez povrchové vrstvy lze vidět nejmenší hodnotu rozptylu ve třetím řádku, tedy pro případ, kdy bylo obráběno nástrojem s pěti zuby upnutým do weldonového upínače. Nicméně je nutné provést statistické vyhodnocení rovnosti rozptylů všech čtyř datových souborů (viz. obr. 5.23). Obě p-hodnoty jsou menší než 5 %, mezi rozptyly analyzovaných dat je alespoň jeden významně odlišný.



Obr. 5.23 Test rovnosti rozptylů – data č. 2, 16, 18, 9.

Dále byly tedy testovány všechny kombinace jednotlivých měření. I zde pouze v jednom případě dochází k rovnosti rozptylů. Nevýznamně odlišné rozptyly jsou mezi daty č. 16 a 9 (obr. 5.24). Jedná se o analogická měření porovnávaná v kap. 5.3.2, která se svými rozptyly též podobají.



Obr. 5.24 Test rovnosti rozptylů – data č. 16, 9.

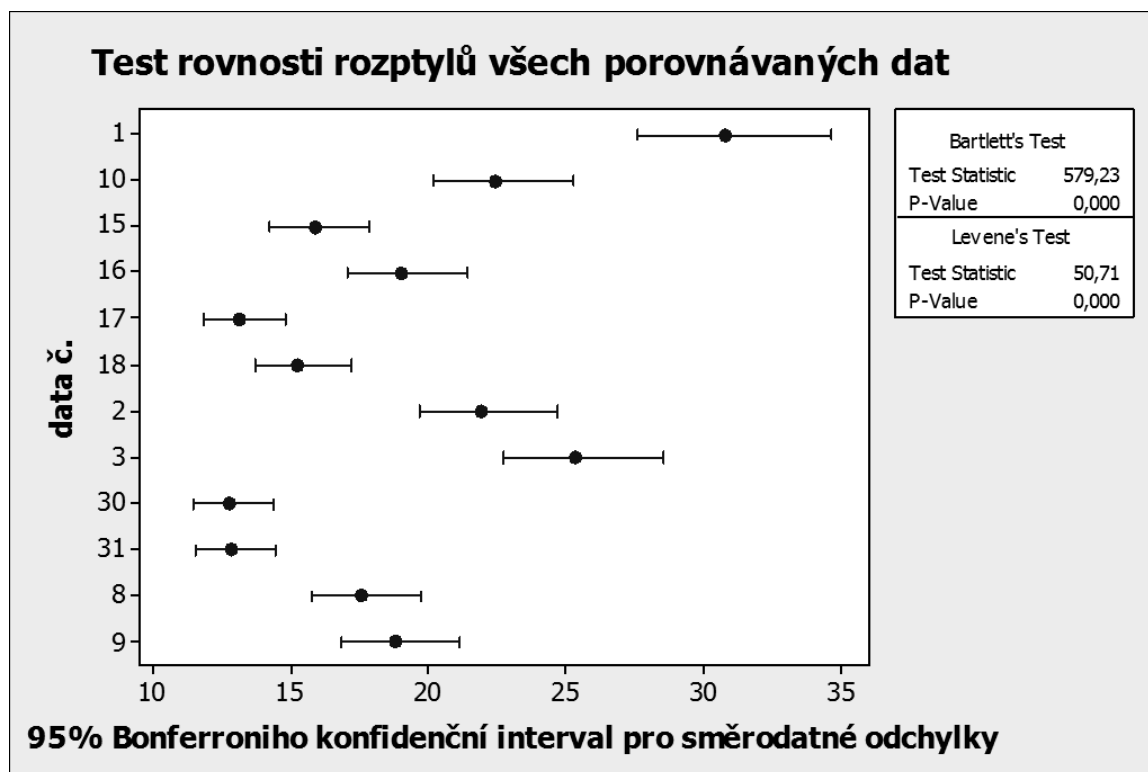
5.3.4 Variabilita – měření s/bez povrchové vrstvy a $a_p = 8$ mm vs. 4 mm

V kapitolách 5.3.1, 5.3.2 a 5.3.3 bylo zjištěno, které rozptyly dat se navzájem podobají a které ne. V jednotlivých případech test prokázal jednak vlastnosti dílčích datových souborů, kdy z tabulky charakteristik bylo zřejmé, která měření se vyznačují nejmenšími rozptyly, případně průměry. Každá z analýz porovnává soubory dat, získané obráběním za stejných řezných i materiálových podmínek, přičemž jednotlivě se liší kombinace nástrojů a upínačů. Po těchto jednotlivých testech je dále možné porovnat všechna tato data dohromady. V tab. 5.8 jsou uspořádány datové soubory do skupin podle jednotlivých sestav. Modře jsou seskupeny hodnoty náležící měřením týkajících se frézování při $a_p = 8$ mm, bíle $a_p = 4$ mm s povrchovou vrstvou a zeleně $a_p = 4$ mm bez vrstvy.

Tab. 5.8 Charakteristiky všech porovnávaných měření.

Použitá sestava	Data měření č.	$\bar{x}$ [N]	s^2 [N]	Použitá sestava	Data měření č.	$\bar{x}$ [N]	s^2 [N]
4W	3	917,43	642,55	4T	30	860,03	163,02
	1	607,18	947,90		15	597,92	252,19
	2	590,58	481,64		16	578,64	361,38
5W	31	744,85	165,40	5T	10	779,70	505,28
	17	461,97	172,34		8	476,51	309,59
	18	458,30	233,33		9	485,75	353,18

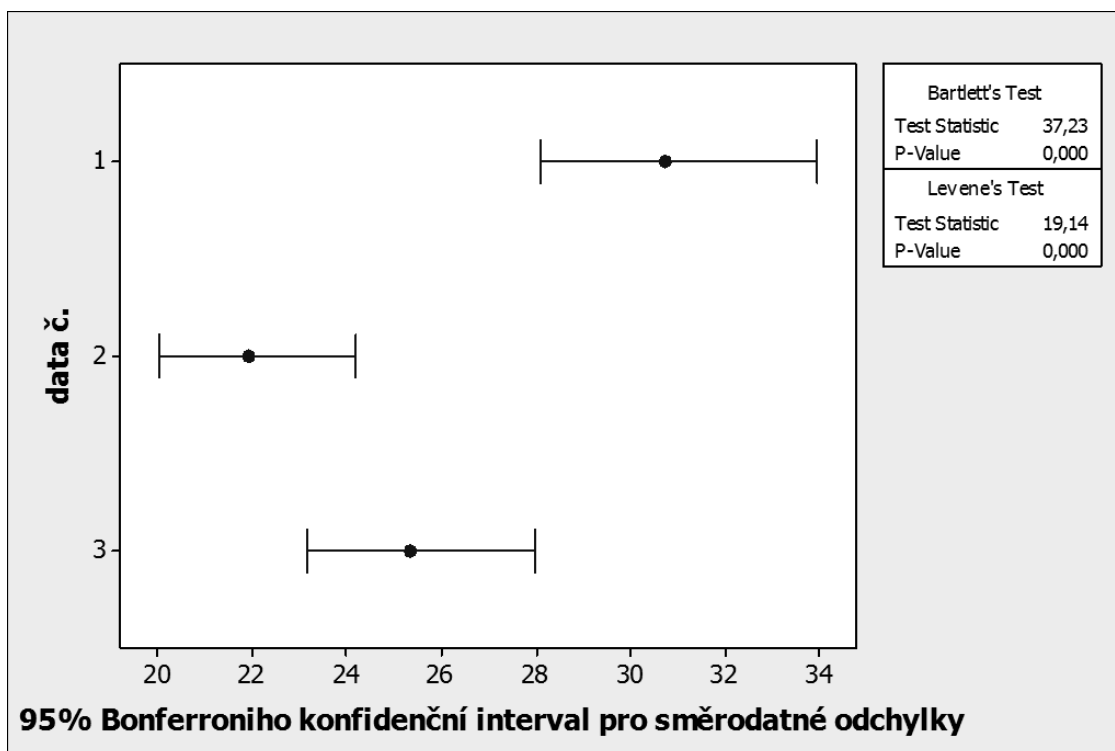
Nejdříve je možné provést test rovnosti rozptylů pro všechna měření. Na obr. 5.25, kde je zobrazen výsledek testu, je na první pohled zřejmé, že alespoň jeden z rozptylů je významně odlišný. Tento fakt potvrzují obě p-hodnoty menší než 5 %. Jednotlivě lze rozeznat vždy jisté dvojice, které jsou si podobné, ať už svými pozicemi nebo konfidenčními intervaly.



Obr. 5.25 Test rovnosti rozptylů – data č. 3, 30, 31, 10, 1, 15, 17, 8, 2, 16, 18, 9.

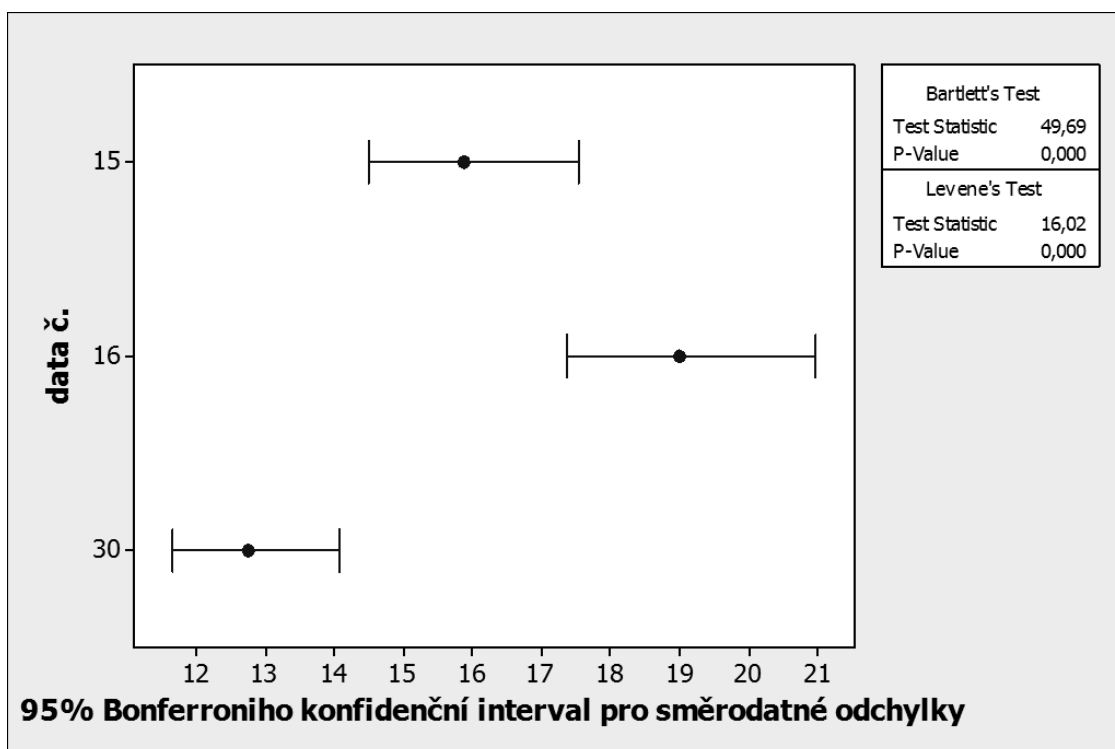
Následně je testována rovnost rozptylů u třech analogických měření. Tedy u měření stejným nástrojem i upínačem, při proměnných podmínkách. Tedy v prvním případě $a_p = 8$ mm při frézování včetně povrchové vrstvy, poté $a_p = 4$ mm jednak s povrchovou vrstvou a jednak bez ní.

Do porovnání rozptylů při frézování stejným nástrojem vstupují tři měření. Měření, která byla získána při frézování nástrojem se čtyřmi zuby upnutím ve weldonovém upínači jsou č. 1, 2 a 3. Na obr. 5.26 jsou testována všechna tři měření dohromady. Byly provedeny testy jednotlivých dvojic, přičemž v žádném případě nebyla zjištěna statisticky významná podobnost rozptylů. Lze vidět, že data č. 2 a 3 jsou si svými pozicemi blíže, než soubor č. 1.



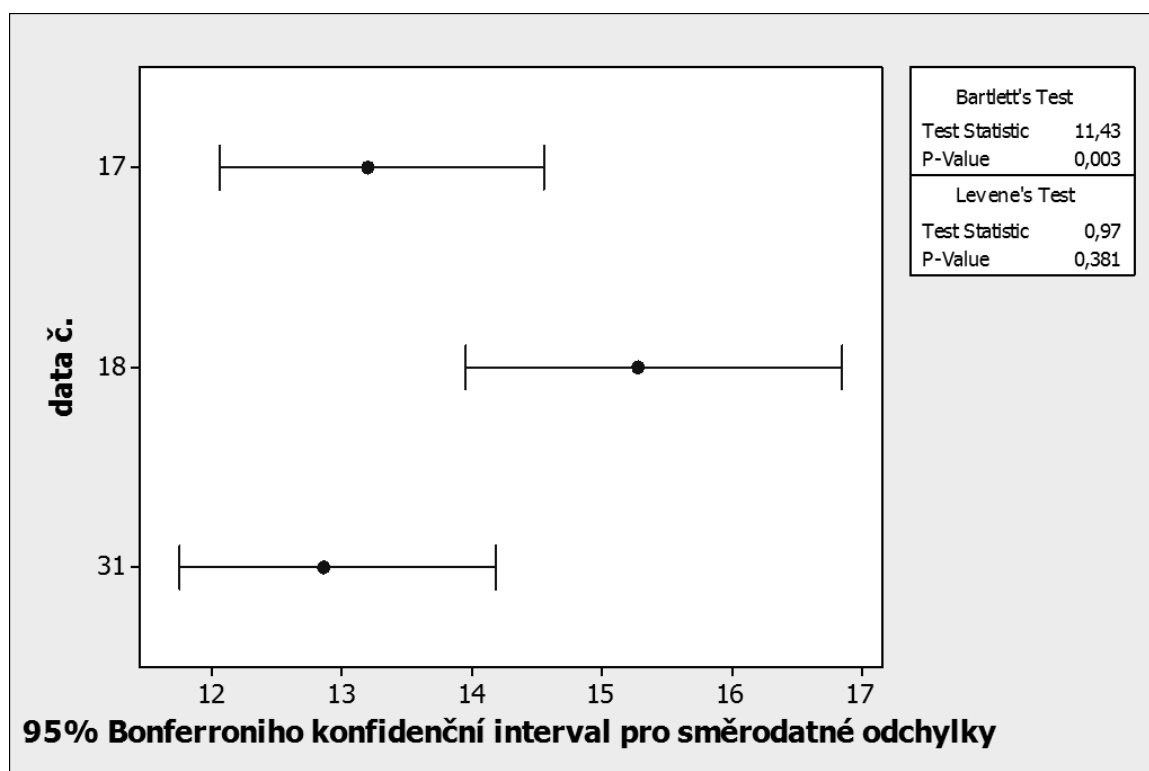
Obr. 5.26 Test rovnosti rozptylů – data č. 3, 1, 2.

Další skupina tří testovaných dat, jsou data z frézování čtyřbřitou frézou s použitím tepelného upínače. Jsou to data č. 30, 15 a 16. Ani v tomto případě nebyla v žádné z kombinací nalezena významná podobnost.



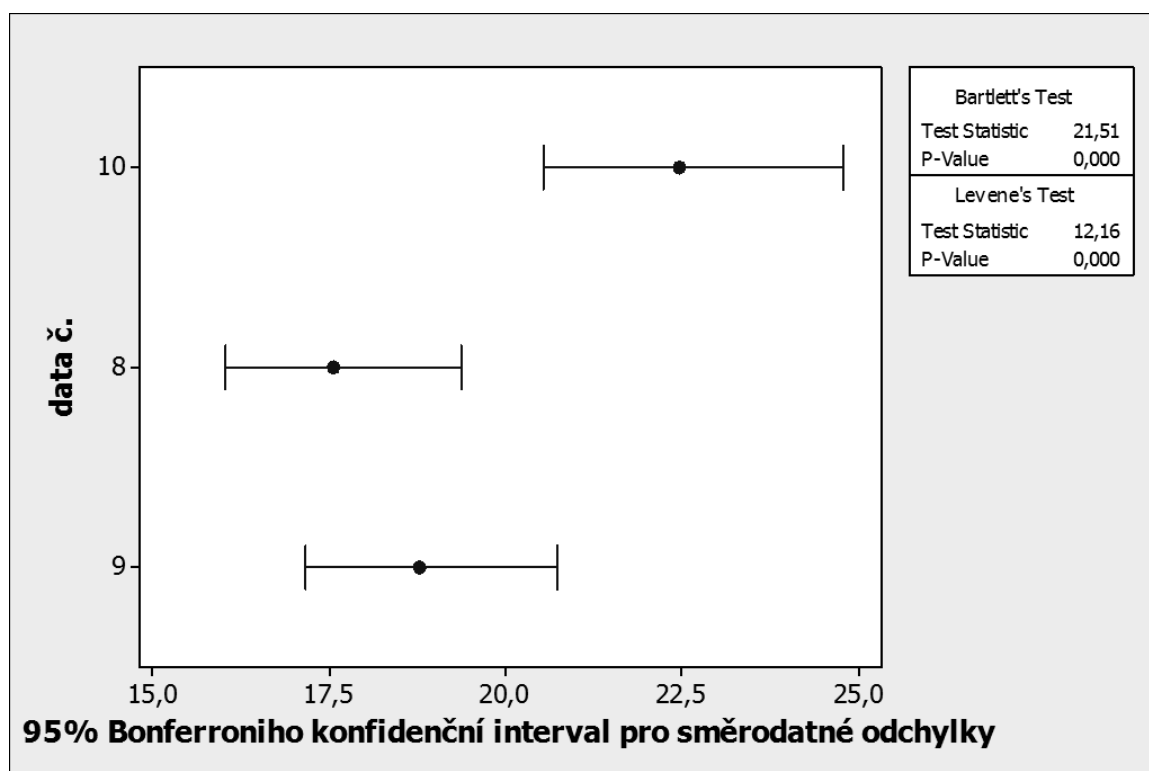
Obr. 5.27 Test rovnosti rozptylů – data č. 30, 15, 16.

Třetí skupinou jsou datové soubory č. 31, 17 a 18. V těchto třech případech bylo frézováno pětibřitou frézou s použitím weldonového upínače. Z těchto tří datových souborů, pouze soubor č. 31 se řídí normálním rozdělením. Ostatní dva nikoliv. Při testování rovnosti rozptylů je vytvořen jeden datový soubor s identifikátory jednotlivých měření. Tento celkový soubor se neřídí normálním rozdělením, proto je třeba pro vyhodnocení brát v potaz Lavenův test, který prokázal p-hodnotu větší než 5 % (viz. obr. 5.28). Proto byla potvrzena hypotéza o rovnosti rozptylů. Rozptyly těchto dat tedy nejsou statisticky významně odlišné. V případě samostatného porovnání dat č. 17 a 18 je to již na první pohled zřejmé, pro data č. 18 je tato skutečnost potvrzena Lavenovým testem rovnosti.

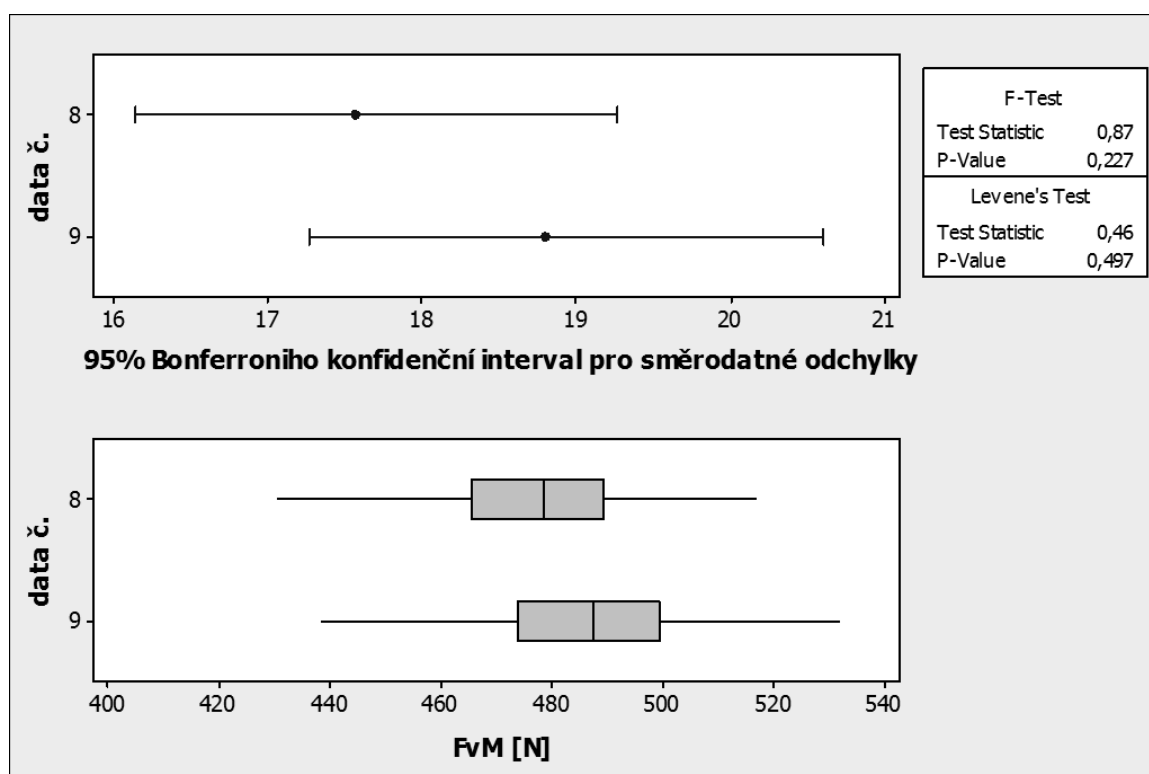


Obr. 5.28 Test rovnosti rozptylů – data č. 31, 17, 18.

Poslední trojice dat reprezentujících frézování nástrojem s pěti zuby upnutým v tepelném upínači jsou soubory č. 10, 8 a 9. Při testu všech tří datových souborů (obr. 5.29) byla nulová hypotéza na základě obou p-hodnot menších než 5% zamítnuta. Evidentně jsou si podobné rozptyly dat č. 8 a 9. Toto bylo potvrzeno samostatným testem těchto dvou měření (viz. obr. 5.30), kde p-hodnoty u obou testů přesahují hranici 5 %.



Obr. 5.29 Test rovnosti rozptylů – data č. 10, 8, 9.



Obr. 5.30 Test rovnosti rozptylů – data č. 8, 9.

5.4 Faktorový vliv na velikost výsledné měřené síly F_{VM}

Při frézování byly používány dva typy nástrojů a dva typy upínačů. Obrábění proběhlo na dvou materiálech, kdy do jisté míry docházelo ke změně podmínek testu. Mezi ně patří například a_p nebo zdali probíhá frézování včetně povrchové vrstvy nebo ne. Je zde tedy jisté množství faktorů, z nichž každý může mít vliv na charakter působících sil, resp. výsledné měřené síly F_{VM} . Ze získaných dat lze provést statistickou analýzu vlivu jednotlivých faktorů a interakcí na F_{VM} , tato je provedena v následujících podkapitolách.

Díky některým měřením, jež byla provedena, lze statisticky popsat vlivy a_p , typu nástroje, upínače a jejich případných interakcí na výslednou měřenou sílu F_{VM} při frézování taženého materiálu (viz kap. 4.1.1). Do této analýzy vstupují vyfiltrované hodnoty F_{VM} z měření č. 1, 3, 8, 10, 15, 17, 30 a 31, přičemž postupně je zpracováno několik analýz, rozdílných v pozorované odezvě. Nejprve je analýza provedena pro odezvu v podobě střední hodnoty F_{VM} a poté pro směrodatnou odchylku. Nejdříve je vytvořena faktoriální tabulka (pořadí generováno softwarově), která na základě jednotlivých měření zahrnuje všechny možné kombinace faktorů mající vliv na velikost výsledné odezvy. Tabulka je základem pro realizaci výstupů.

Jak je z tabulky zřejmé, jednotlivá měření dle daných podmínek proběhla vždy jen jednou. Pro mnohem vyšší sílu testu, tedy jeho spolehlivost by bylo vhodnější každé měření minimálně 2x opakovat. Z materiálových, nástrojových a v neposlední řadě časových důvodů nebylo ale možné tyto průjezdy opakovat. Následující analýzy vlivů tedy poskytují pouze orientační informace, s čímž je třeba při vyvozování závěrů počítat.

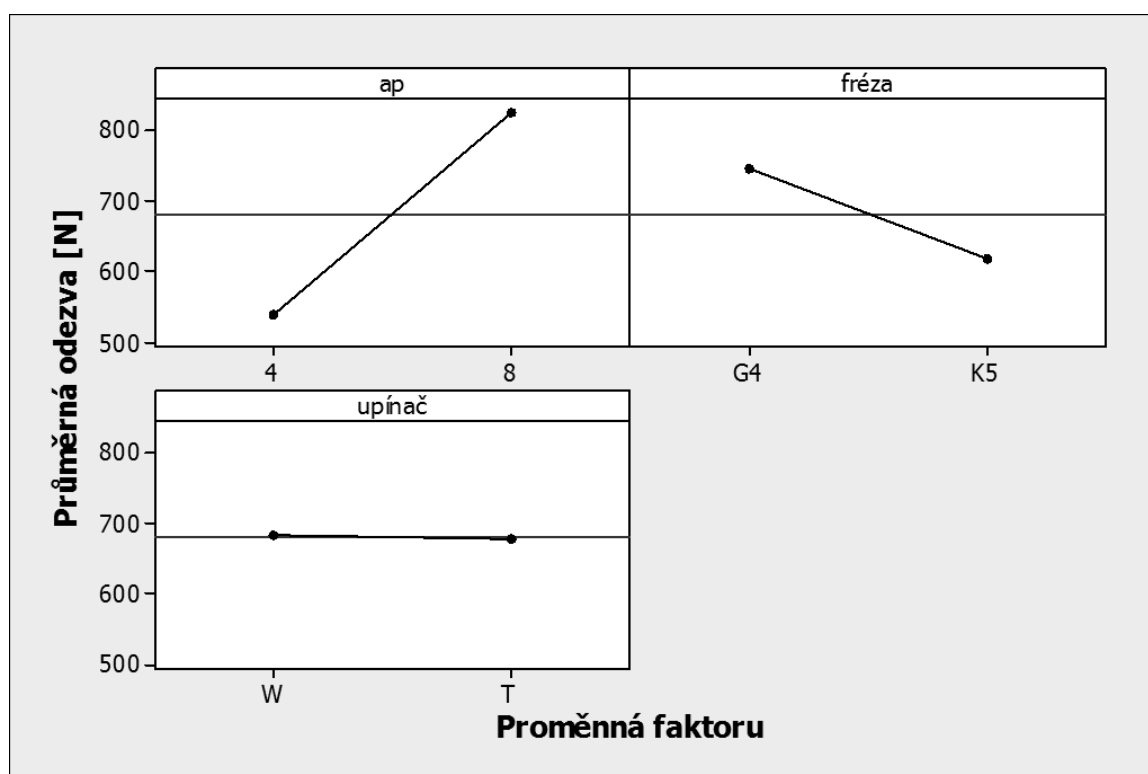
Tab. 5.9 Faktoriální tabulka a_p , nástroj, upínač – odezva $\bar{x}$, s.

Pořadí	Data – měření č.	a_p [mm]	Nástroj	Upínač	Odezva	
					$\bar{x}$ [N]	s [N]
1	1	4	G4	W	607,18	30,79
2	3	8	G4	W	917,43	25,35
3	17	4	K5	W	461,97	13,13
4	31	8	K5	W	744,85	12,86
5	15	4	G4	T	597,92	15,88
6	30	8	G4	T	860,03	12,77
7	8	4	K5	T	476,51	17,60
8	10	8	K5	T	779,70	22,48

5.4.1 Odezva – střední hodnota F_{VM}

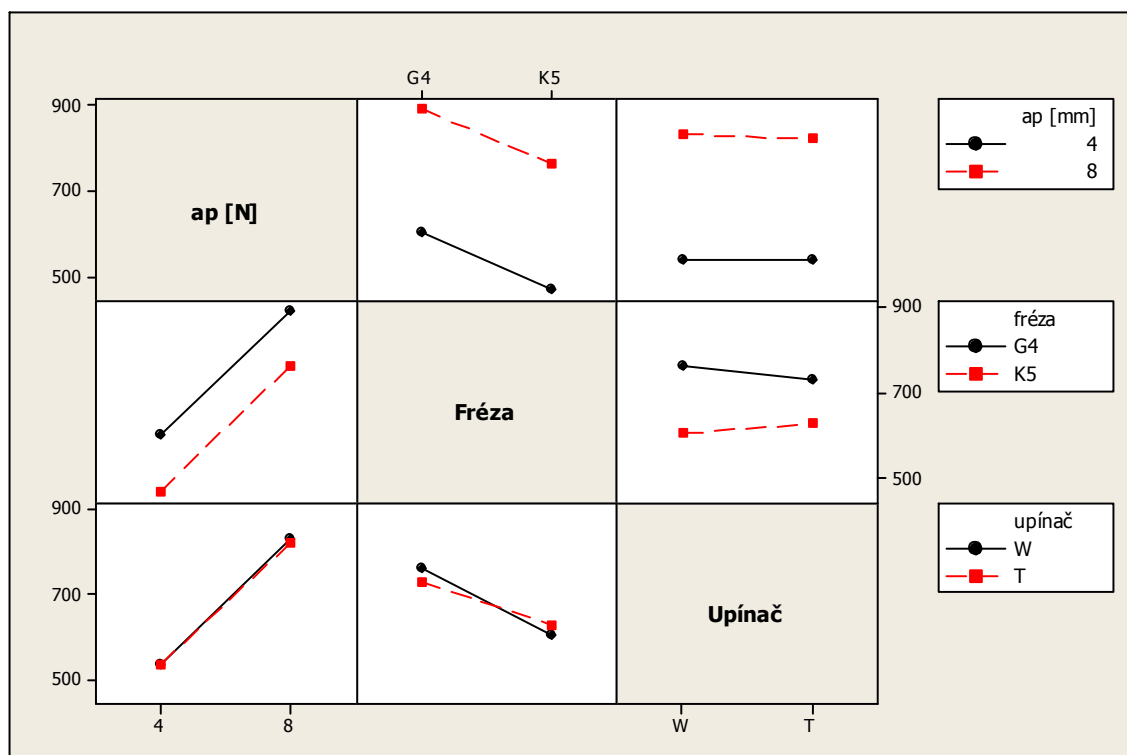
V první analýze je pozorován vliv faktorů a jejich interakcí na střední hodnotu výsledné měřené síly F_{VM} při frézování Ti64. Tato charakteristika nemusí být vždy spolehlivou pro jakékoliv závěry. Nicméně některá měření se výrazně liší od jiných, řádově i o stovky newtonů, díky značně rozdílným hodnotám a_p . Tento test ovšem může přinejmenším poskytnout náhled na hlavní vlivy.

Prvním výstupem je graf (obr. 5.31) vlivu samostatných faktorů neboli graf hlavních efektů. Obsahuje informace o vlivech každého z faktorů zvlášť. Osa x reprezentuje proměnné (varianty) jednotlivých faktorů. Na ose y jsou průměrné velikosti odezev pro jednotlivé vlivy. Vertikální souřadnice jednotlivých bodů je vypočtena jako průměr ze všech středních hodnot F_{VM} (odezvy) souvisejících s daným faktorem. Např. odezvy ze všech měření, kde bylo použito $a_p = 4$ mm jsou zprůměrovány a tvoří tuto ypsilonovou souřadnici. Z výstupů na obr. 5.31 je zřejmé, že zásadní vliv mezi hlavními efekty má a_p a nástroj, naopak minimální je zde vliv upínače. Zjednodušeně lze říci, že čím strmější úsečka v jednotlivých grafech (s přihlédnutím na aktuální měřítko), tím větší efekt daného faktoru. V případě $a_p = 4$ mm je tedy průměrná odezva okolo 536 N, přičemž při $a_p = 8$ mm vzrůstá na hodnotu okolo 826 N. Znatelný je zde i vliv nástroje. Již z tohoto může na první pohled být zřejmé, který z faktorů má vliv a který ne. Tento výstup ovšem nestačí, pro celkovou interpretaci vlivů je třeba aplikovat další.



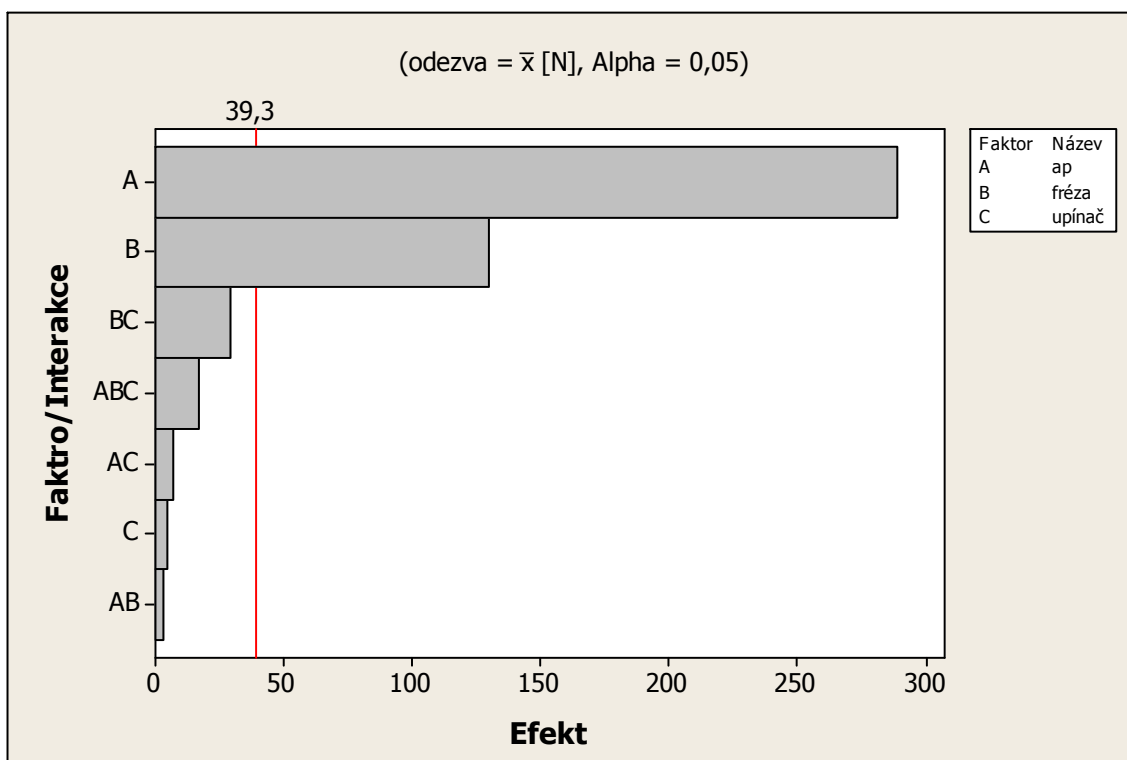
Obr. 5.31 Hlavní efekty (a_p , nástroj, upínač – $\bar{x} F_{VM}$).

Další výstupem, zobrazeným na obr. 5.32, je matice společných působení dvou faktorů. Každá buňka reprezentuje interakci dvou, přičemž k interakci dochází v případě, když jsou jednotlivé úsečky navzájem různoběžné. Nezáleží zde na pozici jednotlivých koncových bodů úsečky, tzn. jejich vodorovné umístění, nýbrž důležitá je zde různoběžnost dvou interagujících úseček. Čím větší rovnoběžnost těchto úseček, tím je menší interakce mezi danými faktory. Jediná viditelná interakce, ke které zde dochází, je vzájemné působení nástroje a upínače. Ani v tomto případě nejsou ovšem přímky výrazně různoběžné.



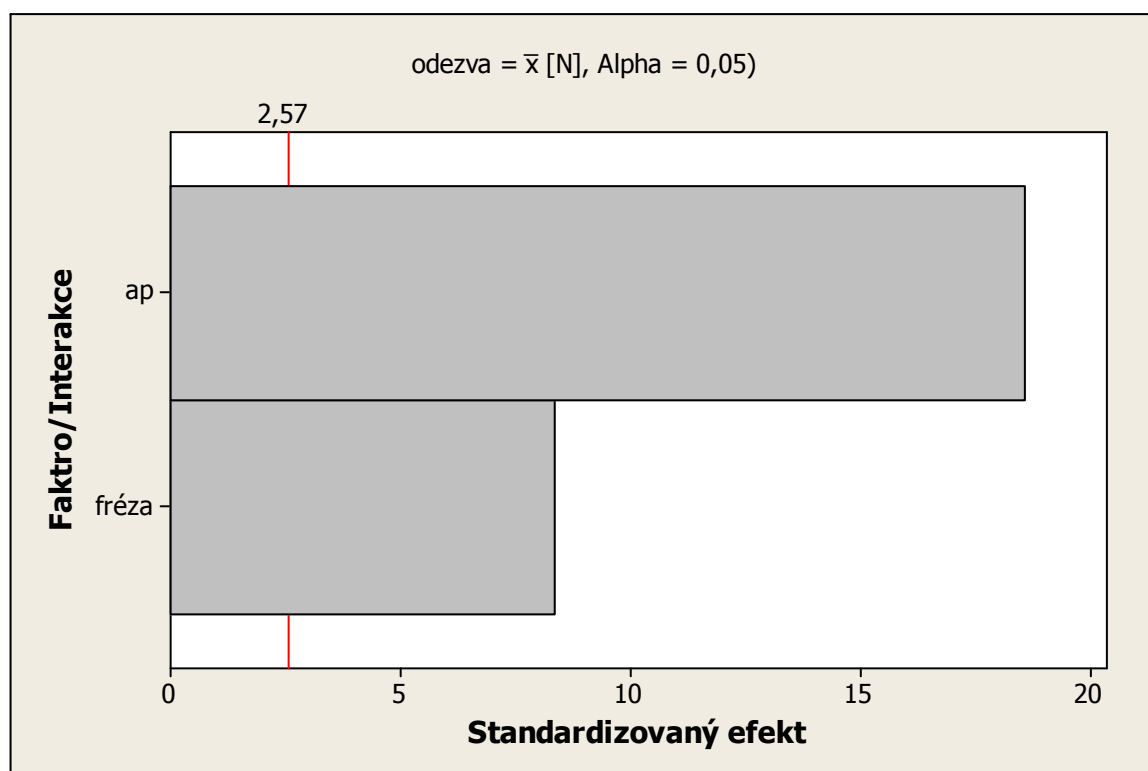
Obr. 5.32 Společné působení dvou faktorů (a_p , nástroj, upínač – $\bar{x} F_{VM}$).

Po provedení analýzy možných vlivů samostatných faktorů a interakcí mezi nimi, je důležité následně analyzovat, zdali jsou jednotlivé vlivy významné či ne. K tomu poslouží Paretův diagram významnosti faktorů na obr. 5.33.



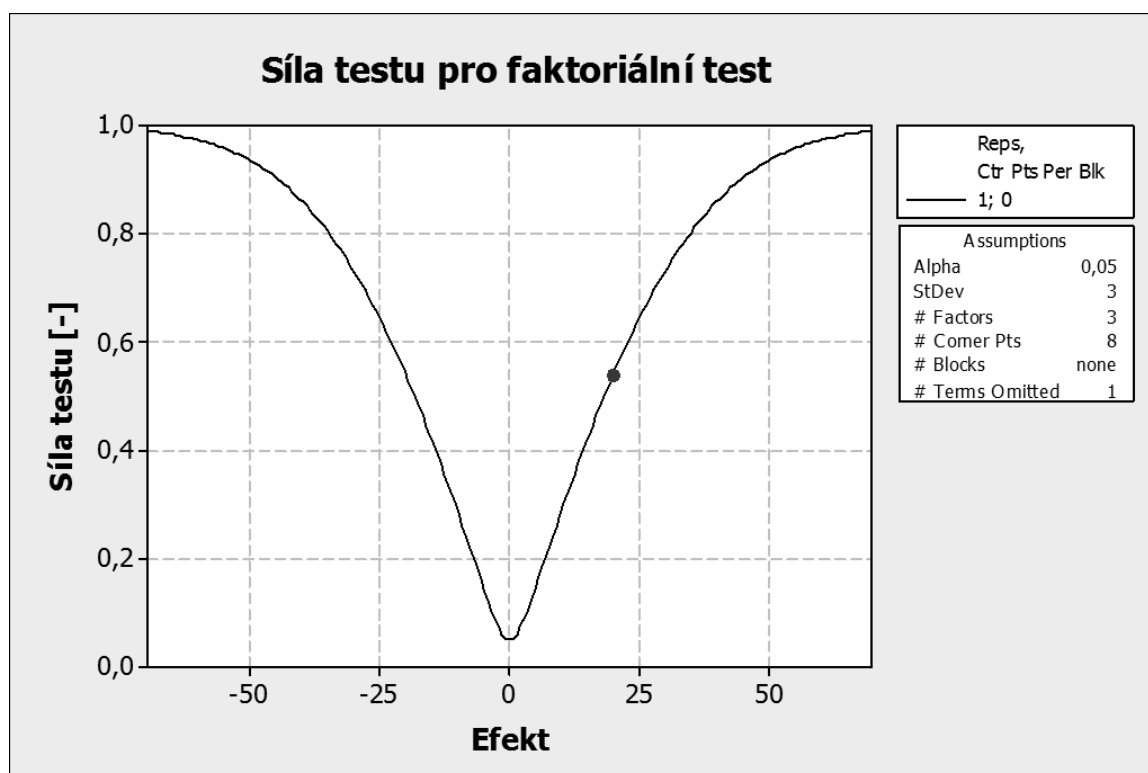
Obr. 5.33 Paretův diagram významnosti všech faktorů (a_p , nástroj, upínač – $\bar{x} F_{VM}$)

Jednotlivé faktory a interakce, které se dostávají za červenou úsečku, mají význam. Nejdříve je ovšem nutné postupně odstraňovat nevýznamné interakce a případně i samostatné faktory. Po postupném odstraňování dostáváme výsledek na obr. 5.34, ukazující pouze dva statisticky významné vlivy na střední hodnotu působící síly F_{VM} , jimiž jsou a_p a nástroj. Vliv upínače zde vypadl, stejně jako vliv jakékoliv interakce. Ačkoliv do testu vstupuje vždy jen jedno měření daného typu bez opakování, test popisuje 98,81 % variability.



Obr. 5.34 Finální Paretův diagram významnosti faktorů (a_p , nástroj, upínač – $\bar{x} F_{VM}$)

Jak již bylo zmíněno, bylo by vhodné, aby byla měření minimálně jednou opakována. Síla toho testu není příliš silná. Přibližná síla testu, pro případ kdy budou za významné považovány rozdíly ve velikostech působících sil okolo 20 N se směrodatnou odchylkou 3 N, je teoreticky přibližně 54 % (viz. obr. 5.35). V situaci, kdy by jednotlivá měření bylo možno provést 2x, se při stejném sledovaném efektu lze teoreticky dosáhnout síly testu 100 %. Opakování má největší kladný vliv na sílu testu. 54 % není pro pozorovaný efekt vyhovující. Pokud ovšem máme zájem sledovat efekt přibližně 100 N se směrodatnou odchylkou 6 N, vzroste síla zde zpracovaného testu na hodnotu přibližně 94 %. Výsledky testu jsou tedy věrohodné ve chvíli, kdy jsou brány v potaz rozdíly okolo 100 N. Menší pozorované efekty snižují sílu testu do úrovní, kdy je není možné s dostatečnou pravděpodobností brát v úvahu.

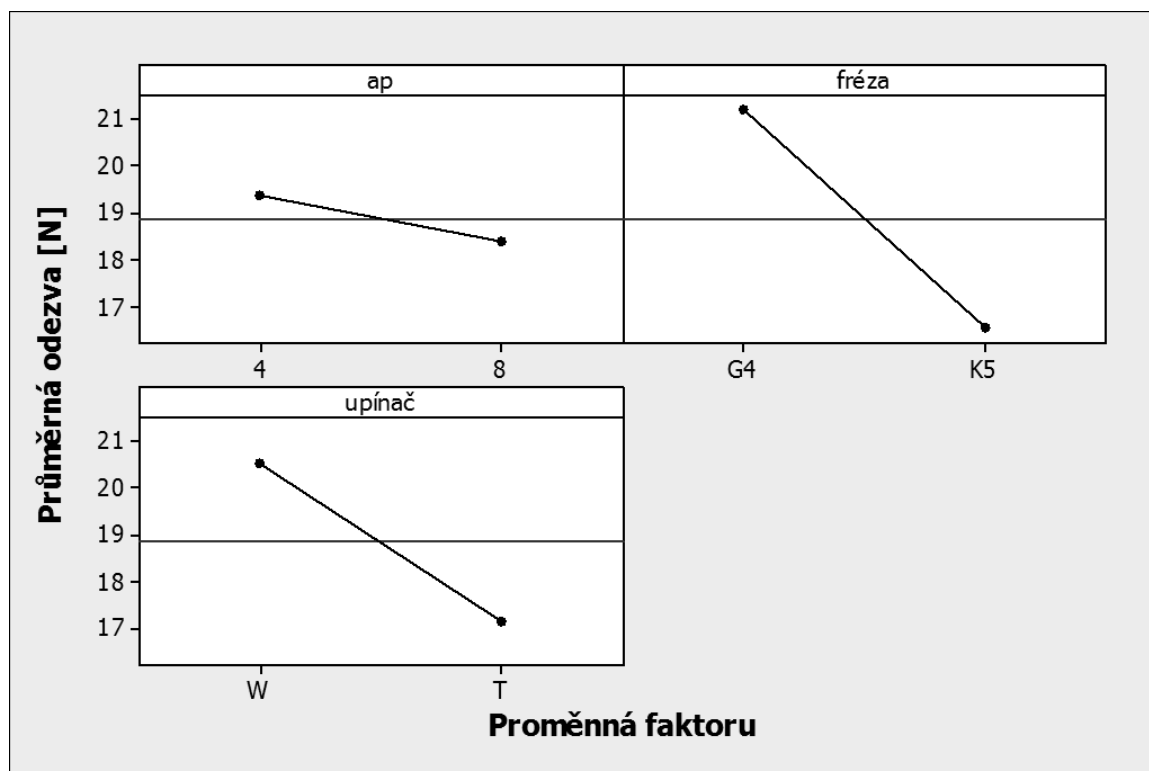


Obr. 5.35 Síla testu pro sledovaný efekt = 20 N, $s = 5$ N, 1 opakování, 3 faktory.

5.4.2 Odezva – směrodatná odchylka F_{VM}

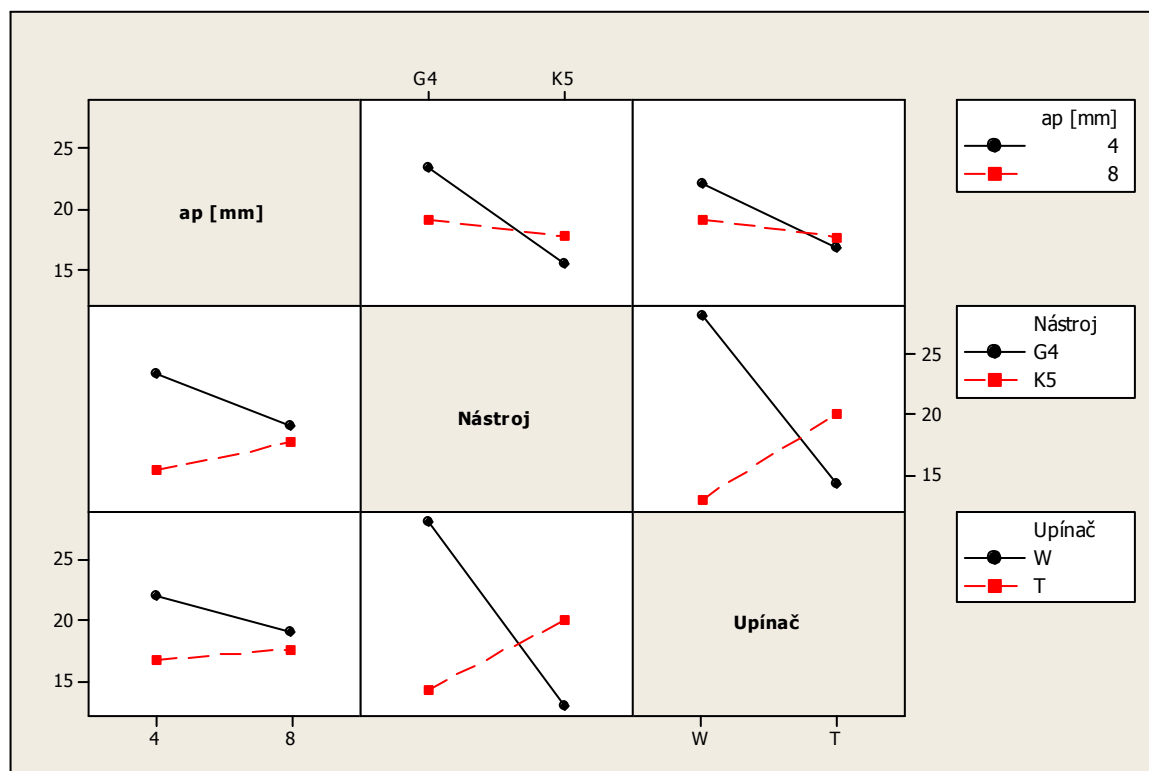
Tato analýza by šla obdobně využít při jiné sledované odezvě, kterou by mohli být například mediány nebo rozptyly. Mediány jsou ovšem při těchto měřeních velmi podobné středním hodnotám, proto jejich použití jakožto odezev nemá nyní význam. Naopak významný pozorovaným efektem, tedy odezvou, je variabilita. Proto je provedena stejná analýza, kdy jedinou změnou, oproti předchozí zpracovávané v kap. 5.4.1, je odezva, kterou je nyní směrodatná odchylka.

Nejdříve je tedy i zde analyzován vliv hlavních efektů (obr. 5.36). Zde je viditelný rozdíl oproti vlivu hlavních efektů při sledované střední hodnotě F_{VM} , kde nedocházelo k vlivu upínače. V tomto případě není úsečka vodorovná jako v předchozí analýze na obr. 5.31. Upínač dle tohoto prvního výstupu má vliv na směrodatnou odchylku.



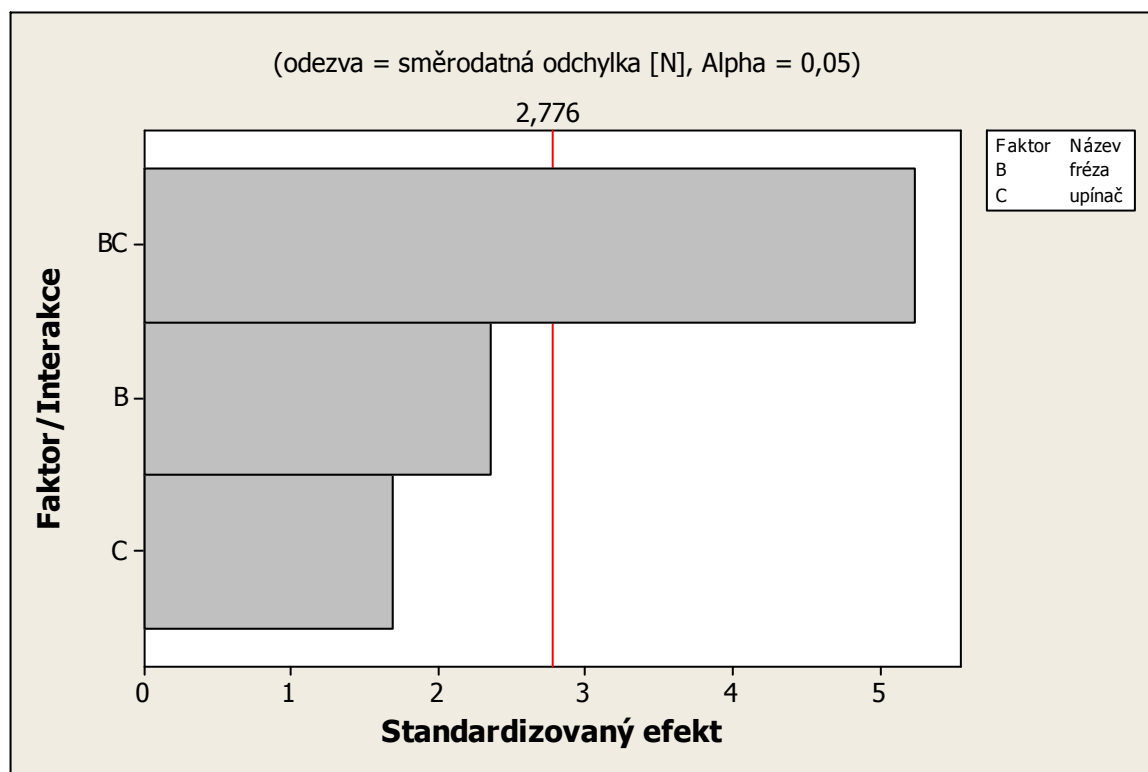
Obr. 5.36 Hlavní efekty (a_p , nástroj, upínač – směrodatná odchylka F_{vm}).

Matice společného působení dvou faktorů na obr. 5.37 je také rozdílná od předchozího případu. Dochází zde k interakcím ve všech kombinacích faktorů.



Obr. 5.37 Společné působení dvou faktorů (a_p , nástroj, upínač – směrodat. odchylka F_{vm}).

Po postupném odstraňování nevýznamných interakcí a faktorů je výsledkem Pareťův diagram významnosti faktorů dle obr. 5.38. V tomto případě test popisuje 89,93 % variability. Z diagramu je vidno, že faktor a_p z testu vypadl, tedy nemá na variabilitu významný vliv. Jediný významný vliv vykazuje společné působení nástroje a upínače.



Obr. 5.38 Finální Pareťův diagram významnosti faktorů (a_p , nást., up. – směr. odch. F_{VM})

Tuto metodu, použitou v kapitolách 5.4.1 a 5.4.2, lze aplikovat také na jiné pozorované faktory, např. na povrchovou vrstvu. Nicméně i zde by bylo pouze jedno měření, ze kterého lze vycházet. Jelikož nebylo možno testy opakovat, vypovídající hodnota jakýchkoliv faktorových analýz by nebyla dostatečně silná. Proto již další obdobné faktorové testy nebyly zpracovány. Provedené testy v kapitolách 5.4.1 a 5.4.2 jsou orientační, při jisté velikosti sledovaného efektu je lze uvažovat.

5.5 Silová zatížení v závislosti na frézovaném materiálu a volbě nástroje

Z hlediska možností při testování, nebylo možno provést všechna měření s opakováním. Pro každý z materiálů ovšem byla provedena opakovaná měření dvěma nástroji. U materiálu Ti64 jsou k dispozici po sobě jdoucí datové soubory č. 3 – 7, tedy frézování sestavou 4W při $a_p = 4$ mm, na kterých byly uplatněny stejné řezné podmínky. Stejně tak je pro tento materiál provedena skupina stejných měření č. 10 – 14, kde bylo použito sestavy 5T. Pro druhý testovaný materiál, Ti55531, byla obdobně provedena měření, kdy v prvním případě s využitím sestavy 4T byla měřena data č. 19 – 23. Druhý soubor pěti po sobě jdoucích stejných měření se týká sestavy 5W, kde se jedná o datové soubory číslované v rozmezí 24 – 28. Ideální případ, kdy by bylo možno s velkou přesností aplikovat test faktoriálních vlivů, by vyžadoval u každého z materiálů tyto skupiny stejných měření pro všechny sesta-

vy nástrojů a upínačů. V našem případě jsou k dispozici pouze dvě měření na každém materiálu, každé jiným nástrojem. Ovšem upínače se na obou materiálech neshodují s nástroji. Tato kapitola tedy pouze porovnává dvojice skupin měření pro každý materiál zvlášť. Srovnání všech kombinací, ovšem bez opakování a pouze pro případ frézování materiálu Ti64, je zpracováno v kap. 5.3.

5.5.1 Opakovaná měření při frézování Ti64

Následující tab. 5.10 obsahuje přehled charakteristik jednotlivých měření. Prvních pět je skupinou měření při použití sestavy 4W. Další blok pěti datových souborů náleží sestavě 5T.

Tab. 5.10 Charakteristiky porovnávaných měření – materiál Ti64

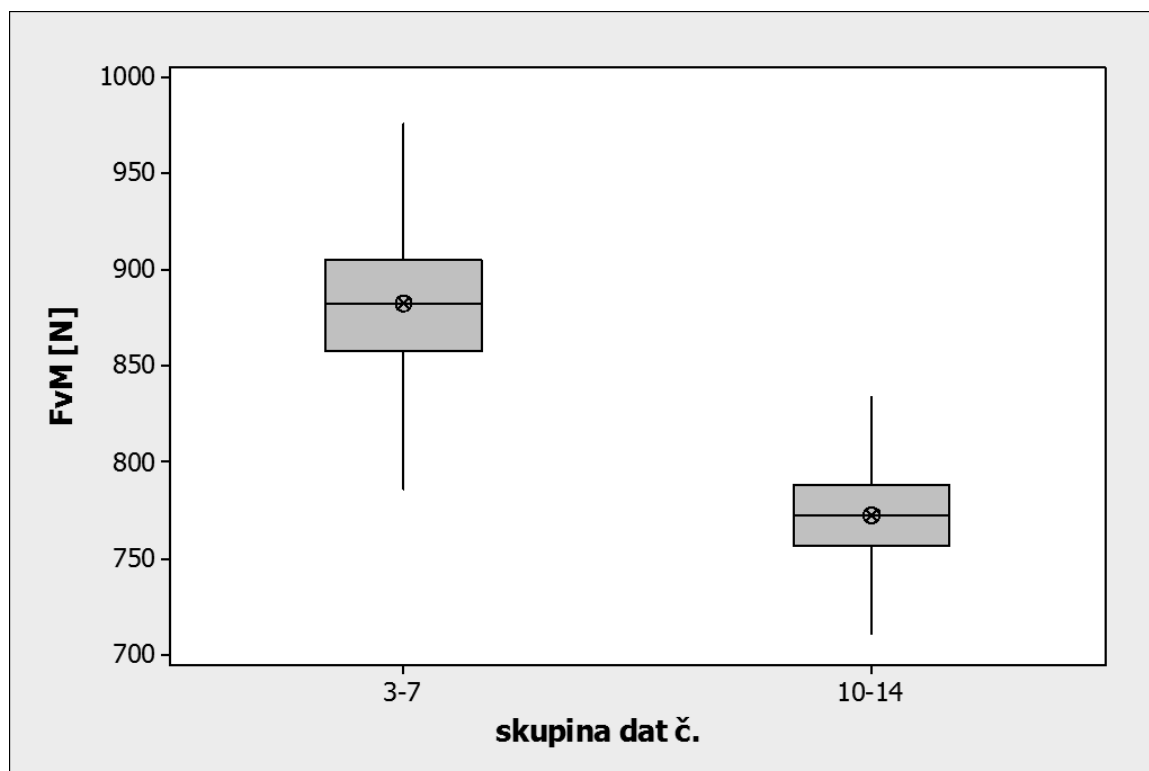
Data – měření č.	Použitá sestava	p-hodnota	$\bar{x}$ [N]	s [N]	s^2 [N ²]	$\bar{x}$ [N]	Rozsah [N]
3	4W	0,055	917,43	25,35	642,55	917,40	126,54
4		<0,005	892,48	33,02	1090,40	898,04	173,20
5		0,008	871,48	27,46	754,09	874,59	146,42
6		<0,005	865,99	30,04	902,46	868,67	150,11
7		0,106	859,91	31,20	973,55	859,57	186,04
10	5T	0,107	779,70	22,48	505,28	779,36	122,08
11		0,073	775,94	24,97	623,31	775,88	128,98
12		0,503	768,61	18,99	360,75	769,16	114,13
13		0,482	771,60	23,20	538,36	771,89	134,49
14		0,299	767,19	19,04	362,55	766,73	109,95

V tab. 5.10 lze zaznamenat, že data ze všech měření skupiny 5T se řídí normálním rozdělením. Ovšem ve skupině 4W jsou pouze dva datové soubory, a to data č. 3 a 7, která jsou normální. Ostatní tři nikoliv. K jasnému porovnání sestavy 4W a 5T jsou jednotlivé dílčí soubory analyzovány dohromady. Výsledné charakteristiky skupiny pěti měření sestavy 4W a 5T uvádí tab. 5.11.

Tab. 5.11 Charakteristiky skupin měření 4W a 5T – materiál Ti64

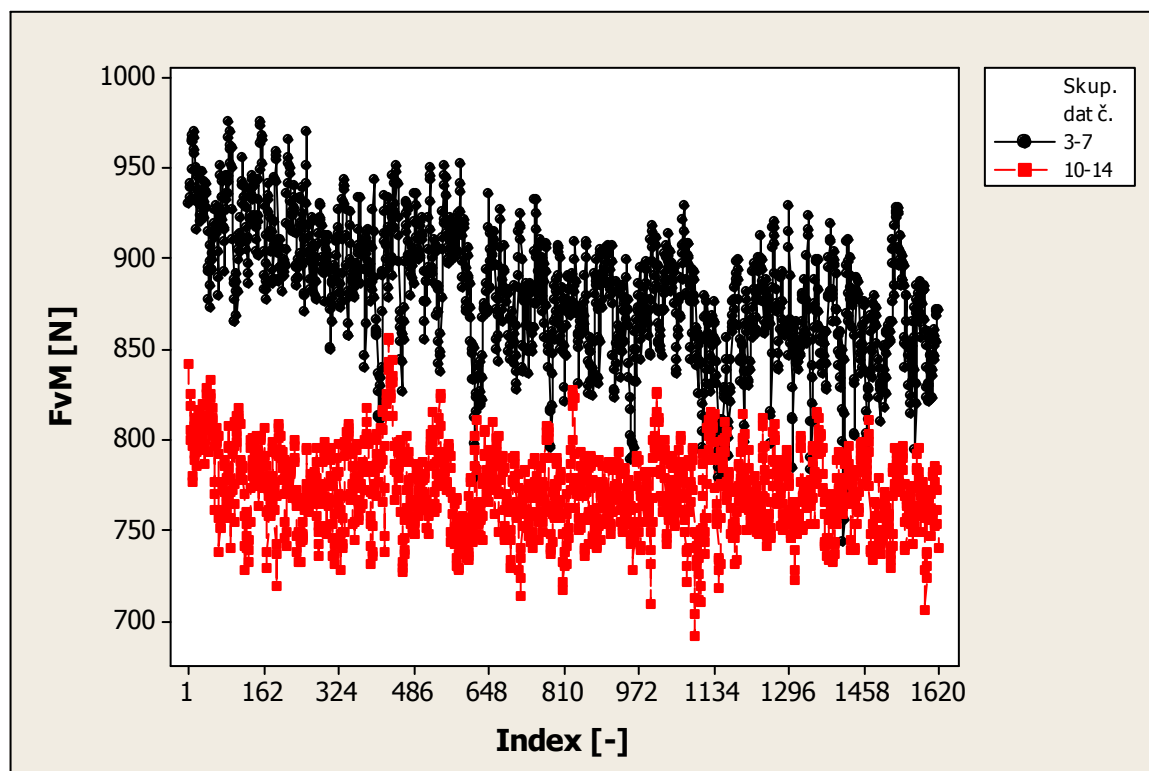
Data – měření č.	Použitá sestava	p-hodnota	$\bar{x}$ [N]	s [N]	s^2 [N ²]	$\bar{x}$ [N]	Rozsah [N]
3 – 7	4W	0,050	881,46	36,25	1314,42	882,75	232,52
10 – 14	5T	0,119	772,61	22,33	448,42	772,20	163,68

Následující krabicový graf na obr. 5.39 jasně ukazuje lepší výsledky při použití pětibřité frézy a tepelného upínače.



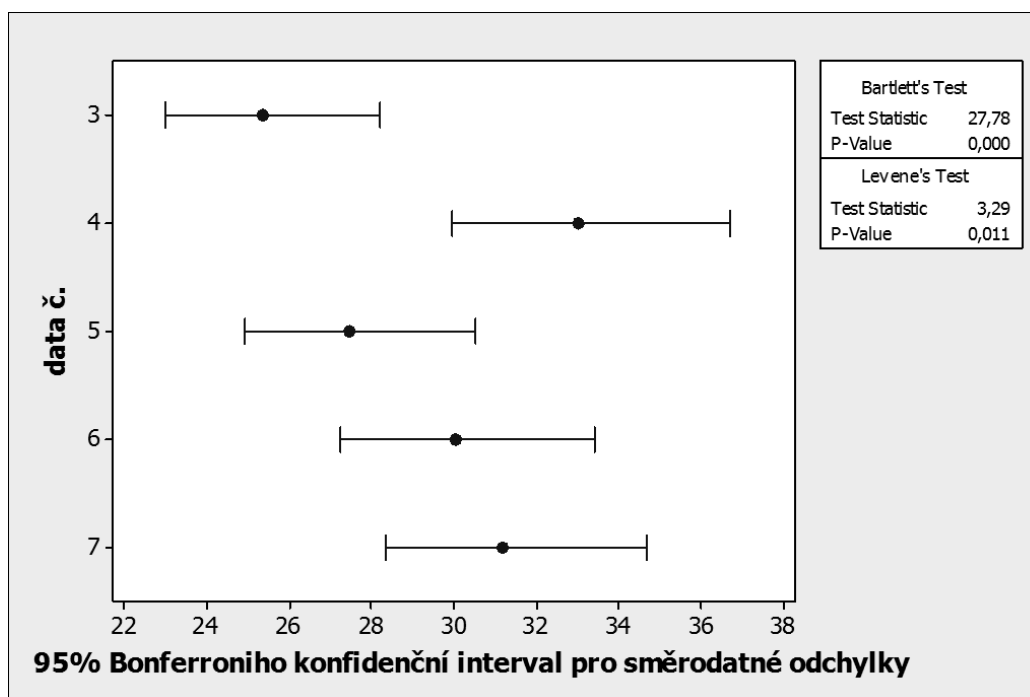
Obr. 5.39 Krabicový graf – 4W vs. 5T; (Ti64).

Na obr. 5.40 je zobrazen spojnicový graf časových závislostí skupin. Lze vidět, že jednotlivé datové řady jsou položeny víceméně hned nad sebou.



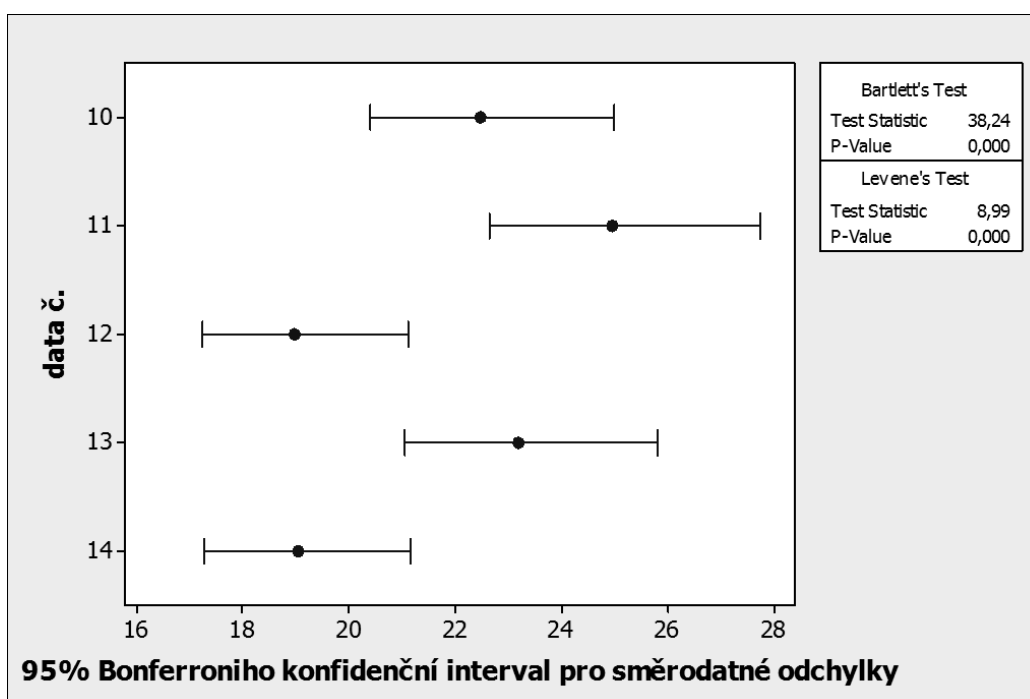
Obr. 5.40 Spojnicový graf – 4W (skupina dat č. 3-7) vs. 5T (skupina dat č. 10-14); (Ti64).

Pro jednotlivé skupiny měření stejnou sestavou upínače a nástroje je též možné provést test rovnosti rozptylů. Na obr. 5.41 je zobrazen výstup z testu skupiny 4W. P-hodnoty u obou testů jsou menší než 5 %, alespoň jeden rozptyl je významně odlišný.



Obr. 5.41 Test rovnosti rozptylů – 4W (data č. 3, 4, 5, 6, 7); (Ti64).

Test rovnosti rozptylů dat skupiny 5T je na obr. 5.42. Obě p-hodnoty jsou menší než 5 %, rozptyl alespoň jednoho datového souboru nevýznamně odlišný.



Obr. 5.42 Test rovnosti rozptylů – 5T (data č. 10, 11, 12, 13, 14); (Ti64).

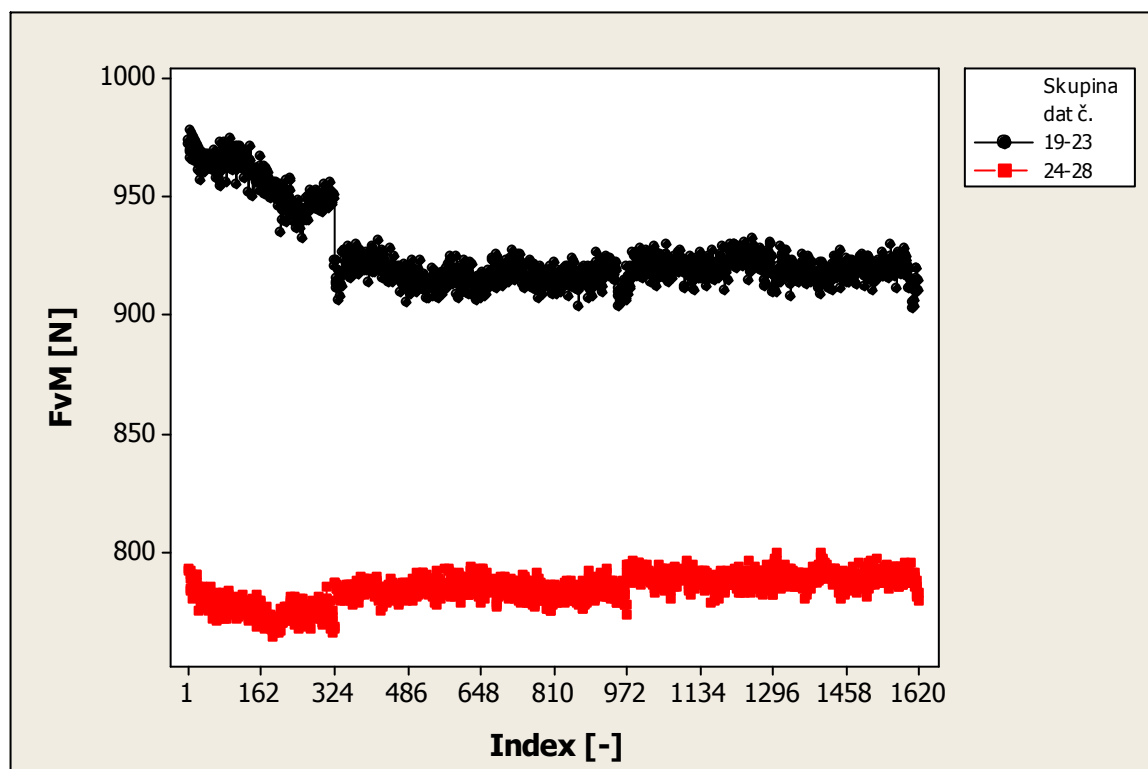
5.5.2 Opakovaná měření při frézování Ti55531

Zde byly porovnávány skupiny měření č. 19 – 23 a 24 – 28. První skupina reprezentuje obrábění frézou se čtyřmi zuby, upnutou v tepelném upínači. Druhá skupina dat pochází z měření, kdy bylo frézováno nástrojem s pěti zuby, který byl upnut ve weldonovém upínači. V porovnání s analýzou v předchozí kapitole zde jsou v podstatě zaměněny upínače u jednotlivých nástrojů.

Tab. 5.12 Charakteristiky porovnávaných měření – materiál Ti55531

Data – měření č.	Použitá sestava	p-hodnota	$\bar{x}$ [N]	s [N]	s^2 [N ²]	$\tilde{x}$ [N]	Rozsah [N]
19	4T	<0,005	957,05	9,85	96,94	957,14	45,81
20		0,286	917,59	5,03	25,28	917,39	26,16
21		0,643	916,35	4,49	20,18	916,40	23,70
22		0,186	921,58	4,35	18,88	921,92	23,76
23		0,183	918,65	4,34	18,86	918,54	27,43
24	5W	<0,005	776,47	5,09	25,46	776,08	28,71
25		0,419	784,88	3,17	10,05	784,88	18,03
26		0,923	783,95	3,63	13,16	783,89	19,80
27		0,361	788,92	3,31	10,96	789,16	18,32
28		0,339	789,73	3,33	11,11	789,80	20,19

V tab. 5.12 je zobrazen přehled charakteristik dvou skupin měření. Skupina 4T a 5W. Zřejmé je, že v každé ze skupin je vždy první měření charakteristické větší variabilitou než ostatní měření. Stejně tak v případě p-hodnot, kdy u prvních měření v jednotlivých skupinách je menší než 5 %, data tedy nejsou normální. Zároveň data č. 19 se vyznačují znatelně vyšší střední hodnotou i mediánem, v porovnání s dalšími ve stejné skupině. Z grafu na obr. 5.43 lze pozorovat velmi významné posunutí dat prvního měření skupiny 4T, data č. 19. Po zkušebním vypsání charakteristik bylo zjištěno, že směrodatná odchylka pro celou skupinu se pohybovala okolo 16, 62 N. Při pohledu na směrodatné odchylky jednotlivých měření ve skupině je to značný rozdíl. V tomto případě bude vhodné měření č. 19 vyškrtnout a již s ním dále nepočítat v celkové analýze sestavy 4T. Navýšení hodnot oproti ostatním datům mohlo být způsobeno chybou při testu, např. nepřesným nastavením a_e . Další čtyři měření stačí pro věrohodný statistický závěr. Ve druhé skupině dat 5W se obdobně chová také první měření č. 24, i když ne tak výrazně jako v předchozím případě. Zde jsou naopak hodnoty posunuty níže. Pro stejný počet analyzovaných měření, z nichž plynou závěry, jsou i tato data č. 24 neuvažována.



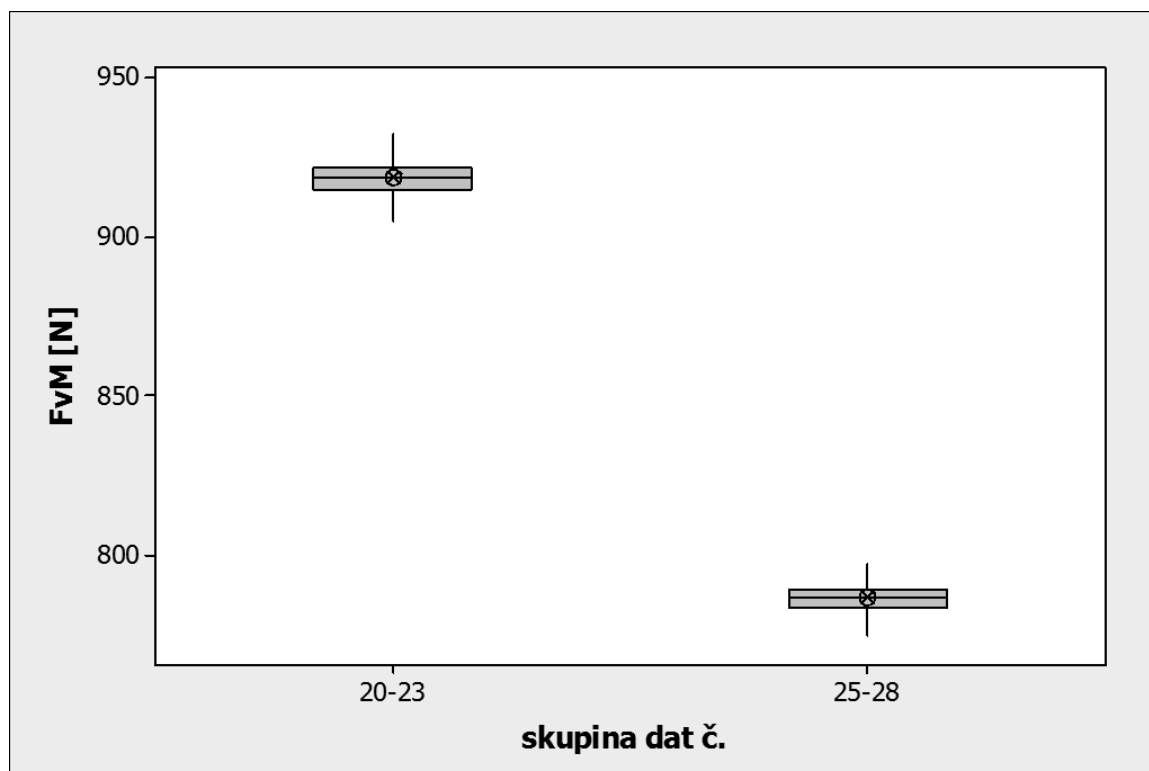
Obr. 5.43 Spojnicový graf – 4T (skup. dat č. 19-23) vs. 5W (skup. dat č. 24-28); (Ti55531)

V následující tabulce tab. 5.13 jsou vypsány charakteristiky určené pro celé skupiny měření. Zde již nejsou uvažována měření č. 19 resp. 24.

Tab. 5.13 Charakteristiky skupin měření 4T a 5W – materiál Ti55531

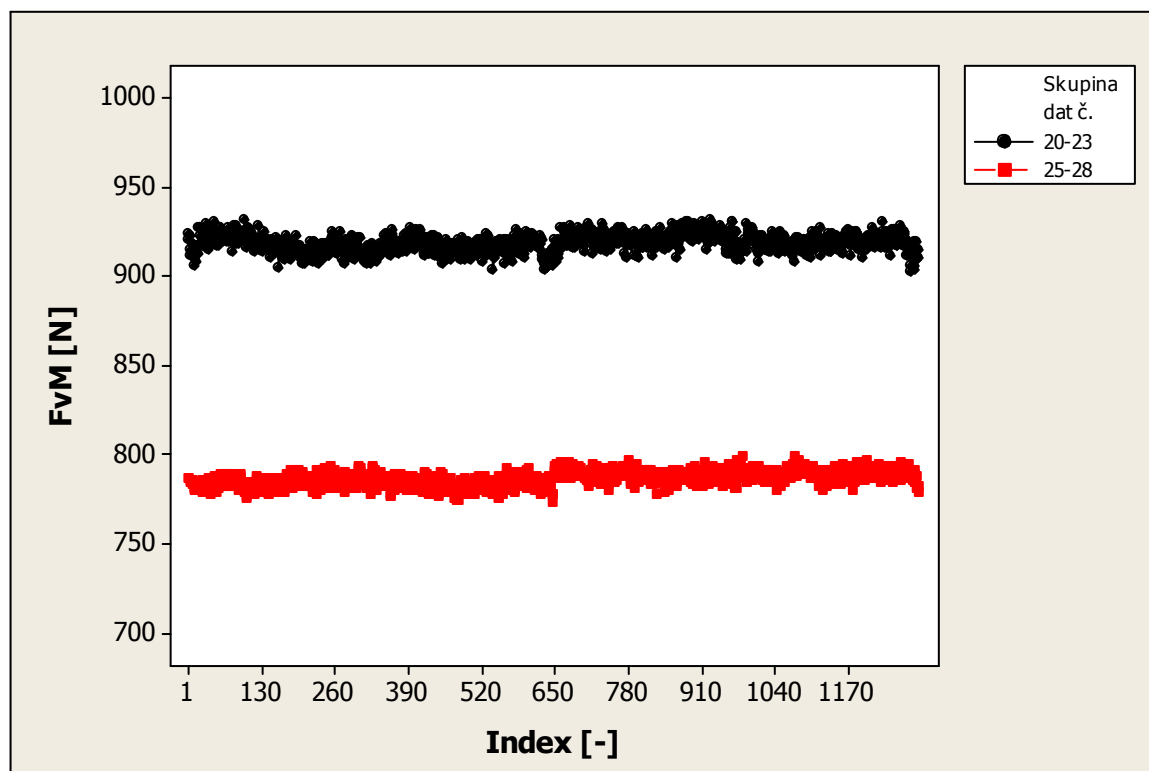
Data – měření č.	Použitá sestava	p-hodnota	$\bar{x}$ [N]	s [N]	s^2 [N ²]	$\bar{x}$ [N]	Rozsah [N]
20 – 23	4T	0,273	918,54	4,95	24,49	918,50	29,55
25 – 28	5W	0,082	786,87	4,19	17,52	786,82	26,32

Krabicový graf na obr. 5.44 ukazuje výrazné posunutí jednotlivých boxů od sebe. Velikosti boxů jsou ovšem přibližně stejné, jejich variability jsou tedy velmi podobné. V porovnání s analyzovanými skupinami stejných měření pro materiál Ti64 (viz. kap. 5.5.1, obr. 5.39) jsou v tomto případě variability několikanásobně nižší.



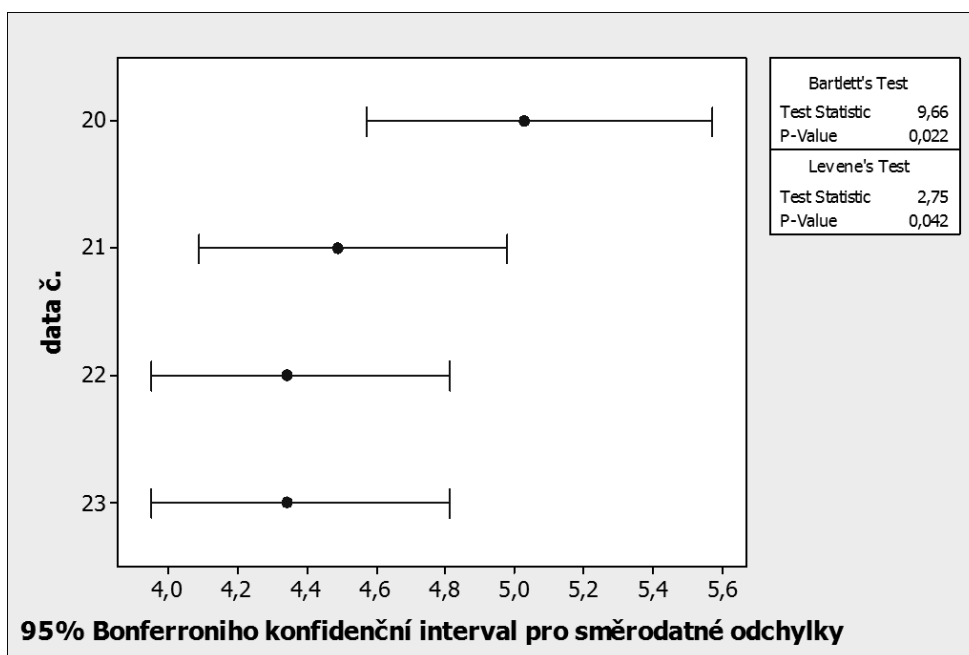
Obr. 5.44 Krabicový graf – 4T vs. 5W (Ti55531).

Spojnicový graf na obr. 5.45 také vypovídá o nízké variabilitě v porovnání s daty předchozího obdobně analyzovaného materiálu Ti64 na obr. 5.40.



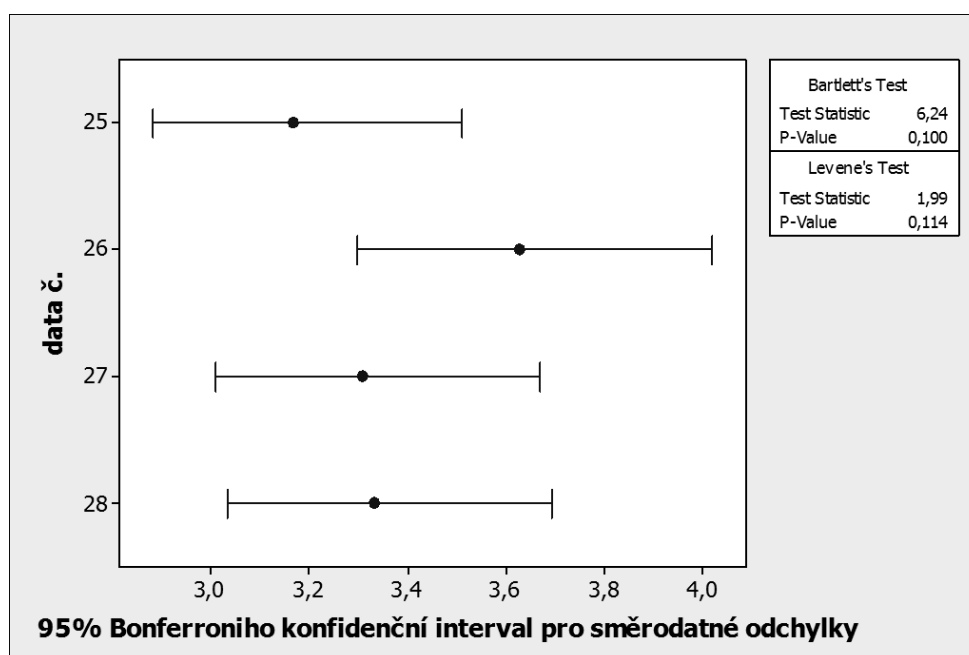
Obr. 5.45 Spojnicový graf – 4T (skup. dat č. 20-23) vs. 5W (skup. dat č. 25-28); (Ti55531).

I zde jsou jednotlivě provedeny testy rovností rozptylů. Nejdříve pro skupinu dat č. 20 – 23. Výsledek testu je zobrazen na obr. 5.46. Data jsou rozdělena normálně, tedy vypovídající je zde Bartlettův test, jehož p-hodnota je menší než 5 %, proto je alespoň jeden z rozptylů významně odlišný. Nicméně rozptyly se k sobě na první pohled blíží více, než při analyzovaném materiálu Ti64. Po odstranění dat. č. 20 se již rozptyly významně neliší.



Obr. 5.46 Test rovnosti rozptylů – 4T (data č. 20, 21, 22, 23); (Ti55531).

Ve druhém případě skupiny 5W jsou obě p-hodnoty větší než 5 %, žádný z rozptylů tedy není statisticky významně odlišný (viz. obr. 5.47).



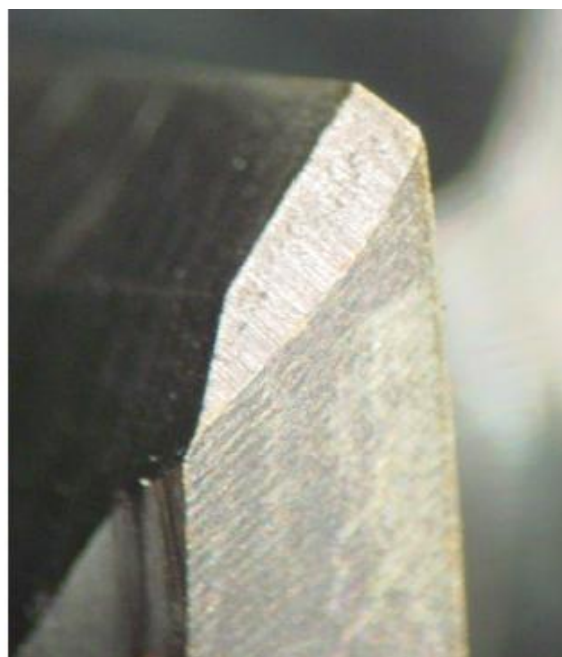
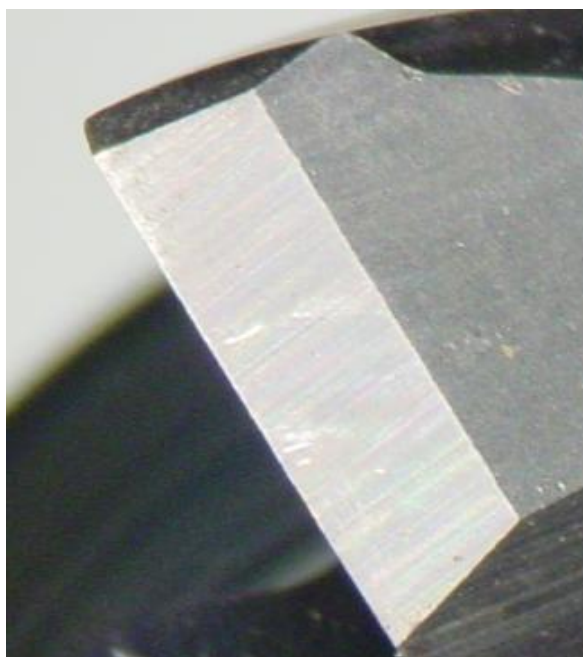
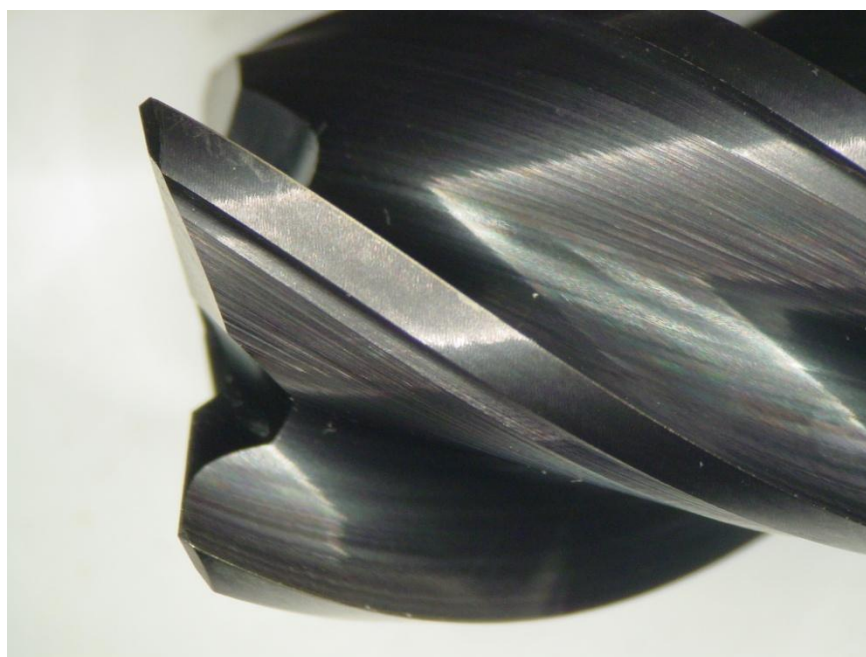
Obr. 5.47 Test rovnosti rozptylů – 5W (data č. 25, 26, 27, 28); (Ti55531).

5.6 Nástroje po testu

Po testování byly jednotlivé nástroje nafoceny. Z fotek nelze vytvářet přesnou analýzu, nicméně je alespoň pohledem možné vidět jisté stopy opotřebení. V následujících podkapitolách jsou uvedeny fotografie jednotlivých nástrojů patřících do daných sestav s upínači.

5.6.1 Fréza GUHRING – upínač weldon

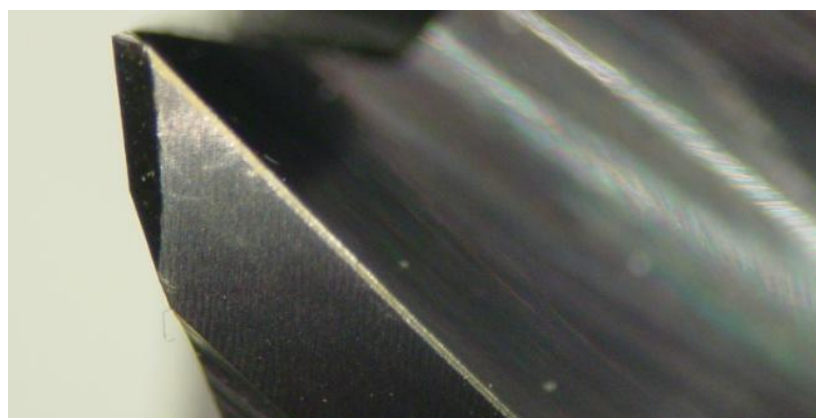
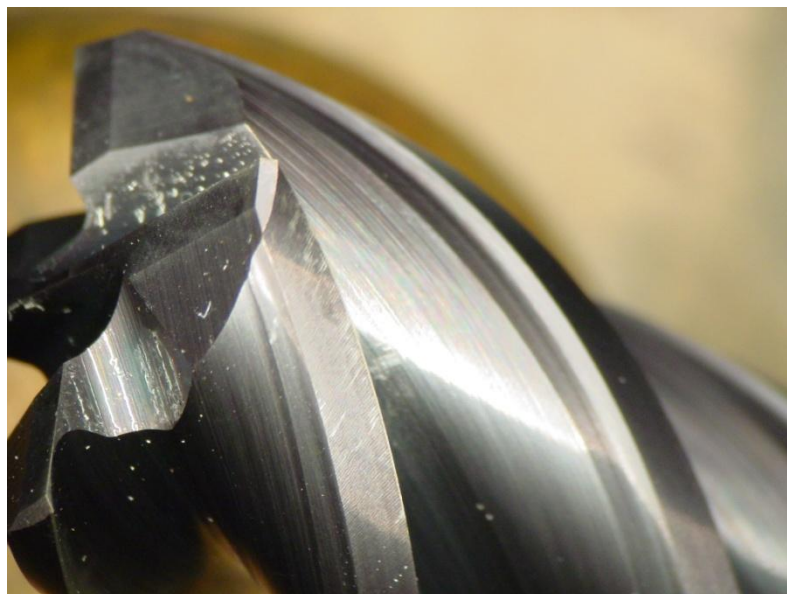
Na obr. 5.48 je pohled na frézu GUHRING po testování, která byla upnuta ve weldonovém upínači. Je zde též pohled na detaily.



Obr. 5.48 Fréza GUGRING – upínač weldon.

5.6.2 Fréza GUHRING – tepelný upínač

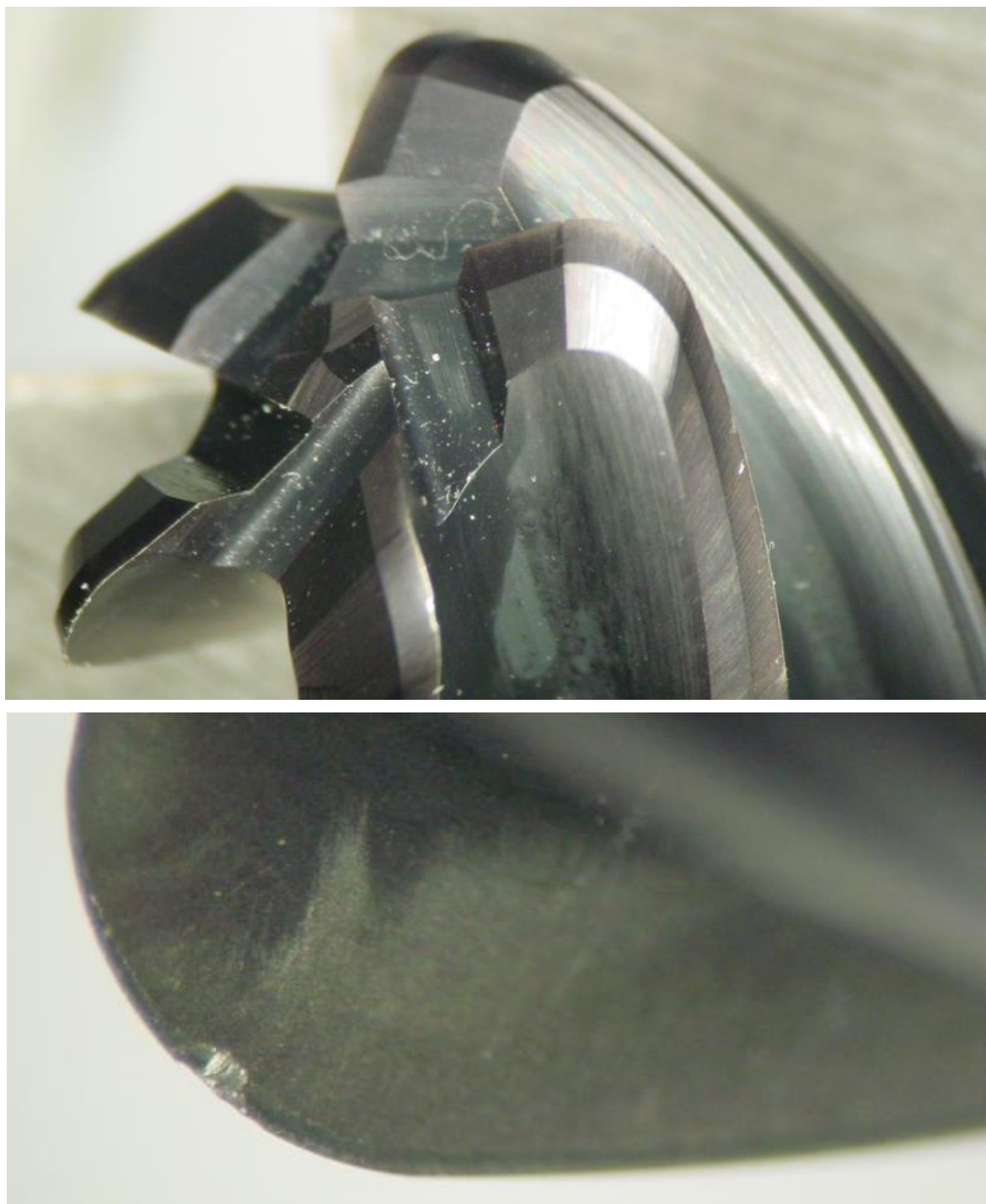
Stav frézy GUHRING, upnuté v tepelném upínači, po testování je včetně zobrazených detailů na obr. 5.49.



Obr. 5.49 Fréza GUHRING – tepelný upínač.

5.6.3 Fréza KENNAMETAL – upínač weldon

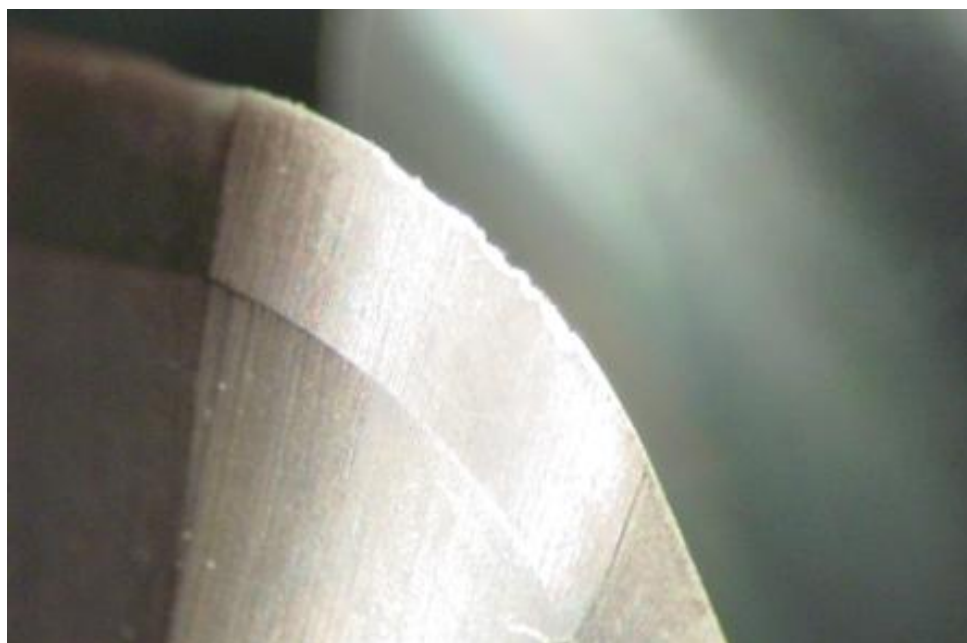
Třetí nástroj byla fréza KENNAMETAL upnutá ve weldonovém upínači. Na detailu obr. 5.50 je vidět výmol v oblasti zaoblení R_ϵ . Tento výmol je charakteristický pro všechny tyto oblasti obou fréz KENNAMETAL.



Obr. 5.50 Fréza KENNAMETAL – weldonový upínač.

5.6.4 Fréza KENNAMETAL – tepelný upínač

Posledním použitým nástrojem byla fréza KENNAMETAL upnutá v tepelném upínači (viz. obr. 5.51). I zde jsou charakteristické výmoly v oblasti zaoblení, stejně jako u předchozí popsané frézy.



Obr. 5.51 Fréza KENNAMETAL – tepelný upínač.

6 DISKUSE

V první části vyhodnocení byla provedena matematická analýza. Díky aplikovanému postupu lze získat přibližný náhled na rozdělení jednotlivých břitů po obvodu nástroje. Zároveň bylo zjištěno, že počty hodnot datového souboru, reprezentující vzdálenosti mezi analogicky stejnými body na jednotlivých zubech, nejsou v celém průběhu měření naprosto totožné. Toto mohlo být způsobeno různými faktory. Jedním z těchto faktorů by mohla být chyba měřicí soustavy. Jednotlivé posuny jsou pouze orientační, nelze na jejich základě vypočítat skutečné rozložení zubů, které výrobce veřejně neudává.

Součástí počátku vyhodnocení bylo také rozhodnutí, kterou měřenou složku výsledné síly pozorovat a porovnávat. Vybrána byla výslednice měřených sil F_{xyzMz} , viz. kap. 5.2.1. Dochází zde tedy k zahrnutí složky působící ve směru osy vřetene (osa z). Bylo by ovšem zároveň možné analyzovat pouze výslednici bez této složky. Jednotlivé zuby frézy jsou zatěžovány silami různých velikostí. Další otázkou potom zůstává, zdali by nebylo v jednotlivých měřeních vhodné srovnávat např. pouze nejvíce zatěžované břity. Lze se ovšem domnívat, že zatěžování jednotlivých zubů nástroje se bude s rostoucím opotřebením měnit. Z tohoto důvodu byla zvolena průměrná hodnota zatížení jednoho zubu v jedné otáčce. Pro další analýzy by ovšem mohlo být vhodné např. již zmíněné srovnávání maximálně zatěžovaného břitu, případně minimálně zatěžovaného.

Porovnání kombinací nástrojů a upínačů při frézování Ti64

V této části došlo k porovnání jednotlivých kombinací nástrojů a upínačů použitých pro frézování materiálu Ti64. Již ze základních spojnicových grafů dílčích analýz lišících se v některých podmínkách frézování, lze rozpoznat, která sestava se jeví nejvýhodněji. Následně je ovšem statistickou interpretací tento první vizuální náhled potvrzen nebo vyvrácen. V první části, kde je obráběno za podmínek $a_p = 8$ mm (viz. kap. 5.3.1) se nejlépe jeví sestava 5W (data č. 31), tedy použití pětibřité frézy upnuté ve weldonovém upínači. Toto plyne z nejnižše položených dat v grafu (viz. obr. 5.12) a zároveň tento datový soubor je charakteristický nízkou variabilitou v porovnání s ostatními. Přinejmenším zajímavé je, že velmi podobnou variabilitu má datový soubor z měření sestavou 4T. Jejich statisticky nevýznamnou odlišnost prokázal test rovnosti rozptylů na obr. 5.15. Závěrem plynoucím z toho testu by tedy mohlo být, že v případě frézování za daných podmínek, tedy při $a_p = 8$ mm, kdy dochází k odebrání povrchové vrstvy, je nejlépe vhodné použití sestavy 5W. V situaci, kdy naopak dochází k frézování čtyřbřitou frézou, se zde zdá být vhodnější použití tepelného upínače.

Druhou měřenou variantou bylo frézování s odebráním povrchové vrstvy při $a_p = 4$ mm. Spojnicový graf na obr. 5.17 opticky vykazuje lepší výsledky pro sestavy 5W a 5T. Z tab. 5.6 lze vidět, že sestava 5W vychází ve všech ohledech nejlépe. Tedy obdobně jako v předchozím případě. I zde by v případě použití frézy se čtyřmi zuby bylo nejvhodnější použití tepelného upínače. V tomto případě jsou od sebe rozptýly těchto datových souborů statisticky významně odlišné. Naopak podobají se rozptýly dat sestav 4T a 5T. Tedy zde se jeví podobný vliv tepelného upínače na variabilitu procesu, naopak v předchozím případě při $a_p = 8$ mm byly variability značně odlišné.

Třetí variantou bylo frézování v místě, kde již byla dříve odstraněna povrchová vrstva, za podmínky $a_p = 4$ mm. I zde dle tab. 5.7 a grafu na obr. 5.21 je rozpoznatelné nejlepší chování sestavy 5W. Vyznačuje se nejnižší střední hodnotou, mediánem, směrodatnou odchylkou i rozsahem. Stejně jako v předchozím případě, i zde test rovnosti rozptylů na obr. 5.24 odhalil podobnost variabilit sestav 4T a 5W.

Dalším blok vyhodnocení spočíval v testování rovností rozptylů datových souborů, které byly pořízeny při frézování stejnou sestavou. Vždy byly testovány tři soubory dat, které se liší podmínkami obrábění, jimiž bylo nastavení $a_p = 4$ mm nebo 8 mm, a obrábění s/bez povrchové vrstvy. První test datových souborů sestavy 4W neprokázal podobnost rozptylů, stejně jako test skupiny dat 4T. V případě sestavy 5W bylo Lavenovým testem (viz. obr. 5.28) prokázáno, že rozptyly nejsou statisticky významně odlišné. U poslední kombinace jsou si podobné variability u dvou ze tří měření, kdy bylo frézováno za podmínky stejné hodnoty a_p .

Tato zde vyřčená tvrzení by ovšem bylo vhodné podložit opakováním testů. Navíc je třeba počítat s faktem, že vyložení nástrojů upnutých v tepelném upínači je značně větší než ve weldonovém. V případě použití stejně vyložených upínacích trnů by mohly vyplynout jiné výsledky. Proto by pro přesnější určení nejlépe se chovající sestavy bylo lépe testy opakovat.

Faktorový vliv na velikost výsledné měřené síly – Ti64

Tato analýza testuje vliv jednotlivých faktorů na střední hodnotu měřené síly a na směrodatnou odchylku. Faktoriální tab. 5.9 obsahuje všechny kombinace faktorů a_p , nástroje a upínače. V prvním případě test dle Paretova diagramu na obr. 5.34 prokázal, že na střední hodnotu F_{VM} má vliv pouze a_p a fréza. Nedochozí zde k vlivu upínače ani k vlivům žádné z možných interakcí. Jiný případ nastává, pokud je jako odezva zvolena variabilita, tedy směrodatná odchylka. Výsledek na obr. 5.38 ukazuje pouze jediný statisticky významný vliv, jímž je interakce frézy a upínače. Síla tohoto testu je ovšem pro malý pozorovaný efekt malá. Pro přesné určení vlivů by bylo nutné test alespoň 1x opakovat. V případě sledování vyšších hodnot efektu ovšem lze výsledky testu orientačně uvažovat. S určitým předpokladem, kdy sledujeme vyšší efekt lze říci, že na průměrnou velikost síly má vliv a_p a fréza, zatímco upínač nikoliv. Naopak na variabilitu samostatně jednotlivé faktory vliv nemají, přičemž významným se zde stává společné působení nástroje s upínačem.

Silové zatížení v závislosti na materiálu

Pro přiblížení rozdílů v silových zatíženích byl obráběn druhý, ne příliš problémový materiál Ti55531. Znovu proběhly testy i na Ti64. Na každém z materiálů byly provedeny dvě sady stejných měření. V případě Ti64 byla získána opakovaná měření sestavami 4W a 5T. Každá sestava obsahuje pět po sobě jdoucích stejných měření, pro zvýšení síly testu. Pro každou sadu byly vyhodnoceny testy rovností rozptylů. Dle obr. 5.41 a obr. 5.42, zobrazujících výsledky testů skupin 4W a 5T bylo zjištěno, že variability stejných opakovaných měření se ne vždy shodují, naopak se často liší. Předpokladem by obecně mohlo být, že variability měření za stejných podmínek budou velmi podobné. U druhého materiálu, kdy bylo obdobně testováno sestavami 4T a 5W jsou variability více podobné. V případě 5W není žádný z rozptylů statisticky významně odlišný.

Při pohledu na tab. 5.12, konkrétně na sloupec směrodatné odchylky lze vidět, že vždy první měření v jednotlivých skupinách vykazují znatelně vyšší variabilitu než zbytek sady. Proto by bylo vhodné provést další testy eliminující tento problém. U materiálu Ti64, dle tab. 5.10 toto tvrzení neplatí, variability se různě liší. Díky informacím získaným z analýzy tohoto materiálu, zpracované v kap. 4.1.1, se lze tedy domnívat, že vliv na variabilitu má do značné míry dané místo, kde dochází k frézování. Tato analýza prokázala značně lepší obrobiteľnosť materiálu Ti55531. Tento výsledok je zřejmý již z pouhého pohledu na rozdílnost grafů na obr. 5.40 a obr. 5.45. Ačkoliv testy na jednotlivých materiálech nebyly provedeny stejnými sestavami, rozdíly jsou i tak značné. Především ve variabilitě procesu, která je při obrábění taženého materiálu Ti64 až 7x vyšší než v případě frézování Ti55531.

Celkově by bylo vhodné u všech analýz provést více testů, více opakování. Fakt objevený při vyhodnocování měření prováděných za stejných podmínek, tedy že dochází k proměnným variabilitám, do jisté míry snižuje síly všech předchozích testů. V některých tescích, kdy bylo k dispozici vždy pouze jen jedno měření, by mohlo být při opakování dosaženo jiných výsledků. Z důvodu znatelně rozdílných variabilit při obrábění Ti64 by pro eliminaci tohoto problému muselo být vždy vícekrát měřeno, lze ovšem diskutovat nad počtem těchto měření. Z hlediska statistiky je obecně doporučováno měření 3x – 5x opakovat. Při pohledu na problém ze strany technologie obrábění a problematiky materiálu není na základně zjištěných skutečností možné jasně stanovit počet takovýchto opakování. V každém případě ovšem jakákoliv další měření zvyšují síly testů.

ZÁVĚR

Základní oblast experimentální části, zabývající se analýzou obou frézovaných materiálů, tedy Ti64 a Ti55531, poskytuje podklad k vyvození závěrů.

Vyhodnocení experimentu práce nejprve potvrdilo nerovnoměrnost rozložení zubů u obou použitých nástrojů. S tímto faktem bylo nutné počítat, proto byl vytvořen spolehlivý filtrační nástroj (viz. kap. 5.1.5) k získání klíčových hodnot pro správné vyhodnocení. Zpracování základní oblasti experimentu, která porovnává oba materiály v kap. 5.5 prokázalo značně horší obrobitelnost materiálu Ti64 v podobě:

- až sedminásobně vyšší variability obráběcího procesu,
- odlišnosti variabilit měření provedených při stejných podmínkách.

Na základě informací zjištěných z analýzy materiálu zpracované v kap. 4.1.1 lze předpokládat, že na horší obrobitelnost může mít vliv:

- značně nerovnoměrný povrch materiálu vzniklý pravděpodobně metodou výroby – tažením (viz. obr. 4.4)
- lamelární struktura taženého materiálu Ti64
- velký podíl alfa fáze ve struktuře (HCP mřížka), beta fáze (BCC mřížka) pouze (10 – 20) %,
- nasycená povrchová vrstva kyslíkem a dusíkem (viz. obr. 4.10), z čehož plyne zvýšená tvrdost této vrstvy (viz. průběh tvrdosti na obr. 4.8).

O mnoho lepší obrobitelnost, viditelná jako menší variabilita, druhého materiálu Ti55531, jehož analýza je zpracována v kap. 4.1.2 může být spojována s mnohem větším podílem beta fáze ve struktuře. Zároveň zde není nerovná, prvky obsaženými ve vzduchu nasycená povrchová vrstva.

Test jednotlivých kombinací nástrojů a upínačů (viz. kap. 5.3.1, 5.3.2, 5.3.3) použitých při frézování Ti64 prokázal nejlepší chování frézy s pěti zuby upnuté ve well-donovém upínači (označení sestavy 5W). Toto stanovisko lze na základě vyhodnocení zaujmout pro všechny tři varianty použitých podmínek frézování (frézování při $a_p = 8$ mm vč. povrchové vrstvy, $a_p = 4$ mm vč. povrchové vrstvy a $a_p = 4$ mm bez. povrchové vrstvy). Ve všech těchto případech jsou variability datových souborů sestavy 5W v porovnání s ostatními kombinacemi upínačů a nástrojů jedny z nejmenších (ve dvou případech nejmenší, v jednom je variabilita téměř srovnatelná s nejnižší). Střední hodnoty měřené síly jsou jednoznačně nejmenší ve všech třech případech. Navíc test rovnosti rozptylů datových souborů získaných při frézování sestavou 5W prokázal (viz. kap 5.3.4), že tyto nejsou statisticky významně odlišné. Tedy při frézování sestavou 5W jsou variability ve všech třech variantách podobné.

Z faktorové analýzy, zpracované v kap. 5.4 vyplývají dva různé výsledky, v závislosti na pozorované odezvě. V případě, kdy je pozorovanou odezvou střední hodnota síly F_{VM} plynou z Paretova diagramu na obr. 5.34 následující závěry:

- statisticky významný vliv má pouze a_p a fréza,
- upínač nemá vliv,
- není zde prokazatelně významný vliv jakékoliv interakce.

Pokud je za odezvu považována směrodatná odchylka, tedy charakteristika popisující variabilitu procesu, výsledky faktorové analýzy vypadají jinak. Dle Paretova diagramu, zobrazeného na obr. 5.38 plynou tyto výsledky:

- statisticky významný vliv má pouze společné působení nástroje a upínače,
- vliv a_p ani dalších samostatných faktorů nebyl prokázán.

Celkové vyhodnocení měřených testů odhalilo množství faktů, se kterými je třeba při dalších podobných analýzách počítat. Zásadní je zde počet měření, která byla provedena. Opakování jednotlivých měření zpřesňuje výsledky testů, především faktorových. Řešená problematika popsala titanové slitiny jako materiály, které nepatří ke snadno obrobitelným. Nejen chemické složení slitiny, ale i způsob výroby a tepelné zpracování mají značný vliv na charakter následného obrábění. Na základě dostupných možností testování bylo možné dojít ke zde zmíněným závěrům. Vždy je třeba ovšem zohlednit jisté skutečnosti, jimiž se zabývá diskuse této diplomové práce.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. FOREJT, Milan, Anton HUMÁR, Miroslav PÍŠKA a Libor JANÍČEK. *EXPERIMENTÁLNÍ METODY: SYLABUS* [online]. Brno, 2003 [vid. 2013-03-20]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/experimentalni_metody__cviceni__forejt_piska_humar_janicek.pdf. Syllabus. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
2. HUMÁR, Anton. *Přednášky z předmětu HE1 Experimentální metody*. 2012/2013. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
3. GEOTEST INSTRUMENT CORPORATION. *Geotest Product Information: S1704-S1715 Load Rings* [online]. c 2013 [vid. 2013-03-24]. Dostupné z: <http://www.geotestusa.com/Catalog/ItemInfo.php?id=S1704-S1715>
4. HRUBEŠOVÁ, Eva. FAKULTA STAVEBNÍ VŠB-TU OSTRAVA. *GEOTECHNICKÝ MONITORING: Způsoby monitorování* [online]. c 2013 [vid. 2013-03-24]. Dostupné z: http://fast10.vsb.cz/hrubesova/mon12.htm#_12.1.1_Ploché_dynamometry
5. VÉVODA, Antonín. *Modernizace brzdového stanoviště pro spalovací motory*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. David Svída.
6. JANATA, Vladimír. *Konstrukce protihlukového tunelu na Městském okruhu v Hradci Králové* [online]. 2009 [vid. 2013-03-25]. Dostupné z: <http://www.casopisstavebnictvi.cz/clanek.php?detail=2106>
7. BURSTER PRAEZISIONSMESSTECHNIK GMBH & CO KG. *Tension and Compression Load Cell* [online]. c 2012 [vid. 2013-03-25]. Dostupné z: <http://www.burster.com/en/products/sensors.html?Load/Standard%20tension%20and%20compression%20load%20cells/8524/350>
8. FYZMATIK. *Piezoelektrický jev* [online]. 2008 [vid. 2013-03-25]. Dostupné z: <http://fyzmatik.pise.cz/573-piezoelektricky-jev.html>
9. *Piezoelektrický jev: mechanismus vzniku elektrické polarizace při deformaci. Wikipedie, otevřená encyklopedie* [online]. c 2013 [vid. 2013-03-30]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Piezoelektrick%C3%BD_jev
10. KRÁLOVÁ, Magda. FYZIKA V POZADÍ, Vědci a vynálezci. *Piezoelektrický jev* [online]. c 2008 [vid. 2013-03-30]. Dostupné z: http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=456c656b74f8696e612061206d61676e657469736d7573h&key=28

11. *Tenkovrstvé piezoelektrické senzory* [pdf]. Praha, c 2011 [vid. 2013-03-30].
Dostupné z: http://fchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/nano/predmety/senzory/14_senzory_QCM.pdf. Syllabus. Fakulta chemicko-inženýrská VŠCHT v Praze.
12. Understanding Quartz Crystals. *Engineer's Library: technology* [online].
c 2013, č. 1 [vid. 2013-03-30]. Dostupné z: http://www.mtronpti.com/pdf/contentmgmt/understanding_quartz_crystals.pdf
13. KISTLER GROUP. *MiniDyn: Multicomponent Dynamometer up to 4 000 N: Cover Plate 55x80 mm*. Switzerland, c 2013.
Dostupné z: <http://www.kistler.com/cz/en/product/force/9119AA1>
14. KISTLER GROUP. *Multicomponent Force Plate*. Switzerland,
c 2009. Dostupné z: <http://www.kistler.com/cz/en/product/force/9253B12>
15. KISTLER GROUP. *Multicomponent Dynamometer: Piezo-Dynamometer with Large Measuring Range*. Switzerland, c 2009.
Dostupné z: <http://www.kistler.com/cz/en/product/force/9257B>
16. *TECHNOLOGIE I: TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 1. část* [online]. Brno, 2003
[vid. 2013-04-02]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf. Studijní opory. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
17. NOVÁ, Iva, Stanislava KRÝSLOVÁ a Zdeňka KRÝSLOVÁ. Metody bezdotykového měření teploty. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2004, č. 11
[vid. 2013-04-02]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/metody-bezdotykoveho-mereni-teploty.html>
18. Barevná teplota. *Megapixel.cz* [online]. c 2012 [vid. 2013-04-02].
Dostupné z: <http://www.megapixel.cz/barevna-teplota>
19. MALÝ, Jan a Pavel ZEMAN. Suché frézování materiálu Ti6Al4V vysokými rychlostmi. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2006, č. 12 [vid. 2013-05-12].
Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/suche-frezovani-materialu-ti6al4v-vysokymi-rychlostmi.html>
20. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: CERM, 2006, s. 173. ISBN 80-214-2374-9.
21. *Frentech* [online]. c 2010 [vid. 2013-04-26].
Dostupné z: http://www.frentech.eu/index_c.php

22. WARCHOMICKA, F., M. STOCKINGER a H. P. DEGISCHER. Flow behaviour and microstructure during hot deformation of Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-1Zr. *Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie* [online]. 2007 [vid. 2013-05-13]. Dostupné z: http://www.tuwien.ac.at/fileadmin/t/wwwt/forschung/GW/Bilder/Ti2007_%20Warchomicka_01.pdf
23. Úvodní strana. *Gühring* [online]. c 2013 [vid. 2013-03-17]. Dostupné z: <http://www.guhring.cz/uvodni-stranka>
24. FRÉZY: KOMPLETNÍ PROGRAM 2007. *GUHRING* [online]. 2007 [vid. 2013-04-05]. Dostupné z: http://www.guhring.cz/data/produkty/cz_18.pdf
25. Guhring, Inc. - Variable Helix. *Guhring, Inc.* [online]. c 2013 [vid. 2013-04-09]. Dostupné z: <http://www.guhring.com/ProductsServices/CarbideEndMills/Variable>
26. FIREX. *Guhring, Inc.* [online]. c 2013 [vid. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://www.guhring.com/ProductsServices/CoatingServices/FIREX>
27. KENNAMETAL INC. *AEROSPACE: SUSTAINABLE SOLUTIONS*. Latrobe (Pennsylvania), 2011. Dostupné z: http://www.kennametal.com/content/dam/kennametal/kennametal/common/Resources/Catalogs-Literature/Industry%20Solutions/A-09-02311_aerospace_catalog.pdf
28. KENNAMETAL INC. *Harvi II Carbide End Mills: 5 Flutes with Unequal Flute Spacing*. Latrobe (Pennsylvania), 2008.
29. KENNAMETAL INC. *Dramatically Improve Metal Removal Rates with the Next Generation HARVI II*. Latrobe (Pennsylvania), 2007.
30. Upínače nástrojů (2). *Technický týdeník* [online]. 2012 [vid. 2013-04-05]. Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/upinace-nastroju/upinace-nastroju-2_8498.html
31. Tepelné upínače nástrojů: DIN 69871 AD / B. *TEPELNÉ UPÍNAČE NÁSTROJŮ* [online]. [2013] [vid. 2013-04-05]. Dostupné z: <http://tepelne-upinace.kvalitne.cz/69871.php>
32. KUCHAR, Dušan. Druhá generace tepelných upínačů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007, č. 4 [vid. 2013-04-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/druha-generace-tepelnych-upinacu.html>
33. Držáky pro tepelné upínání nástrojů SK a HSS se stopkou v toleranci h6 - 4,5°. *Pilana MCT* [online]. c 2013 [vid. 2013-04-05]. Dostupné z: <http://www.pilanamct.cz/cz/drzaky-pro-tepelne-upinani-nastroju-sk-a-hss-se-stopkou-v-toleranci-h6-450-83.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
Al	-	Hliník
BCC	-	Body Centred Cubic
CNC	-	Computer Numerical Control
Cr	-	Chrom
D	[mm]	průměr frézy
EDX	-	Energy-dispersive X-ray spectroscopy
F_{vM}	[N]	průměrná F_{xyzM} působící na jeden zub v jedné otáčce, v místě maximálního zatížení zubu
F_{xM}	[N]	složka výsledné měření síly působící v ose x
F_{yM}	[N]	složka výsledné měření síly působící v ose y
F_{zM}	[N]	složka výsledné měření síly působící v ose z
F_{xyM}	[N]	výslednice měřených složek F_{xM} a F_{yM}
F_{xyzM}	[N]	Výsledná měřená síla
F_{xyMz}	[N]	průměrná F_{xyM} působící na jeden zub v jedné otáčce, v místě maximálního zatížení zubu
F_{xyzMz}	[N]	průměrná F_{xyzM} působící na jeden zub v jedné otáčce, v místě maximálního zatížení zubu
G4	-	čtyřbřitá fréza GUHRING
HRC	-	tvrdost dle Rockwella
HCP	-	Hexagonal Close Packed
HV	-	tvrdost dle Vickerse
KT	[mm]	hloubka výmolu na čele
KVy	[mm]	radiální opotřebení špičky
K5	-	pětibřitá fréza KENNAMETAL
Mo	-	Molybden
N	-	Dusík

O	-	Kyslík
PVD	-	Physical Vapour Deposition
SK	-	slinutý karbid
T	-	tepelný upínač
Ti	-	Titan
V	-	Vanad
VB	[mm]	šířka fazetky opotřebení na hřbetě
W	-	weldonový upínač
Zr	-	Zirkon
a_e	[mm]	pracovní záběr
a_p	[mm]	šířka záběru ostří
f	$[\text{mm}^{-1}]$	posuv
f_z	$[\text{mm}^{-1}]$	posuv na zub
hod_{ot}	-	počet hodnot reprezentujících jedno otočení frézy
$\text{hod}_{\text{ot}/4}$	-	počet hodnot reprezentujících čtvrtinu otáčky frézy
$\text{hod}_{\text{ot}/5}$	-	počet hodnot reprezentujících pětinu otáčky frézy
hod_{per}	-	počet hodnot po kolika je jeden určený bod ve stejné pozici
n	$[\text{min}^{-1}]$	otáčky frézy
s	-	směrodatná odchylka
s^2	-	rozptyl
t_{ot}	s	doba jedné otáčky frézy
$t_{\text{ot}7}$	s	doba sedmi otáček frézy
t_{z4}	s	doba otočení čtvrtiny frézy
t_{z5}	s	doba otočení pětiny frézy

v_c	$[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$	řezná rychlost
v_f	$[\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$	posuvová rychlost
$\bar{x}$	-	střední hodnota síly
$\tilde{x}$	-	medián
x_{ot}	-	počet otáček po kolika se určený bod dostane do stejného místa
z	-	počet zubů frézy
4W	-	sestava čtyřbřité frézy a weldonového upínače
5T	-	sestava pětibřité frézy a tepelného upínače

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Dynamometr KISTLER 9257B
- Příloha 2 Fotografie struktury materiálu Ti-Al6-V4
- Příloha 3 Fotografie struktury materiálu Ti-Al5-Mo5-V5-Cr3-Zr1

Příloha 1 (1/3)

Dynamometr KISTLER 9257B – rozměry frézování, broušení [15]

Dimensions Milling, Grinding

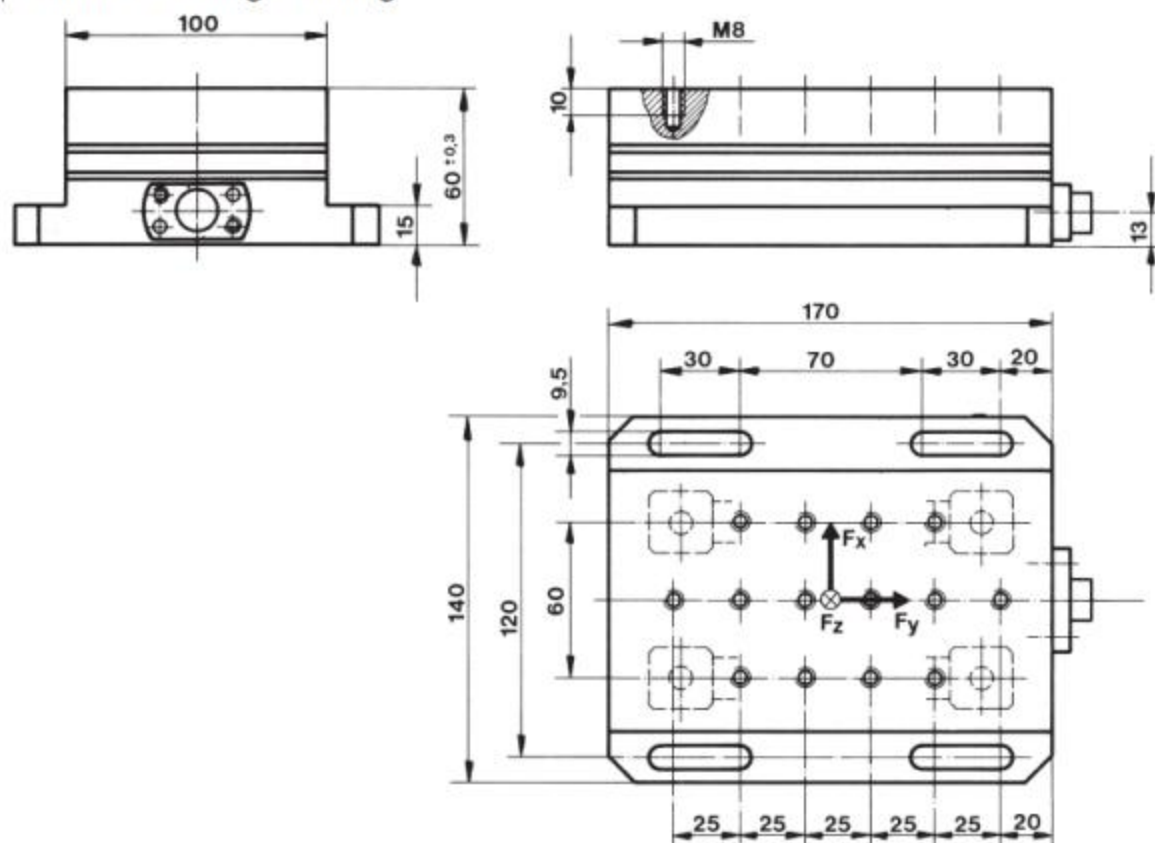
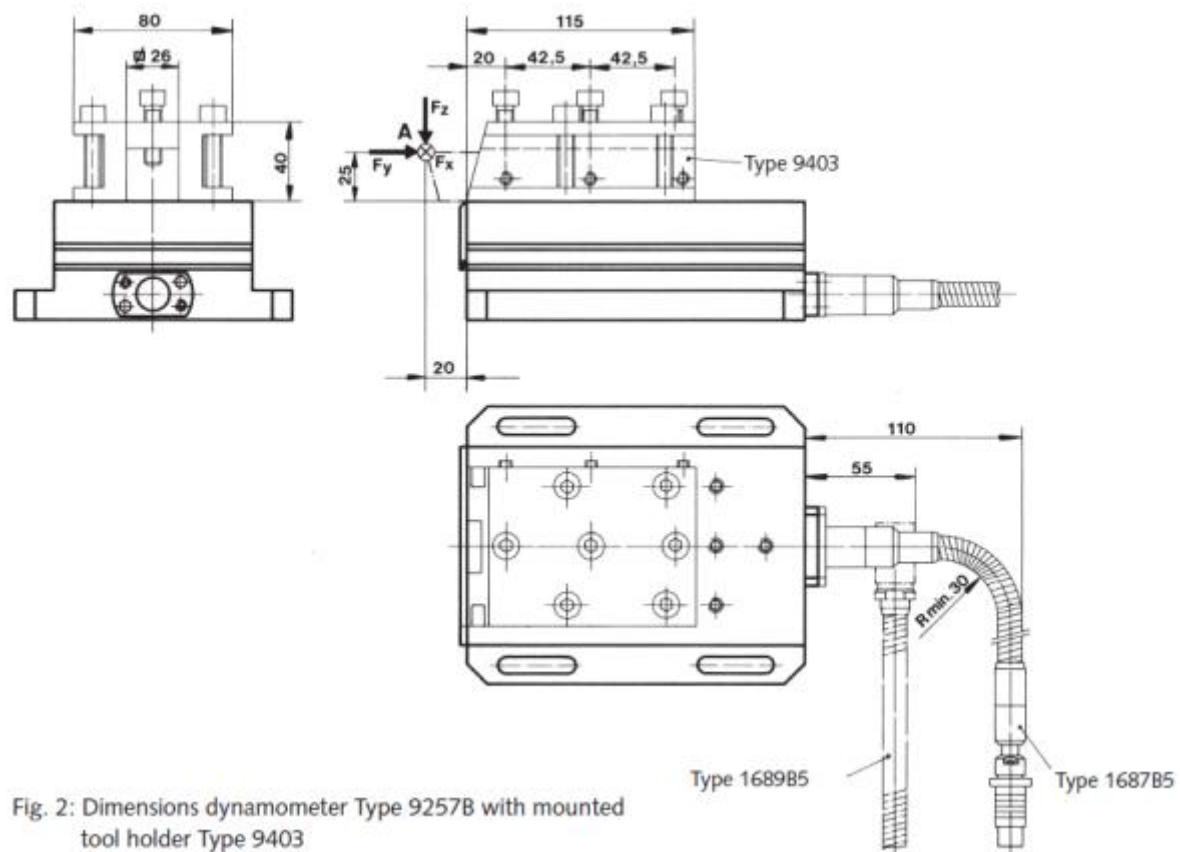


Fig. 1: Dimensions dynamometer Type 9257B

Příloha 1 (2/3)

Rozměry soustružení [15]

Dimensions Turning



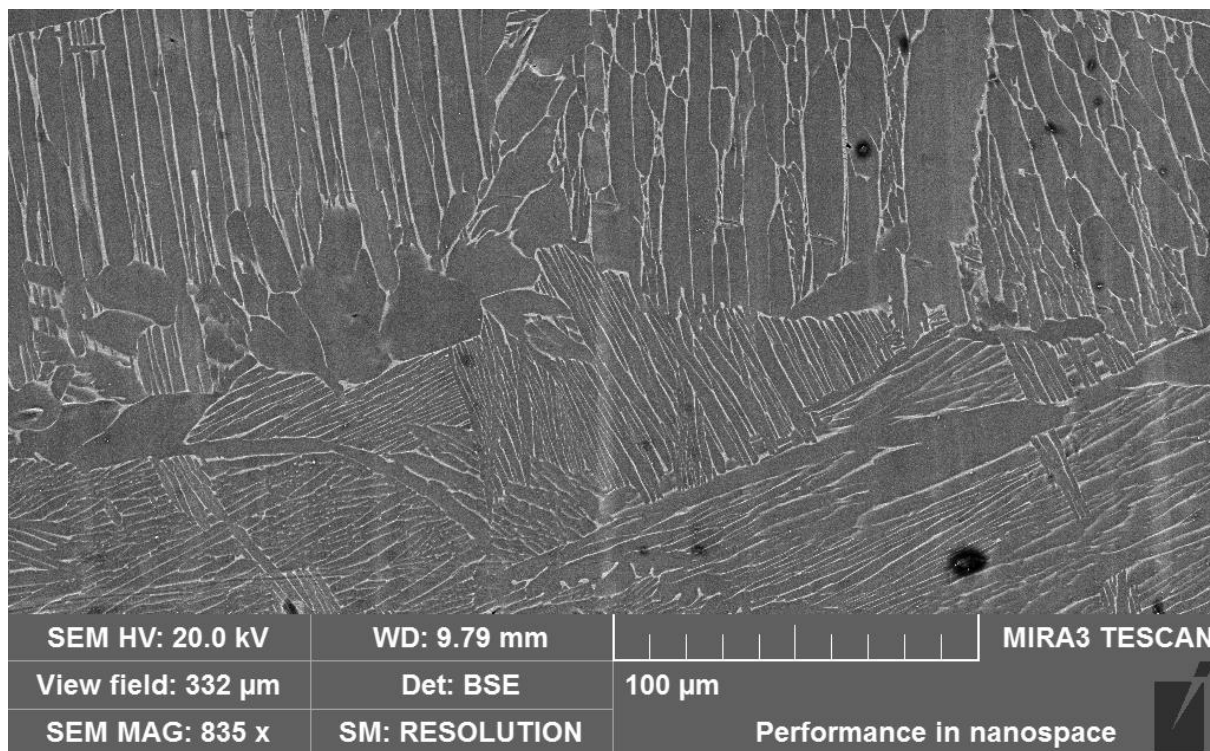
Příloha 1 (3/3)

Technická data [15]

Range	F_x, F_y, F_z	kN	$-5 \dots 5^{1)}$
F_z for F_x and $F_y \leq 0,5 F_z$	F_z	kN	$-5 \dots 10^{2)}$
Calibrated partial range 1	F_x, F_y	N	0 ... 500
	F_z	N	0 ... 1 000
Calibrated partial range 2	F_x, F_y	N	0 ... 50
	F_z	N	0 ... 100
Overload	F_x, F_y, F_z	kN	$-7,5/7,5$
F_z for F_x and $F_y \leq 0,5 F_z$	F_z	kN	$-7,5/15$
Threshold		N	$<0,01$
Sensitivity	F_x, F_y	pC/N	$\approx -7,5$
	F_z	pC/N	$\approx -3,7$
Linearity, all ranges		%FSO	$\leq \pm 1$
Hysteresis, all ranges		%FSO	$\leq 0,5$
Cross talk		%	$\leq \pm 2$
Rigidity	C_x, C_y	kN/ μ m	>1
	C_z	kN/ μ m	>2
Natural frequency	$f_n(x, y, z)$	kHz	$\approx 3,5^{4)}$
Natural frequency (mounted on flanges)	$f_n(x, y)$	kHz	$\approx 2,3^{4)}$
	$f_n(z)$	kHz	$\approx 3,5^{4)}$
Operating temperature range		°C	0 ... 70
Capacitance	F_x, F_y, F_z	pF	≈ 220
Insulation resistance (20 °C)		Ω	$>10^{13}$
Ground insulation		Ω	$>10^8$
Protection class EN60529		–	IP67 ³⁾
Weight		kg	7,3
Clamping area	mm	100x170	
Connection		Fischer flange, 9 pol. neg.	

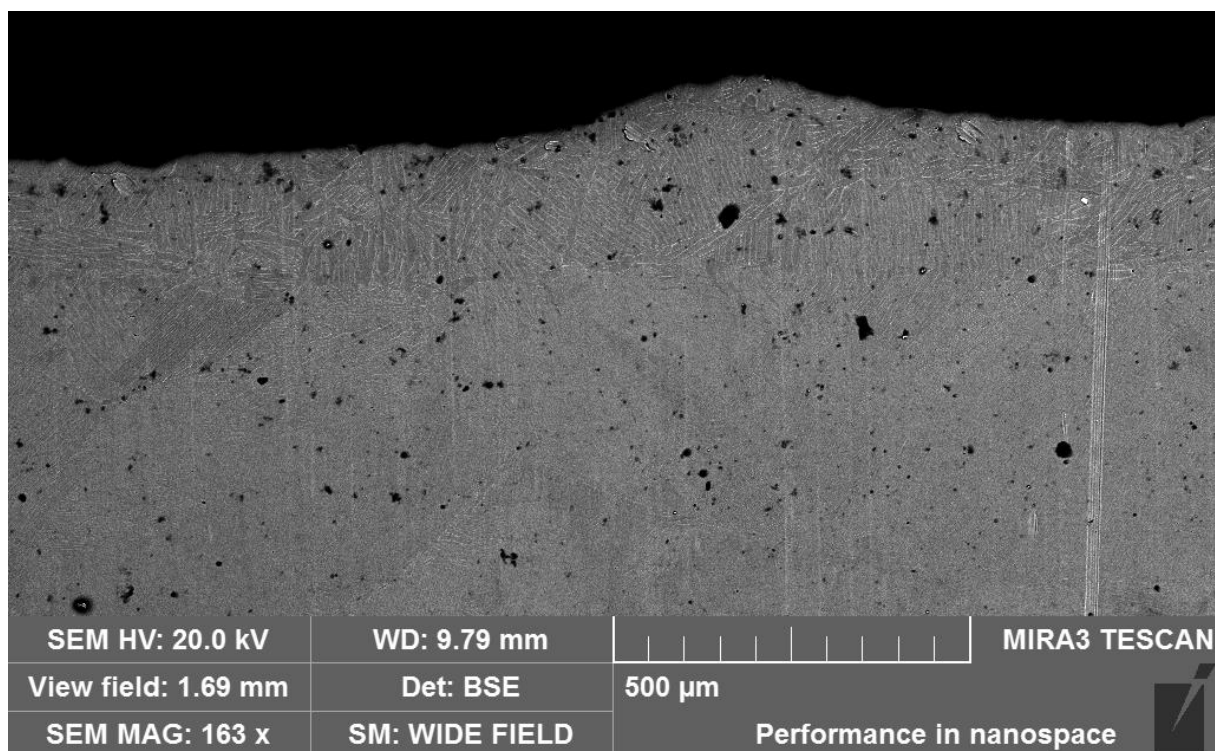
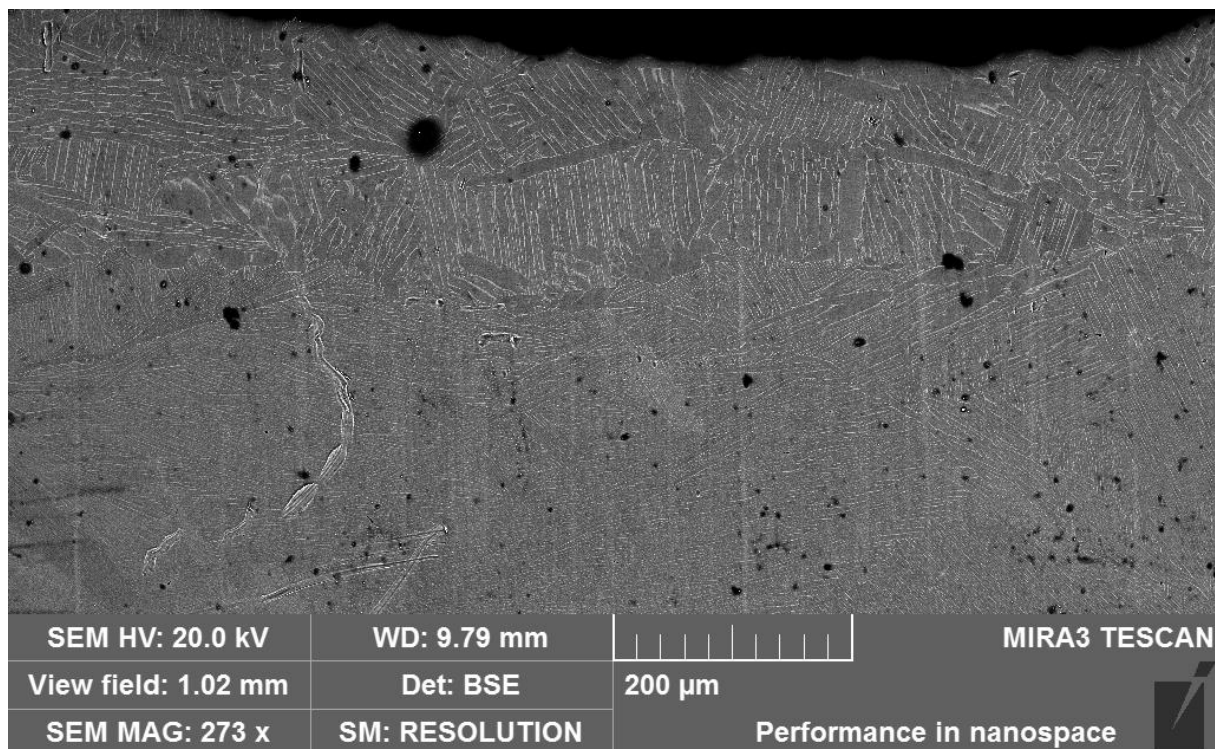
Příloha 2 (1/5)

Fotografie struktury materiálu Ti-Al6-V4 – rozhraní zhrublé struktury



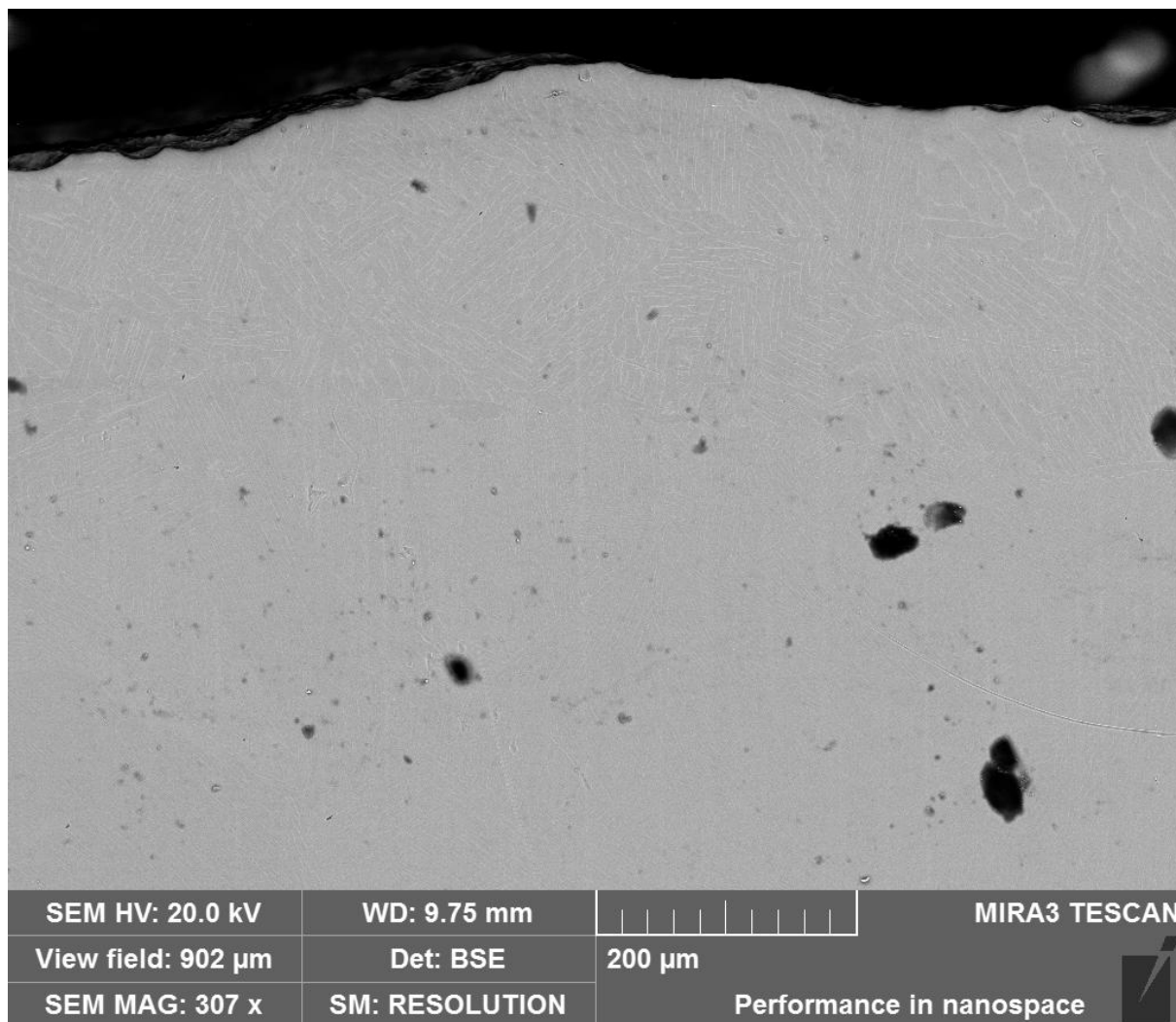
Příloha 2 (2/5)

Povrchová vrstva se zhrublou strukturou – viditelné rozhraní (pohled 1, 2)



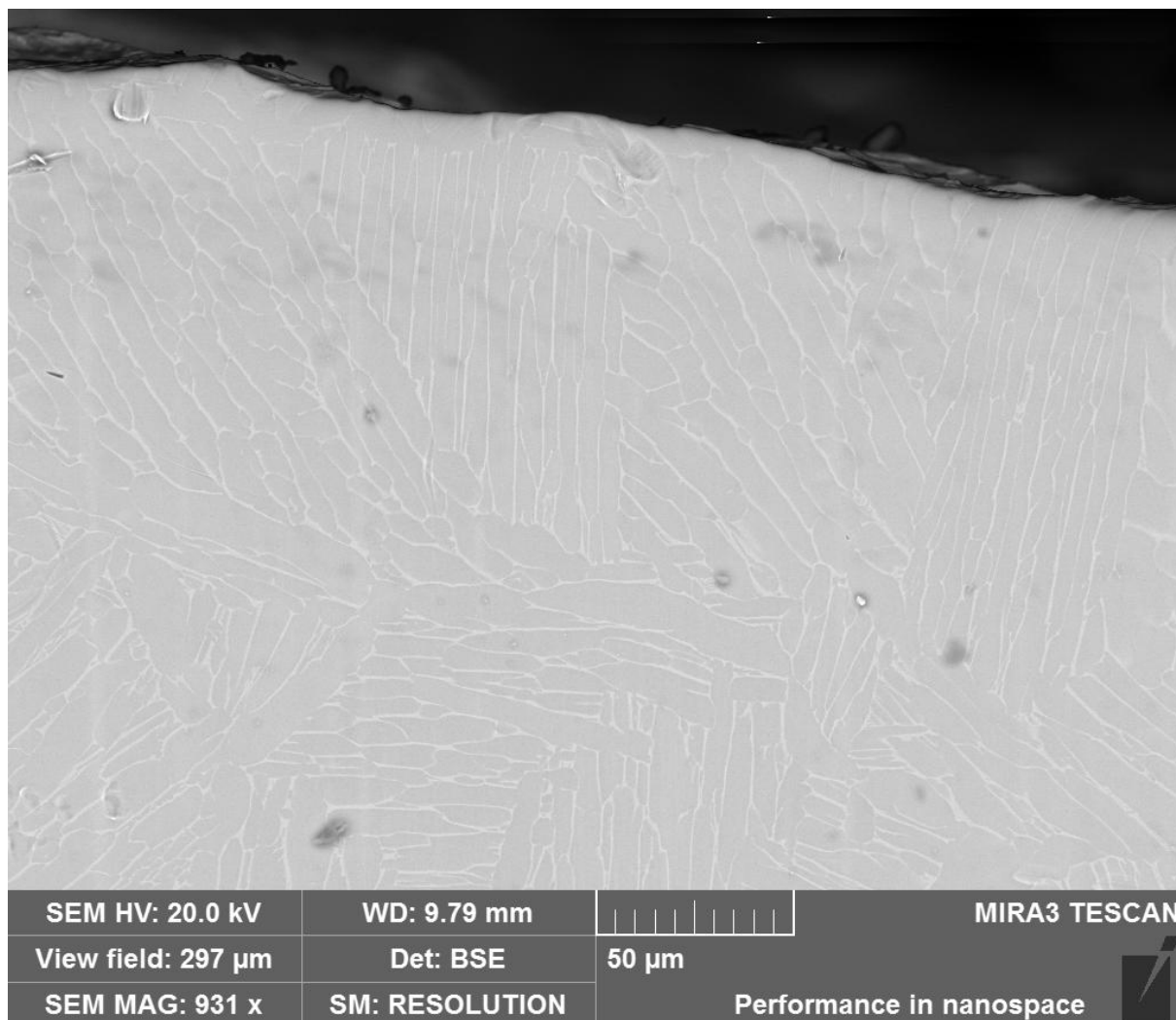
Příloha 2 (3/5)

Povrchová vrstva se zhrublou strukturou – viditelné rozhraní (pohled 3)



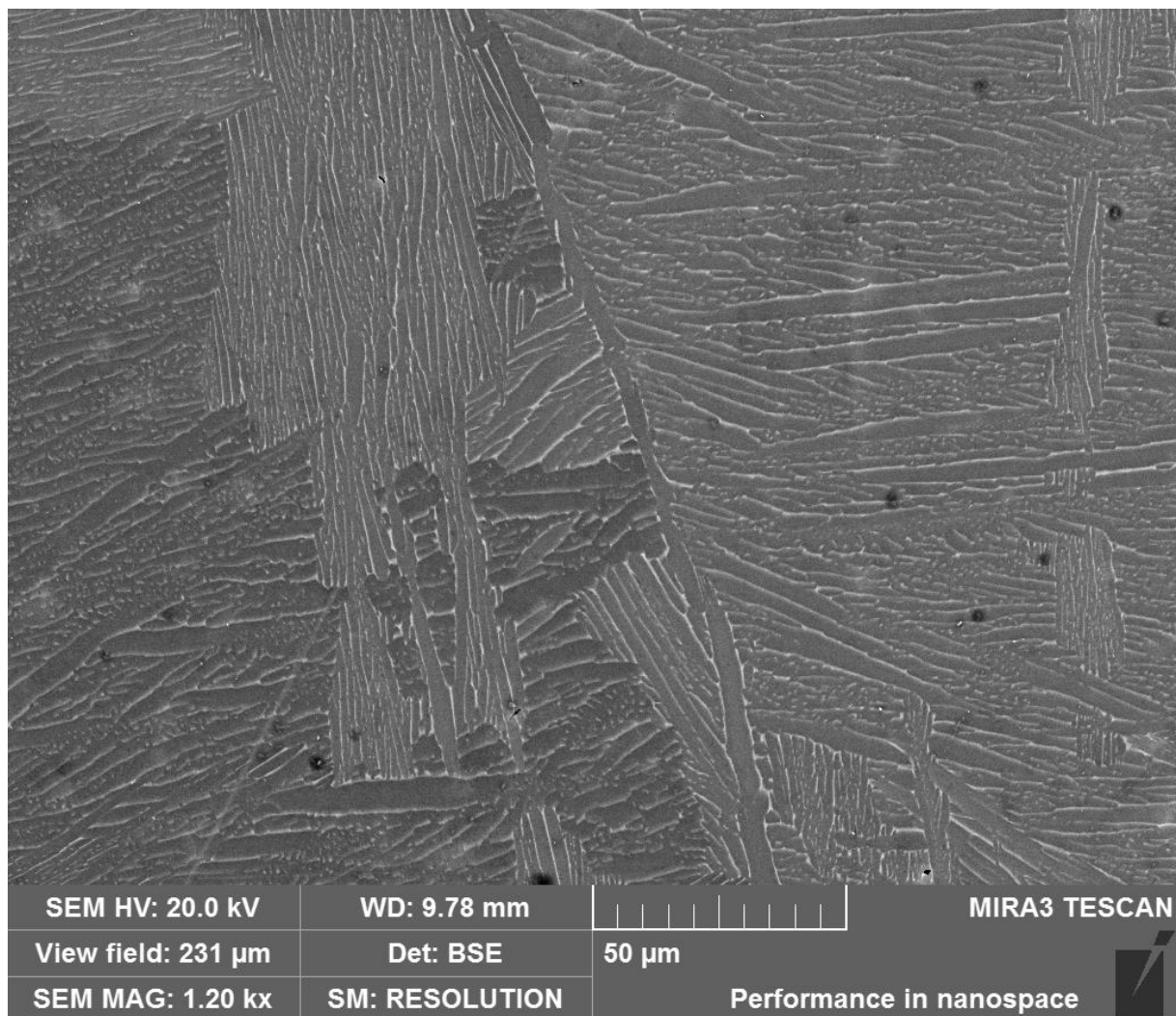
Příloha 2 (4/5)

Povrchová vrstva se zhrublou strukturou



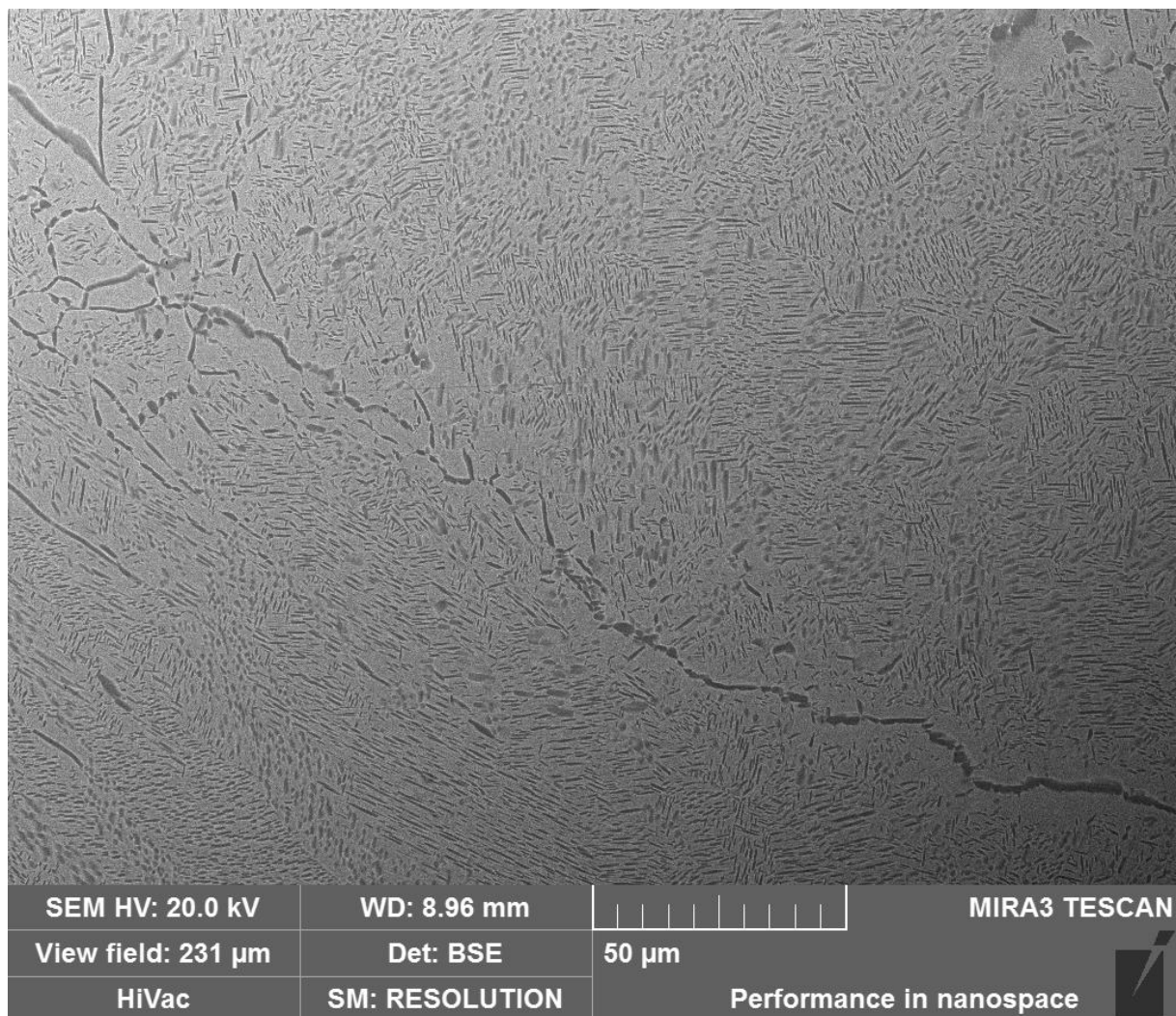
Příloha 2 (5/5)

Hranice zrn



Příloha 3 (1/2)

Fotografie struktury materiálu Ti-Al5-Mo5-V5-Cr3-Zr1 – (pohled 1)



Příloha 3 (2/2)

Struktura – (pohled 2)

