

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2031 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2303V004 Strojírenská technologie-technologie obrábění

DISERTAČNÍ PRÁCE

Příspěvek k experimentálnímu stanovení modelu silového zatížení
šroubovitého vrtáku

Autor: **Ing. Josef Sklenička**

Školitel: **doc. Ing. Josef Škarda, CSc.**

Konzultant specialista: **Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**

Akademický rok 2016/2017

PROHLÁŠENÍ O AUTORSTVÍ

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě písemnou práci ke státní doktorské zkoušce, zpracovanou na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci na téma:

Příspěvek k experimentálnímu stanovení modelu silového zatížení šroubovitého vrtáku

vypracoval samostatně, pod odborným dohledem školitele a s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

V Plzni dne:.....

.....

Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych na tomto místě poděkoval mým dvěma školitelům Doc. Ing. Josefu Škardovi CSc. a Ing. Miroslavu Zetkovi, Ph.D. za jejich vedení, věcné připomínky v průběhu celého studia a především při zpracování této disertační práce.

Dále bych chtěl poděkovat Katedře technologie obrábění a Regionálnímu technologickému institutu za zázemí, které mi během studia a řešení disertační práce poskytovaly. Rovněž velice děkuji Ing. Miroslavu Gombárovi, Ph.D. za pomoc v oblasti návrhu experimentu a statistického modelování. Dále děkuji všem osloveným, za jejich rady a připomínky, které mi v souvislosti s touto prací poskytovali.

Velký dík patří i mojí manželce, rodině a přátelům, bez jejichž podpory bych nemohl tuto práci zpracovat.

ANOTACE

AUTOR	Příjmení (včetně titulů) Ing. Sklenička	Jméno Josef
STUDIJNÍ OBOR	Strojírenská technologie-technologie obrábění	
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) doc. Ing. Škarda, CSc.	Jméno Josef
PRACOVISŤE VEDOUcíHO	Strojírenská technologie-technologie obrábění	
DRUH PRÁCE	disertační	
NÁZEV PRÁCE	Příspěvek k experimentálnímu stanovení modelu silového zatížení šroubovitého vrtáku	

Fakulta: Strojní
Katedra: Strojírenská technologie-technologie obrábění
Rok odevzdání: 2017

Počet stránek (A4 a ekvivalentů A4)

Celkem	133	Textová část	68	Grafická část	65
---------------	-----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Disertační práce je zaměřena na experimentální zjišťování silového zatížení šroubovitého vrtáku, konkrétně posuvové síly a krouticího momentu, za pomoci statistického modelování. Hlavním cílem práce je nalezení modelů závislosti posuvové síly a krouticího momentu v závislosti na geometrických parametrech šroubovitého vrtáku a technologických parametrech procesu vrtání.
KLÍČOVÁ SLOVA	šroubovitý vrták, posuvová síla, krouticí moment, statistický model

SUMMARY

AUTHOR	Surname (including of Degrees) Ing. Sklenička	Name Josef
FIELD OF STUDY	Technology of Metal Cutting	
SUPERVISOR	Surname (including of Degrees) doc. Ing. Škarda, CSc.	Name Josef
INSTITUTION	Technology of Metal Cutting	
TYPE OF WORK	dissertation	
TITLE OF THE WORK	Contribution to experimental determination of twist drill force load model	

Faculty: Mechanical Engineering
 Department: Technology of Metal Cutting
 Submitted in: 2017

Number of pages (A4 a eq. A4)

Totally	133		Text part	68		Graphical part	65
----------------	-----	--	------------------	----	--	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This dissertation thesis is focused on experimental investigation of force load on twist drill, feed force and cutting torque specifically, using statistical predicting. The main aim is to find feed force and cutting torque models dependent on the twist drill geometrical parameters and drilling process technological parameters.
KEY WORDS	twist drill, feed force, cutting torque, statistical model

Obsah

Seznam obrázků	7
Seznam tabulek	8
Seznam zkratk, symbolů a značek veličin.....	10
Úvod	13
1 Cíle disertační práce	15
2 Rozbor současného stavu	16
2.1 Základní popis šroubovitého vrtáku.....	16
2.2 Základní konstrukční prvky šroubovitého vrtáku.....	16
2.3 Geometrie břitu šroubovitého vrtáku.....	16
2.3.1 Nástrojové řezné úhly	17
2.3.2 Změna velikosti úhlu čela.....	18
2.4 Řezné síly při vrtání	19
2.4.1 Parametry ovlivňující velikost řezných sil	19
2.4.2 Standardní metody výpočtu řezných sil při vrtání.....	22
2.5 Experimentální zjišťování měrného řezného odporu	27
2.6 Experimentální měření řezných sil při vrtání	28
2.7 Navrhování a vyhodnocování experimentů DoE.....	28
2.8 Definice vybraných pojmů statistického plánování experimentu.....	33
3 Vlastní řešení disertační práce.....	34
3.1 Volba plánu experimentu	34
3.2 Experimentální materiál.....	34
3.3 Volba faktorů experimentu	38
3.3.1 Návrh experimentálních parametrů šroubovitého vrtáku	38
3.3.2 Návrh experimentálních řezných podmínek.....	40
3.3.3 Technologické parametry	41
3.4 Sestavení plánu experimentu.....	42
3.4.1 Experimentální šroubovitě vrtáky.....	43
3.5 Ověření vlivu polohy vrtaného otvoru na hodnotu F_f a M_c	44
3.5.1 Vyhodnocování naměřených dat F_f a M_c	45
3.5.2 Posouzení vlivu polohy na F_f a M_c	45
3.5.3 Zhodnocení vlivu polohy na hodnotu F_f a M_c	47
3.6 Hlavní experiment F_f a M_c	48
3.6.1 Realizace měření hlavního experimentu	48

3.6.2	Vyhodnocení naměřených dat F_f a M_c	48
3.6.3	Zhodnocení nalezených modelů pro F_f a M_c	58
3.7	Experimentální zjišťování jednotkového měrného řezného odporu.....	64
3.7.1	Návrh a realizace experimentu.....	64
3.7.2	Vyhodnocení získaných hodnot k_{c1} v závislosti na řezné rychlosti.....	64
3.7.3	Zhodnocení experimentálně získaných hodnot k_{c1} v závislosti na v_c	68
3.8	Validace přesnosti nalezených modelů pro F_f a M_c	73
3.8.1	Výběr porovnávacích metod výpočtu F_f a M_c	73
3.8.2	Validace výpočtu v bodech hlavního experimentu.....	75
3.8.3	Validace výpočtu v bodech ověřovacího experimentu.....	76
4	Souhrn výsledků a přínosů experimentální činnosti.....	79
	Závěr.....	81
5	Citovaná literatura.....	82
	Seznam publikovaných prací.....	85
	Přílohy.....	i

Seznam obrázků

Obrázek 2-1: Základní konstrukční prvky šroubovitého vrtáku	16
Obrázek 2-2: Nástrojová geometrie břitu šroubovitého vrtáku	18
Obrázek 2-3: Změna velikosti úhlu čela v závislosti na průměru vrtáku.....	18
Obrázek 2-4: Základní silový rozklad	19
Obrázek 2-5: Varianty ploch pro broušení hlavního hřbetu šroubovitého vrtáku	21
Obrázek 2-6: Určení koeficientu m_c	22
Obrázek 2-7: Hodnoty měrného řezného odporu pro vybrané materiály	23
Obrázek 2-8: Tabulka hodnot k_{c1} odporu pro skupinu ocelí P dle ISO	23
Obrázek 2-9: Příklad promítnutí řezných sil (rozkladu) v ortogonální rovině	26
Obrázek 2-10: Porovnání posuvové síly a krouticího momentu	26
Obrázek 2-11: Vliv řezných parametrů na průměrnou hodnotu k_c	27
Obrázek 2-12: Dynamometr Kistler pro měření řezných sil při vrtání	28
Obrázek 2-13: Schéma experimentu podle DoE	29
Obrázek 2-14: Body obsažené v centrálním kompozitním plánu	30
Obrázek 2-15: Normální rozdělení-Gaussova křivka	32
Obrázek 3-1: Struktura materiálu 12050 normalizačně žíhaného.....	35
Obrázek 3-2: Struktura materiálu 14220 normalizačně žíhaného.....	36
Obrázek 3-3: Struktura materiálu 19313 žíhaného na měkko.....	37
Obrázek 3-4: Struktura materiálu 19573 žíhaného na měkko.....	38
Obrázek 3-5: Znázornění stažení průměru nástroje	39
Obrázek 3-6: Tvar a velikost drážky pro vrták $D=8\text{mm}$ v rovině P_p	40
Obrázek 3-7:Náčrt polotovaru pro experiment	41
Obrázek 3-8:Upnutí obrobku na dynamometr	42
Obrázek 3-9: Vyhodnocení F_f a M_c v aplikaci NASOMER 8.5	45
Obrázek 3-10: Zapojení dynamometru do měřicí soustavy.....	48
Obrázek 3-11: Vliv kontrolovaných faktorů na změnu F_f 12050 a F_f 14220	52
Obrázek 3-12: Vliv kontrolovaných faktorů na změnu F_f 19313 a F_f 19573	53
Obrázek 3-13: Vliv kontrolovaných faktorů na změnu M_c 12050 a M_c 14220.....	57
Obrázek 3-14: Vliv kontrolovaných faktorů na změnu M_c 19313 a M_c 19573.....	57
Obrázek 3-15: Dendrogram pro modely F_f	60
Obrázek 3-16: Dendrogram pro modely M_c	62
Obrázek 3-17: Soustružnický nůž použitý pro měření měrného řezného odporu	64
Obrázek 3-18: Grafický popis naměřených hodnot k_{c1} pro materiál 12050 a 14220	65
Obrázek 3-19: Grafický popis naměřených hodnot k_{c1} pro materiál 19313 a 19573	65
Obrázek 3-20: Grafické porovnání modelů $k_{c1} = f(v_c)$ pro materiál 14220	70
Obrázek 3-21: Grafické porovnání modelů $k_{c1} = f(v_c)$ pro materiál 19313	71
Obrázek 3-22: Grafické porovnání modelů $k_{c1} = f(v_c)$ pro materiál 19573	72

Seznam tabulek

Tabulka 1: Hodnoty koeficientů pro výpočet sil a krouticího momentu	24
Tabulka 2: Tabulka vypočtených měrných řezných odporů podle	27
Tabulka 3: Chemické složení a mechanické vlastnosti materiálu 12050	35
Tabulka 4: Chemické složení a mechanické vlastnosti materiálu 14220	36
Tabulka 5: Chemické složení a mechanické vlastnosti materiálu 19313	36
Tabulka 6: Chemické složení a mechanické vlastnosti materiálu 19573	37
Tabulka 7: Přehled hodnot konstantních nástrojových faktorů	39
Tabulka 8: Typy bodů v přirozeném měřítku	43
Tabulka 9: Typy bodů v kódovaném měřítku	43
Tabulka 10: Experimentální šroubovitě vrtáky a četnost jejich použití	44
Tabulka 11: Plán experimentu pro stanovení vlivu polohy v přirozeném měřítku	44
Tabulka 12: ANOVA pro posouzení vlivu polohy na krouticí moment	45
Tabulka 13: Analýza vhodnosti modelu působení kontrolovaných faktorů na F_f	46
Tabulka 14: ANOVA pro posouzení vlivu polohy na posuvovou sílu	46
Tabulka 15: Tabulka odhadu parametrů modelu pro F_f při posouzení vlivu polohy	46
Tabulka 16: Porovnání měřených a vypočtených F_f při posouzení vlivu polohy	47
Tabulka 17: Shrnutí výsledků t-testu nulových bodů	49
Tabulka 18: Analýza vhodnosti modelů F_f pro zvolené materiály	49
Tabulka 19: ANOVA pro posouzení vlivu kontrolovaných faktorů na F_f	50
Tabulka 20: Hodnoty testu Lack-of-fit pro posuvovou sílu F_f	51
Tabulka 21: Upravená tabulka odhadu členů modelu pro F_f	51
Tabulka 22: Hodnoty Durbin-Watsonova testu pro posuvovou sílu F_f	53
Tabulka 23: Vybrané hodnoty Shapiro-Wilkova testu reziduí posuvové síly F_f	53
Tabulka 24: Analýza vhodnosti modelů M_c pro zvolené materiály	54
Tabulka 25: ANOVA pro posouzení vlivu kontrolovaných faktorů na M_c	55
Tabulka 26: Hodnoty testu Lack-of-fit pro krouticí moment M_c	55
Tabulka 27: Upravená tabulka odhadu členů modelu pro M_c	56
Tabulka 28: Hodnoty Durbin-Watsonova testu pro krouticí moment M_c	58
Tabulka 29: Vybrané hodnoty Shapiro-Wilkova testu reziduí M_c	58
Tabulka 30: Procentuální vliv jednotlivých členů modelu na velikost F_f	59
Tabulka 31: Výběr metody shlukování pro F_f	59
Tabulka 32: Vybrané hodnoty Shapiro-Wilkova testu pro bloky F_f	60
Tabulka 33: ANOVA pro analýzu vlivu materiálu na F_f	60
Tabulka 34: Levenův test homogenity rozptylů bloků pro posuvovou sílu F_f	60
Tabulka 35: Procentuální vliv jednotlivých členů modelu na velikost M_c	61
Tabulka 36: Výběr metody shlukování pro M_c	62
Tabulka 37: Vybrané hodnoty Shapiro-Wilkova testu pro bloky M_c	62
Tabulka 38: Kruskal-Wallisova analýza vlivu materiálu na krouticí moment M_c	63
Tabulka 39: Hodnoty deskriptivní statistiky pro zvolené materiály a rychlosti	65
Tabulka 40: Shapiro-Wilkův test-p hodnoty pro k_{c1}	66
Tabulka 41: ANOVA pro k_{c1} u materiálu 12050	67
Tabulka 42: ANOVA pro k_{c1} u materiálu 19313 a 19573	67
Tabulka 43: Kruskal-Wallis ANOVA pro k_{c1} u materiálu 14220	67
Tabulka 44: Tabulkové hodnoty měrného řezného odporu	68

Tabulka 45: Individuální t-test pro porovnání tabulkového a experimentálního k_{c1}	68
Tabulka 46: Mann-Whitney U test porovnání tabulkového a experimentálního k_{c1}	68
Tabulka 47: Porovnání modelů $k_{c1} = f(v_c)$ pro materiál 14220.....	69
Tabulka 48: Odhad parametrů modelu $k_{c1} = f(v_c)$ pro materiál 14220.....	69
Tabulka 49: Porovnání modelů $k_{c1} = f(v_c)$ pro materiál 19313.....	70
Tabulka 50: Odhad parametrů modelu $k_{c1} = f(v_c)$ pro materiál 19313.....	70
Tabulka 51: Porovnání modelů $k_{c1} = f(v_c)$ pro materiál 19573.....	71
Tabulka 52: Odhad parametrů modelu $k_{c1} = f(v_c)$ pro materiál 19573.....	72
Tabulka 53: Hodnoty exponentů a konstant pro výpočet F_f a M_c	74
Tabulka 54: Dosažené chyby v bodech hlavního plánu pro F_f	75
Tabulka 55: Dosažené chyby v bodech hlavního plánu pro M_c	75
Tabulka 56: Parametry validačního testu.....	76
Tabulka 57: Dosažené chyby v bodech validačního testu pro F_f	77
Tabulka 58: Dosažené chyby v bodech validačního testu pro M_c	77

Seznam zkratk, symbolů a značek veličin

Značka veličiny, symbol, zkratka	Jednotka	Popis
A_D	[mm ²]	průřez třísky
a_p	[mm]	hloubka řezu
C	[-]	chemická značka uhlíku
C_0	[MPa]	konstanta vyjadřující vliv obráběného materiálu při vrtání
C_{Fc}	[-]	konstanta
C_{ff}	[-]	konstanta
Cr	[-]	chemická značka chromu
Cu	[-]	chemická značka mědi
D	[mm]	jmenovitý průměr nástroje
D_x	[mm]	aktuální poloha nástroje pro bod X
F_c	[N]	řezná síla
F_{c1}	[N]	složka řezné síly
F_{c2}	[N]	složka řezné síly
F_f	[N]	posuvová řezná síla
F_{f1}	[N]	složka posuvové řezné síly
F_{f2}	[N]	složka posuvové řezné síly
f_{ot}	[mm]	posuv nástroje na jednu otáčku
F_p	[N]	pasivní řezná síla
F_{p1}	[N]	složka pasivní řezné síly
F_{p2}	[N]	složka pasivní řezné síly
f_z	[mm]	posuv nástroje na zub
h	[mm]	tloušťka třísky
k	[-]	počet faktorů
k_c	[MPa]	měrný řezný odpor
k_{c1}	[MPa]	jednotkový měrný řezný odpor
m_c	[-]	koeficient intenzity změny měrného řezného odporu
M_C	[N·m]	krouticí moment k ose vrtáku
MKP	[-]	metoda konečných prvků
Mn	[-]	chemická značka manganu

Mo	[-]	chemická značka molibdenu
n	[-]	počet pokusů
Ni	[-]	chemická značka niklu
P	[-]	chemická značka fosforu
p	[-]	stupeň snížení
P_f	[-]	nástrojová rovina boční
P_n	[-]	normálová rovina ostří
P_o	[-]	nástrojová rovina ortogonální
P_p	[-]	nástrojová rovina zadní
P_r	[-]	nástrojová rovina základní
P_s	[-]	nástrojová rovina ostří
P_s'	[-]	nástrojová rovina vedlejšího ostří
r_c	[mm]	korigované působíště řezné síly
R_m	[MPa]	mez pevnosti v tahu
r_ϵ	[mm]	poloměr špičky
S	[-]	chemická značka síry
Si	[-]	chemická značka křemíku
V	[-]	chemická značka vanadu
W	[-]	chemická značka wolframu
x_{Fc}	[-]	konstanta vyjadřující vliv hloubky řezu
x_{Ff}	[-]	konstanta vyjadřující vliv hloubky řezu
y_{Fc}	[-]	konstanta vyjadřující vliv posuvu
y_{Ff}	[-]	konstanta vyjadřující vliv posuvu
α	[°]	nástrojový úhel hřbetu; hladina významnosti
α_f	[°]	nástrojový úhel hřbetu v rovině P_f
α_n	[°]	nástrojový úhel hřbetu v rovině P_n
α_o	[°]	nástrojový úhel hřbetu v rovině P_o
β	[°]	nástrojový úhel břitu
γ	[°]	nástrojový úhel hřbetu
δ	[°]	nástrojový úhel řezu
ϵ_r	[°]	nástrojový úhel špičky
λ_s	[°]	nástrojový úhel sklonu hlavního ostří
σ	[-]	směrodatná odchylka

φ	[°]	úhel mezi hlavním a příčným ostřím, úhel stříhu
χ_r	[°]	nástrojový úhel nastavení hlavního ostří
ω_r	[°]	úhel stoupání šroubovice drážky

Úvod

Oblast třískového obrábění je možné rozdělit dle technologie, která je využita na následující podoblasti:

- frézování
- soustružení
- vrtání
- ostatní technologie, např. vystružování, závitování, broušení, atp.

Při podrobnějším zaměření na oblast vrtání je možné ji rozdělit podle hloubky vrtaného otvoru na standardní vrtání, zpravidla do hloubky vrtání do $5xD$ a hluboké vrtání, kdy je hloubka vrtaného otvoru větší než $5xD$. Z pohledu nástroje je pro vlastní proces vrtání důležité, aby byl zajištěn dostatečný přísun procesní kapaliny a zároveň docházelo k plynulému odvodu třísek, přičemž je žádoucí, aby vytvářená tříska svým tvarem umožňovala bezproblémový odchod drážkou vrtáku. Tvar a množství vznikajících třísek je dáno kombinací řezných podmínek procesu vrtání a geometrických parametrů vrtáku. Pokud mají třísky nevhodný tvar, nebo je jejich množství větší než je schopna pojmout drážka dochází k zahlcení nástroje, které má za následek jeho přetížení a případně i destrukci.

Pro zjištění zatížení vrtáku je využíváno několika základních přístupů pro nalezení zatížení, respektive posuvové síly a krouticího momentu. Tyto přístupy je možné rozdělit do několika základních skupin, kterými jsou:

- predikce s využitím experimentálně zjištěných vztahů (pomocí měrného řezného odporu, exponenciálních rovnic nebo statistického modelu)
- predikce s využitím analyticky odvozeného vztahu
- predikce s využitím metody konečných prvků (MKP)

Mimo predikčních metod mohou být rovněž využity i metody přímého měření silového zatížení. Tyto metody jsou zpravidla založeny na mechanickém, hydraulickém, pneumatickém a elektrickém principu, kdy mezi nejpoužívanější patří piezoelektrický a odporový princip. Výhodou přímého měření je jeho přesnost, naopak jeho velkou nevýhodou je, že předem není známá velikost zatížení a tudíž může dojít k destrukci nástroje, popřípadě znehodnocení obrobku. Naopak predikční metody těmto negativním jevům mohou zabránit, ale za cenu snížení přesnosti vypočtené hodnoty oproti přímo měřené hodnotě.

V oblasti CAD/CAM systémů se tedy mohou predikční metody, respektive jimi nalezené predikční model stát velmi silným nástrojem pro výpočet silového zatížení nástrojů. Při vhodném nastavení limitních hodnot zatížení, které jsou kritické z pohledu destrukce nástroje, mohou být pak úspěšně využity pro kontrolu nastavení řezných podmínek již při návrhu technologie, a nikoliv až po nasazení na stroji, kdy při nevhodné volbě k destrukci dojde. Pro takovéto využití predikčních modelů je velmi důležité, aby jimi prováděné výpočty byly prováděny v reálném čase. Tato podmínka pak vylučuje například využití metody MKP, která je oproti experimentálně a analyticky odvozeným modelům náročná na čas, hardwarové a softwarové vybavení.

Predikční modely na principu experimentálně zjištěných a analyticky odvozených vztahů nalézají uplatnění i v dalších oblastech jako jsou návrh nových nástrojů a měření silových účinků procesu obrábění. V prvním případě je již při prvním návrhu nástroje možné odhalit

nevhodné kombinace geometrických parametrů, a to v poměrně krátkém čase. Tím tyto metody umožňují efektivní využití pokročilých nástrojů, kterými jsou např. MKP výpočty, kdy MKP výpočet je realizován již pro relevantní kombinaci geometrických a technologických podmínek. Druhou možností je použití predikovaných hodnot pro nastavení rozsahu měřícího vybavení a zároveň i kontrolu zda při samotném experimentu nedojde k přetížení měřidla, čímž by mohlo dojít i k jeho poškození. I v tomto případě je vhodné pro predikci použít metodu principu experimentálně zjištěných a analyticky odvozených vztahů pro rychlost jejich výpočtu.

Dá se říci, že současné dostupné zdroje neobsahují ucelený jednotný postup pro odvození a ověření vztahů pro oblast statistického modelování silového zatížení při vrtání šroubovitými vrtáky. Tato oblast je však velmi důležitou z pohledu progresivních metod a moderních přístupů k třískovému obrábění, zejména pak pro aplikovatelnost teoretických poznatků v CAD/CAM systémech. Z toho vyplývá cíl předkládané disertační práce.

1 Cíle disertační práce

Hlavním cílem disertační práce je přispět k experimentálnímu stanovení silového zatížení šroubovitého vrtáku, konkrétně u posuvové síly a krouticího momentu, s využitím statistického modelování. Modely budou sestaveny pro vybrané materiálové přestavitele. Na základě získaných výsledků bude rozhodnuto, zda bude sestaven univerzální model, nebo bude ponechán pro každý sledovaný materiál samostatný model. Nedílnou součástí řešení je i sestavení vlastního plánu experimentu.

Pro dosažení hlavního cíle je potřebné naplnit dva dílčí cíle:

- ověření vlivu polohy vrtaného otvoru na velikost posuvové síly a krouticího momentu při použití dynamometru KISTLER 9272
- nalézt metodu experimentálního zjišťování jednotkového měrného řezného odporu k_{c1} v závislosti na řezné rychlosti

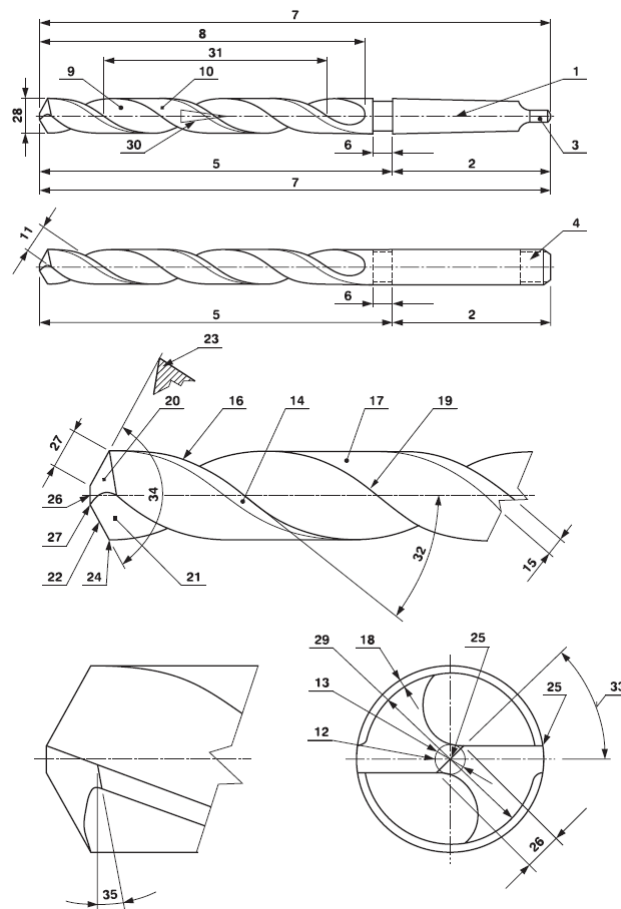
Důležitým výstupem této práce je ověření nalezených statistických modelů a následné doporučení pro další možné řešení této problematiky.

2 Rozbor současného stavu

2.1 Základní popis šroubovitého vrtáku

Popis šroubovitého vrtáku je proveden ze dvou hledisek. Jako první je hledisko celkové konstrukce šroubovitého vrtáku, tedy z pohledu základních konstrukčních prvků viz Obrázek 2-1. Dále pak je vrták popsán z hlediska makro-geometrického, resp. z hlediska nástrojové geometrie.

2.2 Základní konstrukční prvky šroubovitého vrtáku



Obrázek 2-1: Základní konstrukční prvky šroubovitého vrtáku [1]

1) Osa; 2) Stopka (kuželová, hladká válcová, hladká válcová s unášečem); 3) Vyrážeč; 4) Unášeč; 5) Tělo vrtáku; 6) Krček; 7) Celková délka; 8) Délka šroubovice drážky; 9) Drážka; 10) Plocha vedlejšího hřbetu; 11) Šířka plochy vedlejšího hřbetu; 12) Jádro; 13) Tloušťka jádra; 14) Fazeta; 15) Šířka fazety; 16) Vedlejší ostří; 17) Odlehčení; 18) Hloubka odlehčení; 19) Pata; 20) Hřbet; 21) Čelo; 22) Hlavní ostří; 23) Břit; 24) Špička; 25) Příčné ostří; 26) Délka příčného ostří; 27) Délka hlavního ostří; 28) Jmenovitý průměr vrtáku; 29) Průměr odlehčení; 30) Zpětná kuželovitost; 31) Stoupání šroubovice; 32) Úhel stoupání šroubovice; 33) Úhel příčného ostří; 34) Úhle špičky; 35) Úhel hřbetu

2.3 Geometrie břitu šroubovitého vrtáku

Geometrický tvar břitu nástroje značně ovlivňuje proces řezání. Na tvaru břitu je závislá velikost řezných sil, jakost obrobené plochy, geometrická přesnost a trvanlivost břitu.

Geometrii břítu je možné popsat staticky pomocí nástrojových úhlů a kinematicky za pomoci pracovních úhlů, které popisují vztah nástroje k obrobku. V další části je proveden podrobný popis statické geometrie a to včetně nástrojových rovin.[2]

Geometrie břítu šroubovitého vrtáku vychází z geometrie břítu při ortogonálním řezání, ta je však přizpůsobena právě pro vrtání (definování hlavního řezného pohybu, posuvu a z toho plynoucí orientace souřadného systému).[2]

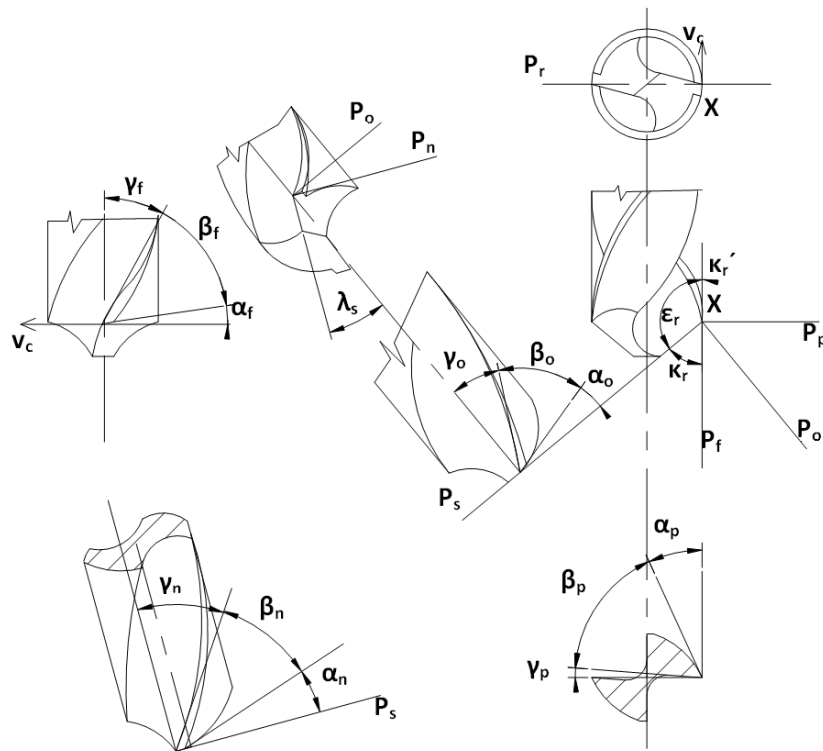
2.3.1 Nástrojové řezné úhly

Nástrojové řezné úhly jednoznačně určují tvar břítu nástroje za klidu v souřadnicovém systému orientovaném vůči předpokládanému směru hlavního řezného pohybu a směru podélného pohybu. Poloha čela, hřbetu a břítu se stanovují pomocí nástrojových úhlů, které jsou definovány podle souřadných rovin:

- Nástrojová základní rovina P_r – prochází uvažovaným bodem ostří a je kolmá na vektor rychlosti hlavního řezného pohybu
- Nástrojová boční rovina P_f – prochází uvažovaným bodem ostří ve směru vektoru hlavního řezného pohybu a je rovnoběžná s předpokládaným směrem posuvu
- Nástrojová zadní rovina P_p – prochází uvažovaným bodem ostří a je kolmá na P_r a P_f
- Nástrojová rovina ostří P_s – dotýká se ostří a je kolmá na základní rovinu P_r
- Normálová rovina ostří P_n – je kolmá na ostří a prochází uvažovaným bodem
- Nástrojová rovina ortogonální P_o – prochází uvažovaným bodem a je kolmá na základní rovinu P_r a rovinu ostří P_s

Pomocí nástrojových rovin jsou určeny nástrojové úhly břítu, viz Obrázek 2-2:

- Nástrojový úhel hřbetu α – je úhel, který svírá rovina P_s s plochou hřbetu. Obvykle se hovoří o α_o , pokud je měřen v P_o , může být určován i v P_p , P_f a P_n , (α_p , α_f a α_n)
- Nástrojový úhel čela γ – je úhel mezi čelem nástroje a P_r , měřený v rovinách P_o , P_n a P_f
- Nástrojový úhel břítu β – jedná se o úhel mezi hřbetem a čelem nástroje, měřený opět v rovinách P_o a P_n
- Nástrojový úhel řezu δ – je určen součtem úhlu hřbetu a břítu
- Nástrojový úhel nastavení χ_r – úhel mezi rovinami P_s a P_f , který je měřený v rovině P_r
- Nástrojový úhel sklonu ostří λ_s – je úhel mezi ostřím a P_r měřený v rovině P_s
- Nástrojový úhel špičky ϵ_r – je úhel mezi P_s a P'_s , který je měřený v rovině P_r
- Úhel stoupání šroubovice drážky ω_r – je úhel mezi osou nástroje a osou drážky, který je měřený v rovině P_r
- Poloměr špičky r_ϵ – je zaoblení špičky nástroje, měřený v P_r .



Obrázek 2-2: Nástrojová geometrie bříty šroubovitého vrtáku [5]

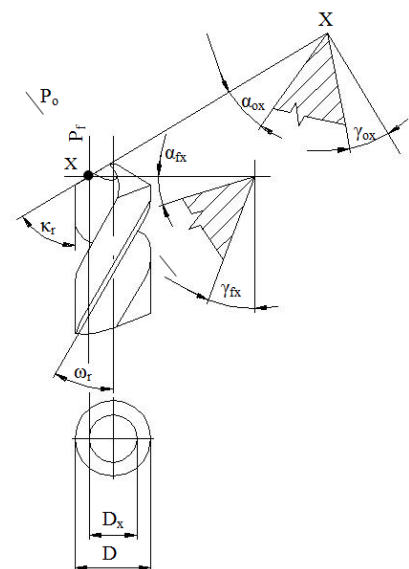
2.3.2 Změna velikosti úhlu čela

Změna velikosti úhlu čela γ_{ox} probíhá podle následujícího matematického vztahu [3]:

$$\operatorname{tg} \gamma_{ox} = \frac{D_x \cdot \operatorname{tg} \omega_r}{D \cdot \sin \kappa_r} \quad (1)$$

kde

- D je jmenovitý průměr vrtáku [mm]
- D_x je průměr aktuální polohy bodu X [mm]
- ω_r je úhel stoupání šroubovice drážky [°]
- κ_r je úhel nastavení hlavního ostří [°]



Obrázek 2-3: Změna velikosti úhlu čela v závislosti na průměru vrtáku

2.4 Řezné síly při vrtání

Při základním rozkladu (pro celý vrták) se výsledná síla pro každý břit rozkládá do tří základních složek působících v tangenciálním (řezná síla), radiálním (pasivní síla) a axiálním směru (posuvová síla). Jejich velikost je dána řadou činitelů, viz pramen [4] zvláště materiálem obrobku, hloubkou řezu, posuvem a geometrií břitu nástroje.[5]

Pro celý vrták je pak:

$$\text{výsledná posuvová síla } \vec{F}_f = \vec{F}_{f1} + \vec{F}_{f2} [N] \quad (2)$$

$$\text{výsledná pasivní síla } \vec{F}_p = \vec{F}_{p1} + \vec{F}_{p2} [N] \quad (3)$$

$$\text{výsledná řezná síla } \vec{F}_c = \vec{F}_{c1} + \vec{F}_{c2} = [N] \quad (4)$$

Pokud je vrták správně naostřen, jsou vektory složek řezné síly na obou břitech co do velikosti stejné (přitom se zanedbává vliv nepřesnosti upnutí, ostření, atd.):

$$F_{f1} = F_{f2} = \frac{F_f}{2} [N] \quad (5)$$

$$F_{p1} = F_{p2} \Rightarrow F_p = 0 [N] \quad (6)$$

$$F_c = F_{c1} = F_{c2} [N] \quad (7)$$

Výslednice F_c je rovna 0. Síly však tvoří dvojici a tedy řezný (krouticí) moment:

$$M_c = F_c \cdot \frac{D}{2} [Nm] \quad (8)$$

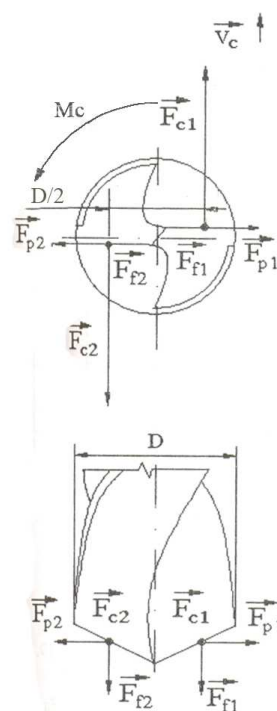
kde

D je jmenovitý průměr vrtáku [mm]

2.4.1 Parametry ovlivňující velikost řezných sil

Parametry ovlivňující velikost řezných sil lze rozdělit do následujících skupin:

- vlastnosti materiálu obrobku
- parametry procesu obrábění – řezné podmínky
- geometrické parametry šroubovitého vrtáku



Obrázek 2-4: Základní silový rozklad[5]

Obráběný materiál ovlivňuje velikost řezných sil svými fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Proces obrábění je uvažován především z hlediska řezného prostředí (obrábění za sucha, při použití procesních kapalin, atd.), dále pak z hlediska tuhosti soustavy stroj-nástroj-obrobek a v neposlední řadě z pohledu řezných podmínek (posuv a řezná rychlost). Geometrickými parametry jsou pak označovány nástrojové úhly podle pramenů[6],[5].

Těmito úhly jsou především:

- nástrojový úhel čela γ_o (M_c)
- nástrojový úhel hřbetu α_o (F_f a M_c)
- nástrojový úhel špičky ϵ_r (F_f)
- nástrojový úhel nastavení hlavního ostří κ_r (F_f)
- nástrojový úhel stoupání šroubovice ω_r (F_f)
- nástrojový úhel sklonu ostří λ_s (F_f a M_c)

Vliv obráběného materiálu

Významný vliv na velikost řezných sil a na krouticí moment při vrtání mají mechanické vlastnosti obráběného materiálu. Čím vyšší je pevnost, respektive tvrdost obráběného materiálu, tím větší je posuvová síla a krouticí moment.

Vliv parametrů procesu obrábění – řezné podmínky

Uvažovanými parametry z pohledu řezných podmínek jsou posuv a řezná rychlost.

Při zvyšování hodnoty posuvu dochází k růstu krouticího momentu a posuvové síly. Vliv posuvu na krouticí moment je větší než na posuvovou sílu. To znamená, že čím větší je posuv, tím větší je osová síla. Při výpočtu krouticího momentu je délka ramena mezi dvojicí tangenciálních řezných sil dána poloměrem vrtáku za předpokladu, že celková tangenciální řezná síla na každém břitu má působiště právě v jeho polovině.[4],[3]

Při vzrůstající řezné rychlosti se zmenšuje objem deformovaného materiálu před břitem nástroje. Současně však stoupá teplota v místě styku, přičemž dochází ke změně fyzikálně mechanických vlastností materiálu obrobku v místě řezu. Tento fakt má vliv jak na velikost krouticího momentu, tak na velikost posuvové síly.[4], [2]

Vliv geometrických parametrů šroubovitého vrtáku

Při popisu vlivu geometrických parametrů šroubovitého vrtáku jsou vybrány parametry, které mají dominantní vliv na velikost sledovaných parametrů. Jsou to:

- úhel sklonu šroubovice drážky ω_r
- úhel nastavení hlavního ostří κ_r
- velikost a průběh příčného ostří (nástrojový úhel sklonu ostří λ_s)
- úhel hřbetu α_o

Vliv velikosti úhlu sklonu šroubovice drážky

Základním důvodem vlivu úhlu sklonu šroubovice drážky je, že podle (1) se při změně úhlu mění i velikost úhlu čela v ortogonální rovině. Úhel čela v ortogonální rovině a úhel stoupání šroubovice drážky jsou přímo úměrné veličiny. Z toho vyplývá, že při růstu velikosti

úhlu stoupání zároveň roste i velikost úhlu čela, proto dochází ke snížení deformační práce a tření při vrtání, z čehož plyne snížení velikosti krouticího momentu a posuvové síly.

Na základě výsledků experimentů je možné konstatovat, že intenzivnější stlačení třísky se projevuje jen při zvětšování úhlu čela do hodnoty $\gamma_o = 35^\circ$. Při dalším zvyšování velikosti úhlu čela je intenzita stlačení třísky méně výrazná. Na základě tohoto faktu lze předpokládat, že se zvětšováním úhlu ω_r se stlačení třísky, deformační práce, krouticí moment a posuvová síla budou měnit podobně. Experimentálně bylo zjištěno, že při zvětšování úhlu ω_r na 30° až 35° se krouticí moment a posuvová síla snižují výrazně. S dalším zvětšováním úhlu ω_r není už snížení uvedených parametrů tak výrazné. Podle tohoto poznatku se také konstruují šroubovitě vrtáky (pro vrtání ocele a litiny $\omega_r = 25 \div 30^\circ$, pro vrtání lehkých kovů $\omega_r = 40 \div 45^\circ$).[7], [8]

Vliv velikosti úhlu nastavení hlavního ostří

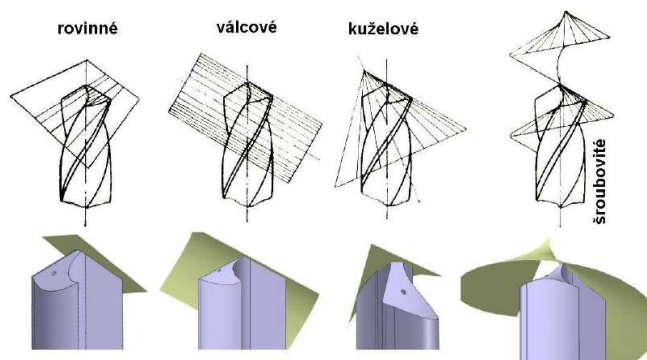
Změna úhlu nastavení hlavního ostří ovlivňuje šířku a tloušťku odřezávané vrstvy. Pokud se opět vyjde z podobnosti se soustružením, lze předpokládat, že se velikost krouticího momentu se zmenšením úhlu nastavení hlavního ostří zvětšuje. Obdobně naopak při zvětšení úhlu nastavení hlavního ostří roste odpor proti vnikání vrtáku do materiálu, a proto dochází k nárůstu velikosti posuvové síly.[8]

Vliv velikosti a průběhu příčného ostří

Velikost úhlu čela na příčném ostří má zápornou hodnotu, a proto posuvová síla s prodlužováním příčného ostří roste. Hlavním důvodem je zvýšení odporu materiálu proti vniknutí vrtáku. Z výše popsaných důvodů jsou na vrtácích prováděny úpravy pro zkrácení příčného ostří za účelem zlepšení vnikání do materiálu, respektive snížení posuvové síly. Velikost krouticího momentu je ovlivněna rovněž velikostí úhlu φ , který svírá příčné a hlavní ostří. Vliv tohoto úhlu lze vysvětlit změnou úhlu čela v místě, kde dochází k napojení příčného a hlavního ostří. Při minimalizaci tohoto, dojde k prodloužení příčného ostří a tudíž k podstatnému zvýšení velikosti posuvové síly.

Vliv velikosti úhlu hřbetu

Pro zjištění průběhu úhlu hlavního hřbetu je určujícím parametrem způsob jeho broušení. To může být realizováno podle rovinné, válcové, kuželové nebo šroubové plochy. Z teorie obrábění lze odvodit, že čím větší je velikost úhlu hlavního hřbetu, tím nižší je posuvová síla i krouticí moment. Je možno vyjít z předpokladu, že jejich velikost je v tomto případě ovlivněna především velikostí stykové plochy hlavního hřbetu a obráběné plochy.



Obrázek 2-5: Varianty ploch pro broušení hlavního hřbetu šroubovitěho vrtáku [9]

2.4.2 Standardní metody výpočtu řezných sil při vrtání

Standardní výpočty řezných sil je možné rozdělit do tří základních skupin a to:

- výpočet s využitím experimentálně zjištěných vztahů (pomocí měrného řezného odporu, exponenciálních rovnic nebo statistického modelu)
- výpočet s využitím analyticky odvozeného vztahu
- výpočet s využitím metody konečných prvků (MKP)

Výpočet s využitím experimentálně zjištěných vztahů - měrný řezný odpor

Pro výpočet krouticího momentu a řezné síly je využívána specifická materiálová charakteristika nazývaná měrný řezný odpor, popřípadě měrná řezná síla k_{c1} a je možné ji vyjádřit jako řeznou sílu F_c , která působí ve směru hlavního řezného pohybu a je potřebná pro oddělení třísky o průřezu 1mm^2 za předpokladu, že její tloušťka je 1mm . Dalším předpokladem je $\gamma_o = 0^\circ$. Pokud tomu tak není, je nutné udělat korekci. Obdobně je tomu i v případě, že tloušťka třísky není rovna 1mm . Měrný řezný odpor se pak získá na základě rovnice (9). [10]

$$k_c = k_{c1} \cdot h^{-m_c} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_o}{100}\right) [\text{MPa}] \quad (9)$$

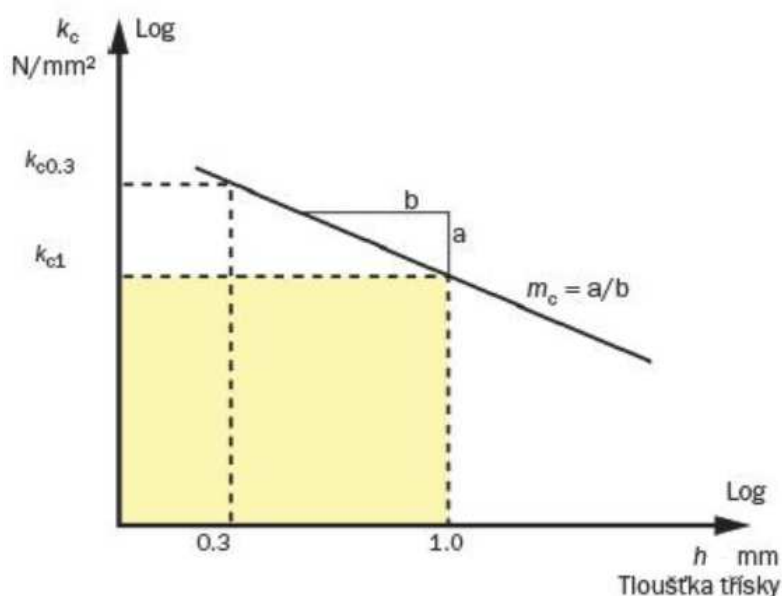
kde

k_{c1} je jednotková měrná řezná síla [MPa]

h je tloušťka třísky [mm]

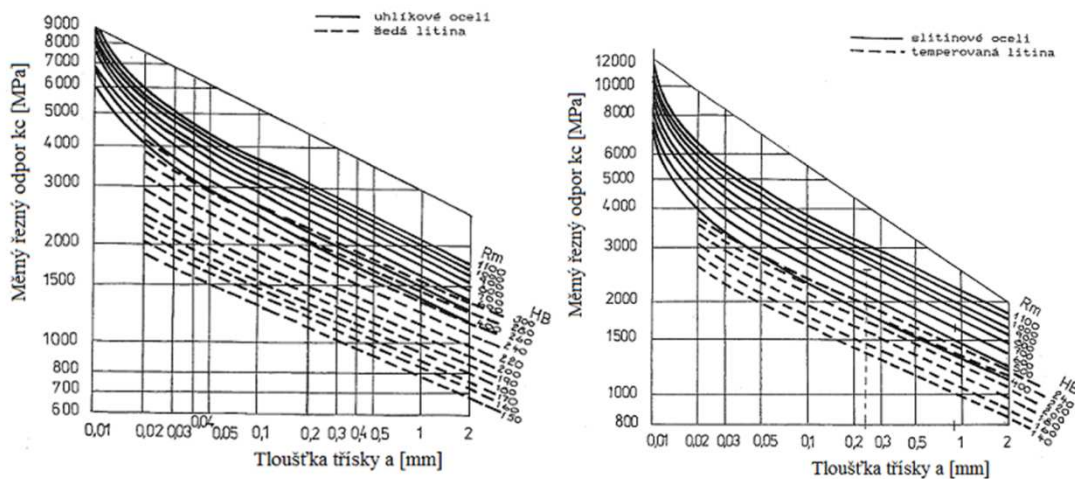
γ_o je úhel čela v ortogonální rovině [°]

m_c je koeficient vyjadřující intenzitu změny měrného řezného odporu v závislosti na tloušťce třísky [-]



Obrázek 2-6: Určení koeficientu m_c [10]

Hodnota k_{c1} je experimentálně zjišťována a je uváděna v tabulkách, popřípadě grafech viz Obrázek 2-7 a Obrázek 2-8.



Obrázek 2-7: Hodnoty měrného řezného odporu pro vybrané materiály [11]

MC kód	Materiálová skupina	Materiálová podskupina	Způsob výroby	Tepelné zpracování	nom.	Měrná řezná síla, k_{c1} (N/mm ²)	m_c	
P1.1.ZAN	1	1	Z kované/válcované/tvářené za studena/tažené	AN žháné	125 HB	1500	0.25	
P1.1.ZHT				HT kalené+popuštěné	190 HB	1770	0.25	
P1.2.ZAN		2	2	Z kované/válcované/tvářené za studena/tažené	AN žháné	190 HB	1700	0.25
P1.2.ZHT					HT kalené+popuštěné	210 HB	1820	0.25
P1.3.ZAN	1	3	Z kované/válcované/tvářené za studena/tažené	AN žháné	190 HB	1750	0.25	
P1.3.ZHT				HT kalené+popuštěné	300 HB	2000	0.25	
P1.4.ZAN	1	4	Z kované/válcované/tažené za studena	AN žháné	220 HB	1180	0.21	
P1.5.C.HT	1	5	C odlévané	HT v původním stavu	150 HB	1400	0.25	
P1.5.C.AN	1	5	C odlévané	AN kalené+popuštěné	300 HB	2880	0.25	
P2.1.ZAN	2	1	Z kované/válcované/tažené za studena	AN žháné	175 HB	1700	0.25	
P2.2.ZAN				AN žháné	240 HB	1950	0.25	
P2.3.ZAN		AN žháné	260 HB	2020	0.25			
P2.4.ZAN		AN žháné	225 HB					
P2.5.ZHT	2	5	Z kované/válcované/tažené za studena	HT kalené+popuštěné	330 HB	2000	0.25	
P2.6.C.UT	2	6	C odlévané	UT v původním stavu	200 HB	1600	0.25	
P2.6.C.HT	2	6	C odlévané	HT kalené+popuštěné	380 HB	3200	0.25	
P3.0.ZAN	3	0	Z kované/válcované/tažené za studena	AN žháné	200 HB	1950	0.25	
P3.0.ZHT				HT kalené+popuštěné	380 HB	3100	0.25	
P3.0.C.UT		0	C odlévané	UT v původním stavu	200 HB	1950	0.25	
P3.0.C.HT				HT kalené+popuštěné	340 HB	3040	0.25	
P3.1.ZAN	3	1	Z kované/válcované/tažené za studena	AN žháné	250 HB	2360	0.25	
P3.2.C.AQ	3	2	C odlévané	AQ žháné/rychle zchlazené nebo žháné	300 HB	3000	0.25	
P4.0.S.NS	4	0	S slituté	NS nespecifikováno	150 HB			

Obrázek 2-8: Tabulka hodnot k_{c1} odporu pro skupinu ocelí P dle ISO [10]

Na základě získaného měrného řezného odporu k_c pak lze vypočítat řeznou sílu podle (10).

$$F_c = k_c \cdot A_D \quad [N] \quad (10)$$

kde

k_c je měrná řezná síla [MPa]
 A_D je průřez třísky [mm²]

Podobně pak může být vypočítána i posuvová síla podle (11).

$$F_f \approx 0,5 \cdot k_c \cdot \frac{D}{2} \cdot f_{ot} \cdot \sin \chi_r \quad [N] \quad (11)$$

kde

- k_c je měrná řezná síla [MPa]
- D je jmenovitý průměr vrtáku [mm]
- f_{ot} je posuv na otáčku [mm/ot.]
- χ_r je úhel nastavení hlavního ostří [°]

Výpočet s využitím experimentálně zjištěného vztahu - exponenciální rovnice

Nejčastěji používaným experimentálně zjištěným vztahem pro řeznou sílu je (12) a jsou v něm zahrnuty tři nejdůležitější vlivy a to obráběný materiál, jmenovitý průměr vrtáku a otáčkový posuv. [12],[4], [6], [8]

$$F_c = C_{F_c} \cdot D^{x_{F_c}} \cdot f_{ot}^{y_{F_c}} \quad [N] \quad (12)$$

kde

- C_{F_c} je konstanta vyjadřující vliv obráběného materiálu [MPa]
- x_{F_c} je konstanta vyjadřující vliv průměru vrtáku [-]
- y_{F_c} je konstanta vyjadřující vliv otáčkového posuvu [-]
- D je jmenovitý průměr vrtáku [mm]
- f_{ot} je posuv na otáčku [mm/ot.]

Obdobně je pak možné provést výpočet posuvové síly (13) a krouticího momentu k ose vrtáku. Pokud se pro krouticí moment vyjde z (8) a dosadí do (12), je výsledný vztah po úpravě (14).

$$F_f = C_{F_f} \cdot D^{x_{F_f}} \cdot f_{ot}^{y_{F_f}} \quad [N] \quad (13)$$

$$M_c = \frac{1}{4} \cdot C_{F_c} \cdot D^{(x_{F_c}+1)} \cdot f_{ot}^{y_{F_c}} \quad [N \cdot mm] \quad (14)$$

kde

- C_{F_f} je konstanta vyjadřující vliv obráběného materiálu [MPa]
- x_{F_f} je konstanta vyjadřující vliv průměru vrtáku [-]
- y_{F_f} je konstanta vyjadřující vliv otáčkového posuvu [-]
- D je jmenovitý průměr vrtáku [mm]
- f_{ot} je posuv na otáčku [mm/ot.]

Tabulka 1: Hodnoty koeficientů pro výpočet sil a krouticího momentu [12]

Obráběný materiál	konstanty					
	C_{F_c}	x_{F_c}	y_{F_c}	C_{F_f}	x_{F_f}	y_{F_f}
Ocel Rm = 750 MPa	3560	0,9	0,78	865	1	0,72
Litina 200 HB	2450	0,85	0,8	630	1	0,78

Výpočet s využitím experimentálně zjištěného vztahu - statistický model

Statistické modely náhodné zkoumané veličiny jsou složeny z:

- střední hodnoty náhodné zkoumané veličiny
- směrodatné odchylky
- typu rozložení náhodné veličiny

Při zkoumání procesu řezání je nejčastěji hledána závislost vybrané náhodné veličiny na vybraných parametrech. Statistický model pro tyto závislosti je daný následujícími charakteristikami:

- regresní funkcí, která vyjadřuje závislost střední hodnoty od parametrů procesu
- závislost směrodatné odchylky od parametrů procesu
- hustotou pravděpodobnosti spojité náhodné veličiny, anebo distribuční funkcí náhodné veličiny při pevných hodnotách parametrů

Při sestavování statistických modelů je důležité uvést i definiční obor funkce. Ten zahrnuje intervaly parametrů procesu i ostatní podmínky, které byly v průběhu experimentu považovány za konstantní.[8]

Z hlediska statistických modelů procesu řezání je tento považován za „černou skříňku“, do které vstupují nezávisle proměnné a vystupují závisle proměnné. Při změně vstupních veličin je měřena hodnota výstupní veličiny. Z takto získaných dat se pak následně sestavuje statistický model procesu.[8]

Statistické modely charakteristik procesu řezání se získají zpracováním výsledků z experimentů. Statistickými modely lze popsat i poměrně složité vazby mezi prvky systému rovnicemi, které mají jednoduchý tvar a požadovanou přesnost. Jejich velkou nevýhodou je fakt, že platí pouze pro experimentálně zkoumanou oblast a podmínky experimentu.[8]

Při vlastní rešeršní činnosti nebyl nalezen pramen, který by prakticky využíval metodu statistického modelování pro určení silového zatížení šroubovitého vrtáku, respektive zjištění velikosti posuvové síly a krouticího momentu.

Výpočet s využitím analyticky odvozeného vztahu

Tato metoda je založena na analytickém odvození výsledné rovnice jako je tomu v případě pramenu [13]. Vlastní postup odvození je proveden analyticky a následné určení koeficientů je provedeno pomocí nashromážděných experimentálních dat.

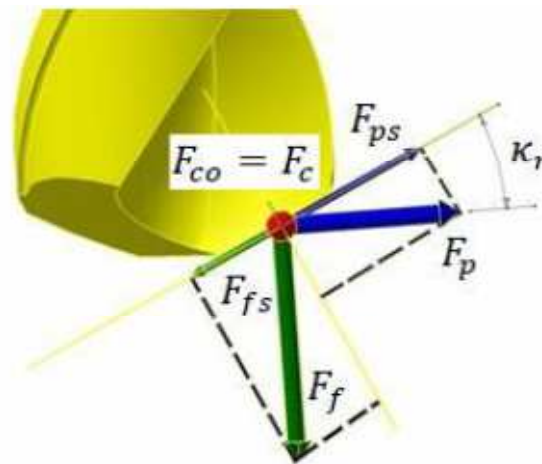
Posuvová síla je odvozena podle pramenu [13] jako (15) a krouticí moment pak jako (16).

$$T_{Ht} = C_1 f^{a_1} D^{b_1} \left(\frac{2W}{\phi D} \right)^{c_1} 2p^{d_1} \delta_0^{e_1} \alpha_0^{b_1} or \gamma_W^{m_1} \psi^{n_1} \quad (15)$$

$$T_{Qt} = C_2 f^{a_2} D^{b_2} \left(\frac{2W}{\phi D} \right)^{c_2} 2p^{d_2} \delta_0^{e_2} \alpha_0^{b_2} or \gamma_W^{m_2} \psi^{n_2} \quad (16)$$

Dalším příkladem je analytické odvození za pomoci silového rozkladu do zvolených nástrojových rovin využitím vhodných nástrojových úhlů jak je tomu v případě pramenu [14]. Celý postup odvození je rozdělen do následujících kroků:

- rozložení celkové řezné síly na tři základní složky (řeznou, posuvovou a pasivní)
- promítnutí složek do vybraných nástrojových rovin (ortogonální a roviny ostří)
- provedení rozkladu do tečného a normálového směru ve zvolených rovinách
- součet všech účinků jak tečných tak normálových pro každou ze zvolených rovin
- získání celkové síly v obou rovinách
- získání celkové síly z obou rovin, tedy opět celkové řezné síly



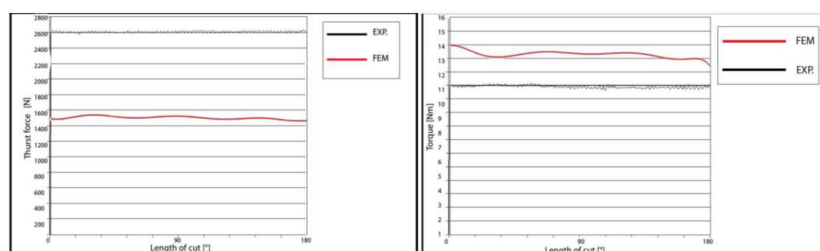
Obrázek 2-9: Příklad promítnutí řezných sil (rozkladu) v ortogonální rovině [14]

Po provedení výše popsaných kroků je možno zapsat výsledný vztah, ale autor již neuvádí hodnoty potřebných konstant. Pouze konstatuje, že jejich velikost je možné získat na základě vhodně navrženého experimentu.

Výpočet s využitím metody konečných prvků

Poslední uvedenou metodou výpočtu řezných sil je metoda konečných prvků. Tato metoda je z časového hlediska poměrně náročná a to jak z hlediska přípravy samotného modelu a sítě pro výpočet, tak samotného výpočtu. Příkladem uceleného systému, který využívá výše uvedenou metodu je AdvantEdge FEM. Tento systém využívají prameny [15], [16] a [17].

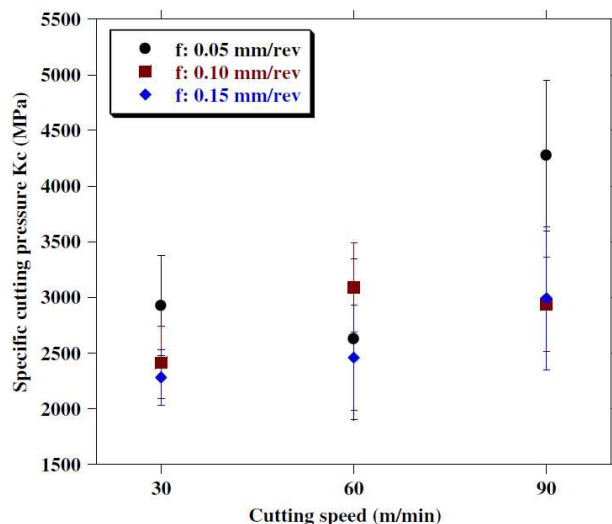
Při porovnání výsledků simulací a reálně naměřených hodnot z výše uvedených pramenů lze dojít k závěru, že vypočtená posuvová síla je při porovnání s měřenou hodnotou o 40 až 50% nižší. Naopak vypočtená hodnota krouticího momentu je o 20 až 22% vyšší než měřená hodnota, viz Obrázek 2-10.



Obrázek 2-10: Porovnání posuvové síly a krouticího momentu [15]

2.5 Experimentální zjišťování měrného řezného odporu

Jak uvádí podkapitola 2.4.2, je měrný řezný odpor zjišťován experimentálně. Při vlastní rešeršní činnosti nebyl nalezen pramen, který by experimentálně zjišťoval přímo hodnotu jednotkového měrného řezného odporu k_{c1} . Pouze dva prameny [18] a [19] uvádějí postup experimentu pro získání měrného řezného odporu k_c .



Obrázek 2-11: Vliv řezných parametrů na průměrnou hodnotu k_c [19]

Podle pramenu [18] je proveden výpočet měrného řezného odporu k_c u testovaných materiálů na základě znalosti (10), kde velikost řezné síly F_c je určena na základě (17).

$$M_c = \frac{1}{4} \cdot F_c \cdot D [N \cdot mm] \Rightarrow F_c = \frac{4 \cdot M_c}{D} [N] \quad (17)$$

kde

- M_c je měřený krouticí moment [N · mm]
- F_c je řezná síla [N]
- D je jmenovitý průměr vrtáku [mm]

Pramen [18] uvádí hodnoty měrného řezného odporu k_c pro několik materiálů a případů obrábění. Pro ilustraci je uveden měrný řezný odpor k_c pro ocel 12050 dle ČSN 41 2050 (Tabulka 2), bohužel již autor neuvádí, jakou přesnou hodnotu pevnosti měl jím testovaný materiál a není proto možné jeho měření opakovat nebo přesněji porovnat s jinými výsledky. Uvádí pouze minimální hodnotu, kterou by měl materiál mít při uvažovaném tepelném zpracování.

Tabulka 2: Tabulka vypočtených měrných řezných odporů podle [18]

Tabulka hodnot měrných řezných odporů pro jednotlivá měření vrtání do oceli		
	Plný materiál	Předvrtaná díra
1. měření	4000,00 MPa	5950 MPa
2. měření	3906,25 MPa	5650 MPa
3. měření	3875,00 MPa	5500 MPa

V pramenu [18] bohužel není rovněž uvedeno, o jaký vrták se jedná a jaká je jeho nástrojová makrogeometrie. Proto není možné provést relevantní kontrolní výpočet podle

(9) s využitím hodnot z tabulky na Obrázek 2-8, kde podle třídění dle MC kódu se jedná o materiál P1.2.Z.AN, jehož jednotkový měrný řezný odpor k_{c1} je 1700 MPa a hodnota m_c je rovna hodnotě 0,25.

Na základě tohoto zjištění bude v rámci disertační práce navržen a proveden experiment, který umožní stanovit přímo hodnotu k_{c1} .

2.6 Experimentální měření řezných sil při vrtání

Zařízení pro měření silových účinků (dynamometr) se zpravidla skládá ze tří částí a to pružného členu, který je zatěžován okolním prostředím, snímače, který zaznamenává změnu deformace či jiných parametrů a přijímače, který provádí zesílení a zpracování signálu.[14]

Základní rozdělení dynamometrů je možné provést z několika hledisek a to:

- *podle měřicí metody, která je aplikovaná* - mechanické, hydraulické, pneumatické, elektrické (na principu magnetostricce, magnetoanizotropie, kapacity, odporu, indukce, piezoelektrického jevu), atd.
- *podle počtu měřených složek* - jednosložkové, dvousložkové, tříložkové a pro měření točivých momentů
- *podle procesu obrábění* - pro soustružení, frézování, vrtání, univerzální, atd.

V současné době jsou nejpoužívanějšími dynamometry, které pracují na principu piezoelektrického jevu. Používají se k převodu síly na elektrický signál. Deformace krystalu určité dielektrické látky způsobí elektrický dipólový moment a následně díky tomuto jevu vznikají na vodivých elektrodách volné náboje. Jako představitel piezoelektrické látky je monokrystalický křemen. Příklad takového dynamometru uvádí Obrázek 2-12. [14]

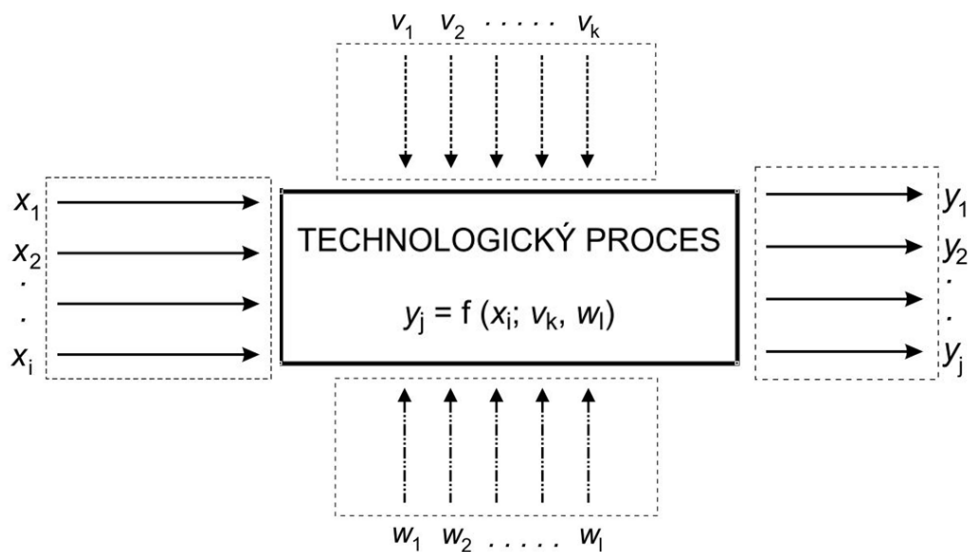


Obrázek 2-12: Dynamometr Kistler pro měření řezných sil při vrtání[20]

2.7 Navrhování a vyhodnocování experimentů DoE

Na zkoumaný proces působí celá řada vlivů. Některé z nich je možné aktivně řídit, těm se říká faktory. Naopak na výstupu z procesu je očekávaný nějaký výsledek, tomu se říká odezva. Úlohou DoE je najít takovou kombinaci faktorů, aby odezva procesu byla co nejpřesnější. K tomu je zapotřebí sledovat odezvu v několika bodech experimentálního

prostoru. Je důležité si uvědomit, že sledování každého bodu vyžaduje jak časovou, tak finanční náročnost. Proto velmi záleží na tom, kolik bodů a jak umístěných se sleduje.[21]



Obrázek 2-13: Schéma experimentu podle DoE [21]

kde

- x_1, x_2, \dots, x_i jsou kontrolované faktory
- v_1, v_2, \dots, v_k jsou konstantní faktory (nekontrolované)
- w_1, w_2, \dots, w_l jsou náhodné faktory (způsobují šum)
- y_1, y_2, \dots, y_j jsou závislé proměnné (odezvy systému)

Základní typy experimentů

Základní rozdělení typu experimentů podle [21] je následující:

- 2^{k-p} – standardní návrhy (Box, Hunter a Hunter)
- 3^{k-p} – standardní návrhy (Box, Hunter a Hunter)
- návrhy s 2 a 3 úrovněmi
- centrální kompozitní plány
- D a A (T) optimální plány

Při vlastním řešení práce bude zvolen jeden z výše uvedených plánů. Vzhledem k povaze plánovaného experimentu se jeví jako nejpravděpodobnější centrální kompozitní plán.

Centrální kompozitní plán

Ten to typ plánu byl v odborné literatuře rovněž nalezen pod označením kombinovaný plán (pramen [22]). Plán je složen ze tří typů bodů, kterými jsou:

- krychlové body – tyto body jsou v plánu vždy a jejich počet je dán jako $n=2^{k-p}$ a slouží k výpočtu efektů faktorů
- centrální body – minimální počet je dva a jejich význam spočívá např. ve vyjádření čisté chyby měření. Centrální body mohou být přidány, pokud jsou všechny

- faktory kvantitativní, neboť u kvalitativních faktorů neexistuje úroveň nula, rovněž se centrální body nepoužívají pro výpočet efektů faktorů
- hvězdicové body – počet těchto bodů je $n=2k$ a umožňují výpočet koeficientů v úplném kvadratickém modelu nebo zpřesňují výpočet regresních koeficientů

Kódování podle DoE normování

$$x_d(i) = \frac{x(i) - \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}}{\frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}} \quad (18)$$

kde

$x_d(i)$ je normovaná proměnná podle DoE

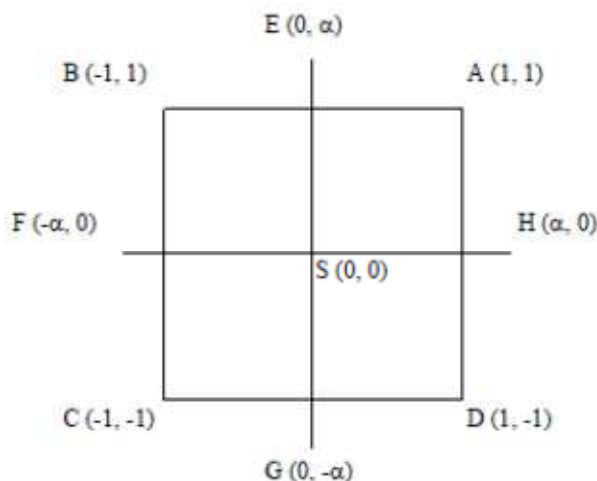
$x(i)$ je proměnná x v původních jednotkách, kdy $i = 1, 2, 3, \dots, n$

x_{\max} je horní úroveň $x(i)$ pro kódovanou hodnotu (+1)

x_{\min} je dolní úroveň $x(i)$ pro kódovanou hodnotu (-1)

Plán experimentu je možné psát pomocí této symboliky: Je-li každý z faktorů uvažován na dvou úrovních, pak dolní úroveň bude značena -1 a horní úroveň +1. [22]

V centrálním kompozitním plánu mají v kódovaném měřítku tyto body souřadnice podle Obrázek 2-14, kde A, B, C a D jsou body krychlové, E, F, G a H jsou body hvězdicové a S je bod centrální.



Obrázek 2-14: Body obsažené v centrálním kompozitním plánu [22]

Celkový počet bodů v centrálním kompozitním plánu je tedy dán následujícím součtem: krychlové body + centrální body + hvězdicové. Kde k je počet faktorů a p je stupeň snížení, nejnižší možná hodnota p je rovna jedné.

Základy statistického usuzování

Vstupem pro matematickou statistiku jsou data nesoucí informaci, kterou je možné pomocí matematické statistiky vhodně zpracovat a využít. Způsobu jakým se budou data získávat a sbírat, se věnuje statistické navrhování experimentů. Návrh statistických

experimentů je složen ze dvou hlavních částí a to z vlastního plánu experimentu a jeho následného statistického vyhodnocení. Základem navrhování experimentu jsou dva principy. Prvním je opakování experimentu, které přináší velice důležitou informaci o chybě experimentu a při dosažení nižších rozptylů měřených hodnot dává přesnější odhad efektu jednotlivých faktorů, které jsou zahrnuty do experimentu. Druhým je pak randomizace, která zaručuje, že pořadí provedených měření je náhodné, neboť možnost aplikace statistických metod vychází právě z tohoto předpokladu. [23]

Analýza výsledků se odvíjí od formy navrženého experimentu. V průběhu analýzy je vyhodnocován vliv faktorů a jejich interakcí. Cílem je výběr faktorů, které mají statisticky významný vliv na sledované veličiny. Za tímto účelem se provádí testování hypotéz (t-test a F-test), analýzy rozptylu nebo kovariance, regresní analýzy apod. Vyhodnocování navrženého experimentu je možné považovat za ukončené, pokud se prokáže, nebo popř. vliv zkoumaných faktorů na sledované veličiny.[23]

Testování hypotéz

Testování statistických hypotéz je spolu s metodami teorie odhadu jedním z nejdůležitějších postupů statistického usuzování. Aby bylo možné uplatnit výše uvedené testování hypotéz (parametrické testy), je potřeba splnit předpoklad normality dat sledovaných veličin.[24]

Fisherův test – F-test

Tento test srovnává dvě přesnosti za předpokladu, že jsou k dispozici data ze dvou různých zařízení. Jde například o testování hypotézy, že na jednom pracovišti je nižší přesnost výroby než na druhém, nebo že první pracoviště vyrábí s vyšším rozptylem než druhé. [25]

Metoda ANOVA

Metoda ANOVA (z anglického Analysis of variance) spočívá v hodnocení vztahů mezi rozptyly porovnávaných výběrových souborů. Tato metoda matematické statistiky umožňuje ověřit, zda mají sledované faktory statisticky významný vliv na sledované veličiny. Podstatou této metody je provedení rozkladu celkového rozptylu na dva dílčí a to na rozptyl vyvolaný vlivem jednotlivých faktorů a na náhodnou složku (šum), u níž lze předpokládat, že vzniká náhodně. Testována je pak statistická významnost poměru mezi těmito složkami. [26], [27]

Studentův t-test

Studentův t-test je nejstarší statistický test pro posuzování shody výběrové veličiny se známou zadanou hodnotou, popřípadě v upravené variantě shody dvou výběrových veličin. Test předpokládá normální rozdělení náhodné veličiny a je využíván pro určení míry pravděpodobnosti, s jakou se porovnávané hodnoty shodují se zadanou hodnotou.

Durbin-Watsonův test

Tento test zjišťuje, zda dochází k autokorelaci (vztah mezi hodnotami, které jsou odděleny daným časovým zpožděním) u reziduí (chyb pravděpodobnosti) z regresní analýzy. Testována je pak nulová hypotéza, která tvrdí, že chyby jsou nekorelované. Oproti alternativní hypotéze, která tvrdí, že se chyby řídí autokorelací.

Shapiro-Wilkův test

Jedná se o test normality. Nulová hypotéza předpokládá, že testované hodnoty pocházejí z výběru s normálním rozdělením. Normalita rozdělení dat je důležitým předpokladem pro testování autokorelací.

Další vybrané testy

Další jsou pak například Grubbsův test (vylučování odlehlých hodnot), Scheffeho test (vícenásobného porovnání), Leveneho test (homogenity rozptylu), Fisherův exaktní test, nebo pak neparametrické jako například Kruskal-Wallisův test rozptylu, nebo Vícenásobný Kruskal-Wallisův test rozptylu (vícenásobné porovnání).

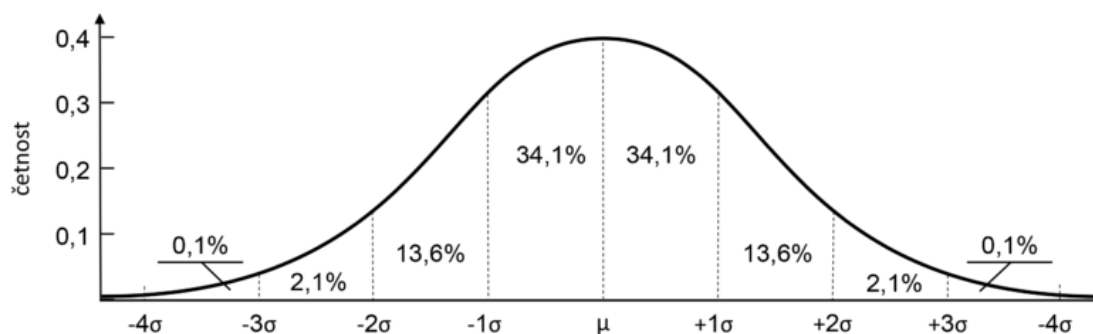
Základní statistická analýza

Při základní statistické analýze naměřených dat je potřeba ověřit o jaký typ dat se jedná. U dat diskrétních zpravidla není potřeba provádět ověřování předpokladů. Oproti tomu u dat spojitého charakteru je situace komplikovanější. Je potřeba nalézt vhodný statický model rozdělení dat. Nejčastěji se jedná o Gaussovo-normální rozdělení, viz Obrázek 2-15. [28]

Normální rozdělení

Normální rozdělení charakterizuje široké spektrum jevů v průmyslové výrobě a přírodních vědách. Jedná se o nejčastější rozdělení u souborů dat spojitého charakteru. Jedná se o rozdělení symetrického charakteru, tzn., že hodnoty se pohybují kolem střední hodnoty a jsou ovlivněny jen náhodnou chybou. [29]

Za předpokladu, že naměřená data odpovídají normálnímu rozdělení, lze předpovídat chování sledovaného procesu do budoucna při zachování totožných podmínek. Další oblast uplatnění je tam, kde měřenou veličinu ovlivňuje velké množství nepatrných navzájem nezávislých vlivů. [24]



Obrázek 2-15: Normální rozdělení-Gaussova křivka [30]

Z pohledu statistického zpracování dat je normální rozdělení důležité z několika pohledů, a to [24]:

- je symetrické a kolem střední hodnoty leží většina hodnot
- má pouze jeden vrchol (je jednomodální)
- je možné určit procento případů, které spadá do daného intervalu okolo střední hodnoty (např. do směrodatné odchylky σ na každou stranu spadá 68,26%, do 2σ pak 95,34% a do 3σ pak 99,7%)

2.8 Definice vybraných pojmů statistického plánování experimentu

Níže uvedené pojmy jsou zásadní pro správné pochopení postupu sestavení plánu experimentu, jakož i volby jeho typu. Těmito pojmy jsou podle [31]:

- **Nezávisle proměnná** – je vstupní veličina, která ovlivňuje výstupní závisle proměnou (např. řezná rychlost, průměr nástroje, otáčky, geometrické parametry, atd.)
- **Závisle proměnná** – je výstupní, někdy též cílová proměnná, která je závislá na vstupní veličině (např. posuvová síla nebo krouticí moment)
- **Spojitá proměnná** – může ve zvoleném intervalu nabývat libovolných hodnot
- **Diskrétní proměnná** – někdy též kategoriální, nabývá konečného počtu hodnot
- **Blokové uspořádání plánu** – celý plán (např. centrální kompozitní) je aplikován na samostatné bloky, které jsou definovány např. druhem materiálu
- **Statistická hypotéza** – je tvrzení, které se týká neznámé vlastnosti rozdělení pravděpodobnosti náhodné proměnné nebo jejích parametrů [24]
- **Nulová hypotéza H_0** – hypotéza, jejíž platnost je ověřována
- **Alternativní hypotéza H_1** – je hypotéza, která je postavena proti nulové hypotéze
- **Statistické testy** – jsou postupy, jimiž se prověřuje platnost nulové hypotézy. Na základě nich se pak hypotéza buď přijme, nebo odmítne [24]
- **Testovací kritérium** - je náhodná veličina závislá na náhodném výběru (též nazývaná statistika) mající vztah k nulové hypotéze [24]
- **Hladina významnosti α** – hladina významnosti se běžně pro strojírenství stanovuje na 5% a stanovuje hranici pro zamítnutí nebo přijmutí nulové hypotézy
- **Signifikantní** – statisticky významný
- **reziduum** – rozdíl mezi hodnou vypočtenou modelem a měřenou experimentální hodnotou
- **pravděpodobnost p (p -value)** – je hodnota, na jejímž základě je zamítnuta nebo nezamítnuta nulová hypotéza pro stanovenou hladinu významnosti α , v uvedených testech je označována např. Prob > F, Prob > |t|, Prob < DW, Shapiro-Wilk p
- **Faktor** – je nezávisle proměnná, která vstupuje do experimentu. Faktory je možné rozdělit do tří základních skupin a to na **kontrolované, konstantní a náhodné**. Kontrolované faktor musí splňovat následující podmínky dle pramenu [21]:
 - není funkcí jiných faktorů
 - musí být říditelný, to znamená, že je v průběhu experimentu konstantní nebo se mění předem daným způsobem
 - musí být technicky řešitelné a to včetně jejich kombinací
 - musí být nezávislé, to znamená, že kterýkoliv faktor nabývá všech hodnot bez ohledu na hodnoty ostatních faktorů
 - podle typu zvoleného plánu (např. centrální kompozitní plán) se musí jednat o spojitou proměnnou

3 Vlastní řešení disertační práce

Na základě provedené rešerše bylo zjištěno, že oblast výpočtu řezných sil při vrtání šroubovitým vrtákem za pomoci statistické modelování není dostatečně popsána. Rovněž tak oblast experimentálního zjišťování měrného řezného odporu bez ohledu na metodu obrábění není dle zjištění dostatečně probádána, ačkoliv se měrný řezný odpor jeví jako vhodná veličina pro predikci řezných sil.

Po vyhodnocení těchto zjištění, je tedy vlastní řešení disertační práce zaměřeno na sestavení statistických modelů výpočtu posuvové síly a krouticího (řezného) momentu šroubovitého vrtáku z povlakovaného slinutého karbidu na základě vlivu materiálu, nástrojové makrogeometrie šroubovitého vrtáku a řezných podmínek. Jako dílčí cíl je řešen návrh experiment vedoucí ke stanovení měrného řezného odporu.

3.1 Volba plánu experimentu

Při vlastní volbě typu plánu je nejdůležitější vědět, zda bude průběh sledované odezvy lineární či nelineární, dále pak, zda bude docházet k interakcím mezi jednotlivými kontrolovanými faktory.

V případě toho experimentu je velmi pravděpodobné, že nastane případ jak nelineárního modelu, tak interakcí některých kontrolovaných faktorů. Na základě tohoto předpokladu je volen centrální kompozitní plán v ortogonální formě.

Použití tohoto plánu vyžaduje několik základních předpokladů, a to:

- vstupní nezávisle proměnné musejí odpovídat definici kontrolovaného faktoru
- kontrolované faktory musejí být plynule proměnné, to znamená, že se jedná o spojité proměnné
- kombinace všech kontrolovaných faktorů musí být technicky proveditelná, z toho pak plyne požadavek na rozsah (omezení) intervalů kontrolovaných faktorů

Z výše uvedených předpokladů plyne, že u kontrolovaných faktorů musí být zajištěna spojitost. Při posouzení jednotlivých skupin kontrolovaných faktorů bylo zjištěno, že tato podmínka není technicky proveditelná u materiálu, respektive není možné materiál nadefinovat pomocí jeho mechanických a fyzikálních vlastností jako spojitě proměnou. Jedná se tedy o diskrétní proměnnou (například konkrétní mez pevnosti, tvrdost, apod.).

Na základě tohoto zjištění je nutné provést korekci návrhu plánu experimentu. Plán experimentu je pak navržen jako blokový, to znamená, že každý zvolený materiál představuje jeden blok, na který se aplikuje výše uvedený druh plánu.

3.2 Experimentální materiál

Celá experimentální činnost je cílena na skupinu materiálů P podle ISO. Na základě tohoto předpokladu jsou vybrány celkem čtyři typové představitelé, kterými jsou:

- Ocel 12050 dle ČSN 42 0002:1976
- Ocel 14220 dle ČSN 42 0002:1976
- Ocel 19313 dle ČSN 42 0002:1976
- Ocel 19573 dle ČSN 42 0002:1976

Ocel 12050 dle ČSN 42 0002:1976

Často používaná ušlechtilá nelegovaná ocel k zušlechťování vhodná pro výrobu méně namáhaných strojních dílů ve stavu zušlechťeném nebo normalizačně žíhaném. Optimálních mechanických hodnot včetně houževnatosti se dosahuje v zakaleném a následně popuštěném stavu. U tvarově složitějších dílů se pro zamezení vzniku trhlin dává přednost kalení do oleje. Ocel je vhodná i k povrchovému kalení plamenem nebo indukci. Z pohledu třískového obrábění, respektive obrobitelnosti se jedná o ocel etalonovou, tzn., že její třída obrobitelnosti je 14b (případně 13b).[32]

Pro vlastní experimentální činnost je vybrána kruhová tyč průměru 120mm, která byla zpracovaná jako 12050.1 dle ČSN 42 0002:1976 (dále jen 12050). Konkrétní hodnoty chemického složení mechanických vlastností uvádí Tabulka 3. Struktura materiálu vychází z Obrázek 3-1 a jedná se o strukturu feriticko-perlitickou.

Tabulka 3: Chemické složení a mechanické vlastnosti materiálu 12050

Chemické složení v hmotnostních %												
C %	Mn %	Si %	P %	S %	Cr %	Ni %	W %	Mo %	V %	Cu %		
0,587	0,762	0,353	0,0117	0,0048	0,216	0,028	0,007	0,021	0,0032	0,0297		
Mechanické vlastnosti materiálu												
Pořadové číslo tahové zkoušky	1		2		3		4		5		6	
Tvrdoost HV10 [-]	225		220		223		224		219		218	
Mez pevnosti v tahu Rm [MPa]	741		742		741		738		741		740	



Obrázek 3-1: Struktura materiálu 12050 normalizačně žíhaného

Ocel 14220 dle ČSN 42 0002:1976

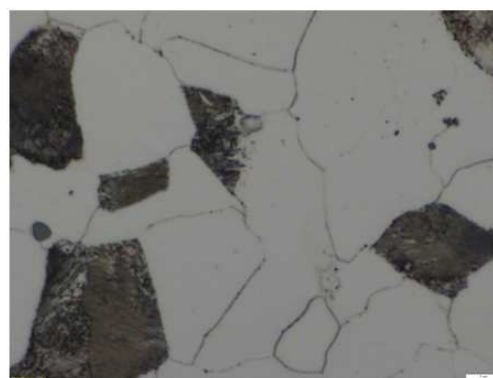
Jedná se o nejčastěji používanou cementační ocel pro středně namáhané strojní díly a díly motorových vozidel. Ve stavu kaleném a popuštěném je použitelná pro průměry do cca 35 mm. Je svařitelná a vhodně tepelně zpracovaná je též dobře tvářitelná za studena. Přísadou bóru (0,0008 až 0,0050%) se dociluje zvýšené houževnatosti cementované vrstvy. Tato ocel byla tedy volena jako základní představitel ocelí vhodných k cementaci.[33]

Pro vlastní experimentální činnost je vybrána kruhová tyč průměru 120mm, která byla zpracovaná jako 14220.1 dle ČSN 42 0002:1976 (dále jen 14220). Konkrétní hodnoty

chemického složení mechanických vlastností uvádí Tabulka 4. Struktura materiálu vychází z Obrázek 3-2 a jedná se o strukturu feriticko-perlitickou.

Tabulka 4: Chemické složení a mechanické vlastnosti materiálu 14220

Chemické složení v hmotnostních %										
C %	Mn %	Si %	P %	S %	Cr %	Ni %	W %	Mo %	V %	Cu %
0,196	1,06	0,203	0,0063	0,0238	0,945	0,0944	0,000	0,022	0,0017	0,1410
Mechanické vlastnosti materiálu										
Pořadové číslo tahové zkoušky	1	2	3	4	5	6				
Tvrdoost HV10 [-]	175	174	175	175	175	180				
Mez pevnosti v tahu Rm [MPa]	561	532	548	547	548	559				



Obrázek 3-2: Struktura materiálu 14220 normalizačně žíhaného

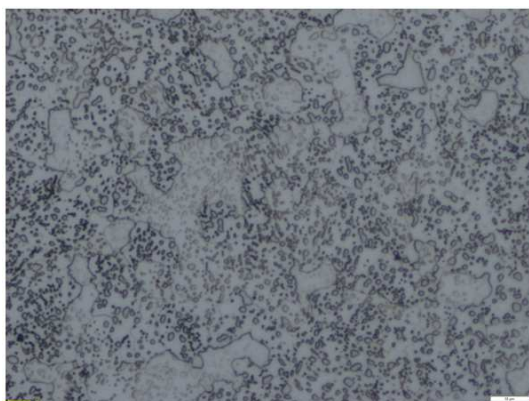
Ocel 19313 dle ČSN 42 0002:1976

Nízkolegovaná ocel ke kalení v oleji a malými rozměrovými změnami po tepelném zpracování. S výhodou je používána na řezací nástroje, u nichž se vyžaduje nejvyšší stálost rozměrů po kalení, dále pak na kombinované a tažné řezné matrice, pro malé a střední formy k lisování umělých hmot, menší nástroje pro tváření, přesné závitořezné nástroje a měřidla. Ocel byla volena pro experimentální část právě pro její vysokou rozměrovou stálost po tepelném zpracování pro níž je silně rozšířena v průmyslové praxi. [34]

Pro vlastní experimentální činnost je vybrána kruhová tyč průměru 122mm, která byla zpracovaná jako 19313.3 dle ČSN 42 0002:1976 (dále jen 19313). Konkrétní hodnoty chemického složení mechanických vlastností uvádí Tabulka 5. Struktura materiálu vychází z Obrázek 3-3 a jedná se o strukturu feriticko-karbidickou.

Tabulka 5: Chemické složení a mechanické vlastnosti materiálu 19313

Chemické složení v hmotnostních %										
C %	Mn %	Si %	P %	S %	Cr %	Ni %	W %	Mo %	V %	Cu %
1,05	2,15	0,252	0,0234	0,0009	0,24	0,0662	0,033	0,099	0,1240	0,0421
Mechanické vlastnosti materiálu										
Pořadové číslo tahové zkoušky	1	2	3	4	5	6				
Tvrdoost HV10 [-]	203	204	200	206	204	207				
Mez pevnosti v tahu Rm [MPa]	627	626	619	627	626	628				



Obrázek 3-3: Struktura materiálu 19313 žíhaného na měkko

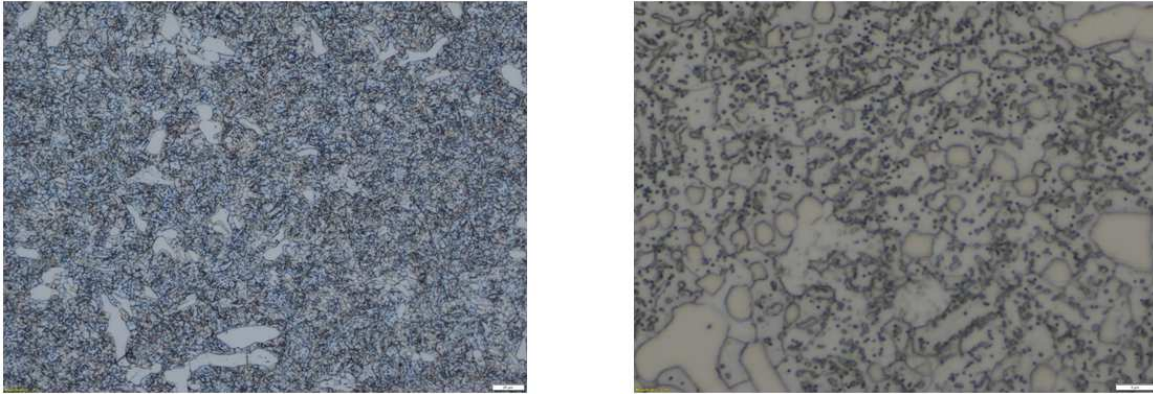
Ocel 19573 dle ČSN 42 0002:1976

Jedná se o ledeburitickou chromovou ocel, které je zástupcem nejvýkonnějších ocelí. V její struktuře jsou speciální ledeburitické karbidy chromu, případně vanadu. Přísada molybdenu a vanadu přispívá ke zvýšení prokalitelnosti a odolnosti proti opotřebení. Velkou nevýhodou je uspořádání karbidů do typicky uspořádaných řádků u jednosměrně tvářených tyčových polotovarů. Vhodné použití nachází u nástrojů pro řezy s vyšší houževnatostí, průmyslové nože, nože pro stříhání plechu do tloušťky 6mm a lisovací nástroje. Tato ocel je pro experimentální část volena jako zástupce materiálu se zhoršenou obrobiteľností, která je rovněž jako předešlé oceli hojně rozšířena v průmyslové praxi.[35]

Pro vlastní experimentální činnost je vybrána kruhová tyč průměru 122mm, která byla zpracovaná jako 19573.3 dle ČSN 42 0002:1976 (dále jen 19573). Konkrétní hodnoty chemického složení mechanických vlastností uvádí Tabulka 6. Struktura materiálu vychází z Obrázek 3-4 a jedná se o strukturu feriticko-karbidickou.

Tabulka 6: Chemické složení a mechanické vlastnosti materiálu 19573

Chemické složení v hmotnostních %										
C %	Mn %	Si %	P %	S %	Cr %	Ni %	W %	Mo %	V %	Cu %
1,475	0,368	0,393	0,0256	0,0000	11,65	0,1355	0,039	0,844	0,6985	0,0642
Mechanické vlastnosti materiálu										
Pořadové číslo tahové zkoušky	1	2	3	4	5	6				
Tvrđost HV10 [-]	233	233	238	239	235	238				
Mez pevnosti v tahu Rm [MPa]	689	684	690	695	682	688				



Obrázek 3-4: Struktura materiálu 19573 žíhaného na měkko

Hodnoty tvrdosti jsou průměrnými hodnotami, vypočtenými na základě Přílohy 1.

3.3 Volba faktorů experimentu

3.3.1 Návrh experimentálních parametrů šroubovitého vrtáku

Výběr parametrů šroubovitého vrtáku, které vstupují do experimentu jako kontrolované faktory, je omezen na makrogeometrii nástroje. Ostatní parametry pak jsou jako konstantní faktory, a to včetně vybraných mikrogeometrických a povrchových parametrů. Při výběru kontrolovaných faktorů je postupováno podle podkapitoly 3.1. Při dodržení těchto předpokladů, mohou být makrogeometrické parametry rozčleněny na faktory kontrolované a konstantní. Následně je u kontrolovaných faktorů určen interval jejich hodnot a konstantním faktorům určena jejich hodnota.

Rozčlenění nástrojových faktorů

Jak již bylo uvedeno výše, jsou makrogeometrické parametry rozčleněny na kontrolované a konstantní faktory. V případě geometrických kontrolovaných faktorů je kritickou podmínkou jejich vzájemná nezávislost. A právě na základě této podmínky je provedeno jejich rozčlenění na kontrolované a konstantní.

Kontrolované faktory

D – jmenovitý průměr nástroje

α_o – nástrojový úhel hřbetu v ortogonální rovině

ω_r – nástrojový úhel sklonu šroubovice drážky v základní rovině

ε_r – nástrojový úhel špičky (hrotu) v základní rovině (na základě Obrázek 2-2 je roven hodnotě $2 \cdot \kappa_r$)

Ostatní geometrické parametry jsou na sobě nebo na výše uvedených závislé, proto jsou zařazeny mezi konstantní faktory.

Konstantní faktory

Těmito faktory jsou materiál nástroje, velikost jádra, tvar ostří, tvar a velikost drážky, možná hloubka vrtání stanovená jako násobek jmenovitého průměru, šířka fazet (na hřbetě a obvodu), příčné ostří, poloměr zaoblení ostří a povlak. Některé parametry, jako např. úhel čela, nejsou uvedeny, neboť nejsou ani jedním z typů faktorů uvedených v podkapitole 2.7.

Určení intervalů a hodnot nástrojových faktorů

Určení intervalů hodnot kontrolovaných faktorů proběhlo na základě poznatků z rešeršní činnosti, konzultací s odbornou veřejností a v neposlední řadě s ohledem na požadavek z podkapitoly 3.1 který uvádí, že kombinace všech kontrolovaných faktorů musí být technicky proveditelná, jinak řečeno, při kombinaci všech úrovní kontrolovaných faktorů musí být zaručeno, že nástroj vyvrtá potřebný počet otvorů pro naměření požadovaného počtu hodnot závisle proměnné (v tomto případě posuvových sil a krouticích momentů). U hodnot konstantních faktorů musí být naopak zaručeno, aby byly konstantní pro všechna provedená měření, nebo byly vyjádřeny poměrově k jmenovitému rozměru šroubovitého vrtáku, kterým je jeho průměr.

Intervaly hodnot kontrolovaných faktorů

D – jmenovitý průměr nástroje [mm] je v intervalu $\langle 8;12 \rangle$

α_o – nástrojový úhel hřbetu v ortogonální rovině [°] je v intervalu $\langle 8;12 \rangle$

ω_r – nástrojový úhel sklonu šroubovice drážky v základní rovině [°] je v intervalu $\langle 25;35 \rangle$

ε_r – nástrojový úhel špičky (hrotu) v základní rovině [°] je v intervalu $\langle 130;145 \rangle$

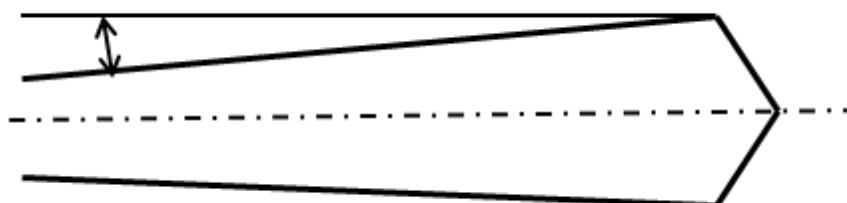
Hodnoty konstantních faktorů

Pro přehlednost jsou hodnoty konstantních faktorů shrnuty v Tabulka 7.

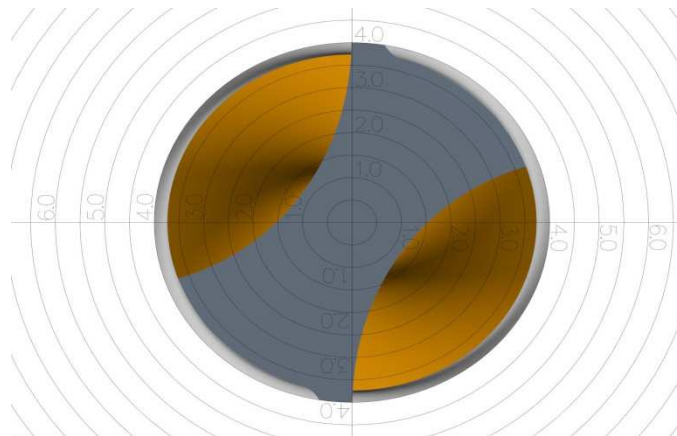
Tabulka 7: Přehled hodnot konstantních nástrojových faktorů

Faktor	Průměr jádra	Šířka obvodové fazety	Šířka hřbetní fazety	Zaoblení ostří	Hloubka vrtání	Délka příčného ostří	Materiál nástroje	Vrstva (povlak)	Tvar ostří	Stažení průměru
Jednotka	[mm]	[mm]	[mm]	[μ m]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[°]
Hodnota	0,3·D	0,115·D	0,135·D	15	2·D	0,025·D	CTS20D (Ceratzit)	Triple Cr SHM	mírně konvexní	0,08

Drážka je definována svým tvarem, který je stejný pro všechny šroubovitě vrtáky, pouze je příslušně zvětšena podle zvoleného průměru. Za jednotkovou je přitom považována drážka vrtáku se jmenovitým průměrem 8mm, viz Obrázek 3-6. Pak je tedy možno stanovit přepočítání velikosti pro průměr vrtáku x jako D_x/D_8 .



Obrázek 3-5: Znárodnění stažení průměru nástroje



Obrázek 3-6: Tvar a velikost drážky pro vrták $D=8\text{mm}$ v rovině P_p

3.3.2 Návrh experimentálních řezných podmínek

Obdobně jako při návrhu podkapitoly 3.3.1, je potřeba podrobit řezné parametry analýze a provést jejich rozčlenění na kontrolované faktory a faktory konstantní.

Rozčlenění faktorů řezných podmínek

Při rozdělování faktorů je důležité přihlídnout nejen k jejich nezávislosti na řezných podmínkách, ale rovněž i k již voleným kontrolovaným nástrojovým faktorům. To znamená, že kontrolovaným faktorem řezných podmínek nemohou být např. minutové otáčky, neboť při jejich určení je potřeba užít jmenovitý průměr nástroje, který však již byl zvolen jako kontrolovaný nástrojový faktor.

Kontrolované faktory

v_c – řezná rychlost

f_{ot} – otáčkový posuv

Konstantní faktory

Jako konstantní faktor je z pohledu řezných podmínek voleno řezné prostředí. Jako řezné prostředí je volena procesní kapalina na bázi olejové emulze o určité koncentraci. Technická proveditelnost změny koncentrace jako spojité veličiny by byla značně náročná, neboť by to znamenalo měnit koncentraci celého chladicího systému stroje na přesně stanovené koncentrace. Jinou možností by bylo zavedení různých prostředí, např. bez chlazení, chlazení vzduchem, apod., ale tím bychom se ze spojité proměnné dostali k proměnné diskrétní. To by znamenalo provedení dalšího rozčlenění do bloků a z toho plynoucího vysokého navýšení počtu měření.

Určení intervalů a hodnot faktorů řezných podmínek

Určení intervalů hodnot kontrolovaných faktorů proběhlo na základě poznatků z rešeršní činnosti, konzultací s odbornou veřejností a v neposlední řadě s ohledem na požadavek z podkapitoly 3.1, který uvádí, že kombinace všech kontrolovaných faktorů musí být technicky proveditelná. U hodnot konstantních faktorů musí být naopak zaručeno, aby byly konstantní pro všechna provedená měření.

Intervaly hodnot kontrolovaných faktorů

v_c – řezná rychlost [m/min] v intervalu $\langle 80;150 \rangle$

f_{ot} – otáčkový posuv [mm/ot.] v intervalu $\langle 0,09;0,026 \rangle$

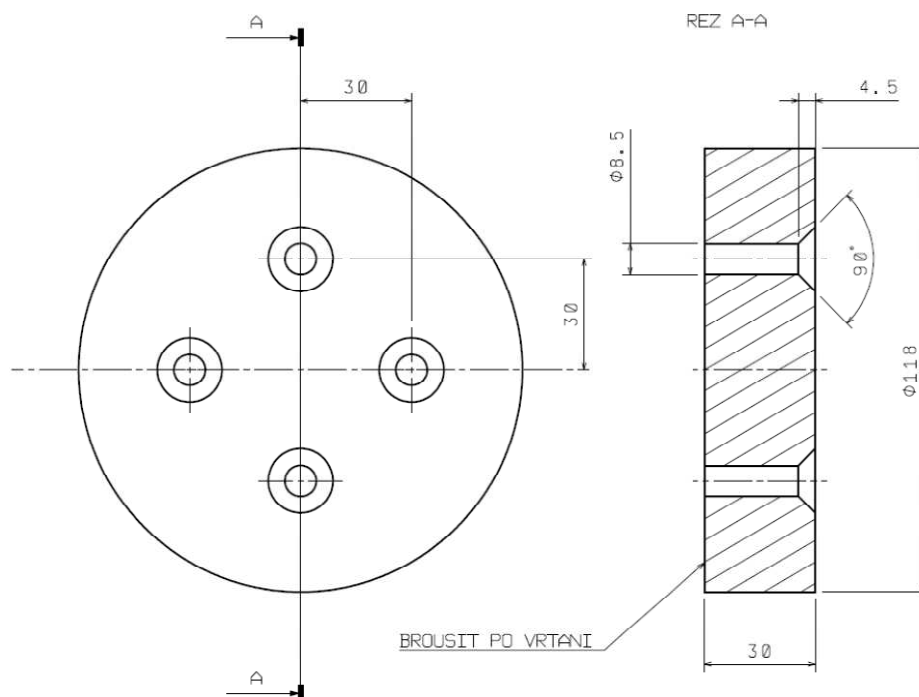
Hodnota konstantního faktoru

Jako procesní kapalina je zvolena olejová emulze BLASOCUT BC 35 KOMBI od společnosti Blaser Swisslube CZ. Koncentrace byla nastavena na 6,9%, což odpovídá doporučenému rozsahu výrobce, který uvádí rozsah 6 až 8%.

3.3.3 Technologické parametry

Vzhledem k povaze experimentu spadají všechny technologické parametry do kategorie konstantních faktorů. Těmito konstantními faktory pak jsou:

- **stroj** – DMU eVo 40 linear - podrobný popis, viz Příloha 2
- **obrobek (polotovár)** – pr. 118 mm výšky 30mm - broušený, viz Obrázek 3-7
- **nástrojový upínač** – hydroplastický upínač s výměnnými pouzdry pro průměry nástrojů od 8 do 12mm, viz podkapitola 3.3.1
- **dynamometr (upnutí obrobku)** – dynamometr Kistler 9272, kdy upnutí obrobku je realizováno pomocí šroubů s kuželovou hlavou k dosedací ploše dynamometru, viz Obrázek 3-8 – podrobný popis dynamometru, viz Příloha 2



Obrázek 3-7: Náčrt polotovaru pro experiment



Obrázek 3-8: Upnutí obrobku na dynamometr

3.4 Sestavení plánu experimentu

Na základě výše provedeného rozboru faktorů je sestaven experiment pro zjištění statistického modelu průběhu posuvové síly a krouticího momentu v závislosti na uvedených faktorech.

Jak již bylo uvedeno v podkapitole 3.1 je zvolen centrální kompozitní plán v blokovém uspořádání. K samotnému sestavení plánu musí být ještě stanoven počet úrovní, respektive hodnot, které budou u každého faktoru testovány. Z podstaty centrálního kompozitního plánu musí být těchto úrovní pět, neboť po dvou úrovních je potřeba jak pro krychlové body (± 1), tak i hvězdicové body ($\pm \alpha$) a jedna úroveň pro centrální body (0,0).

Pokud bude dodrženo značení kontrolovaných faktorů podle Obrázek 2-13, pak:

- X_1 – jmenovitý průměr nástroje D [mm] v intervalu $\langle 8;12 \rangle$
- X_2 – otáčkový posuv f_{ot} [mm/ot] v intervalu $\langle 0,09;0,026 \rangle$
- X_3 – řezná rychlost v_c [m/min] v intervalu $\langle 80;150 \rangle$
- X_4 – nástrojový úhel špičky (hrotu) v základní rovině ϵ_r [°] v intervalu $\langle 130;145 \rangle$
- X_5 – nástrojový úhel hřbetu v ortogonální rovině α_o [°] v intervalu $\langle 8;12 \rangle$
- X_6 – nástrojový úhel sklonu šroubovice drážky v základní rovině ω_r [°] v intervalu $\langle 25;35 \rangle$

Po sestavení plánu docházíme k poznání, že počet měření pro jeden blok podle podkapitoly 2.7 je 46 (32 krychlových bodů, 2 centrální body a 12 hvězdicových bodů). Centrální body umožní provést kontrolu, zda jsou měření prováděna korektně, respektive zda při vlastním měření nedochází k chybě např. vlivem obsluhy stroje a měřicího zařízení, viz podkapitola 2.7. Pro zvýšení statistické vypovídací hodnoty je každé měření (bod plánu) opakováno celkem šestkrát, to znamená, že pro jednu kombinaci kontrolovaných faktorů dostáváme šest hodnot pro každou závisle proměnnou.

Ze sestaveného plánu experimentu pak rovněž vyplývá i potřebný počet experimentálních nástrojů. Vzhledem k vzájemným kombinacím geometrických kontrolovaných faktorů je to celkem 25 kusů, kdy vyráběny budou 2 ks od každé varianty, tedy celkem 50 ks.

Z výše popsaného plyne potřeba vrtat celkem 276 otvorů pro jeden blok při použití 25 různých geometrických variant nástrojů, rovněž jako potřeba příslušného počtu polotovarů, viz Obrázek 3-7 a rozložení vrtaných otvorů tak, aby nedocházelo k vzájemnému ovlivňování jednotlivých měření. Na základě zkušeností z experimentálního měření řezných sil při vrtání je volena minimální tloušťka stěny mezi otvory 5mm. Při dodržení tohoto rozměru je pak zapotřebí 9 polotovarů od každého materiálu, kdy jeden z polotovarů je připraven jako náhradní pro případ chyby obsluhy, nebo selhání měřicího zařízení.

Tabulka 8 a Tabulka 9 uvádějí příklady typů bodů centrálního kompozitního plánu, viz podkapitola 2.7. V těchto tabulkách pak měření 24 a 25 reprezentují krychlové body, měření 43 a 44 hvězdicové body a měření 45 a 46 body centrální.

Tabulka 8: Typy bodů v přirozeném měřítku

Měření	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
24	11,1	0,13	134,50	141,7	11,1	27,2
25	11,1	0,22	95,50	133,3	8,9	27,2
43	10,0	0,18	115,00	137,5	10,0	25,0
44	10,0	0,18	115,00	137,5	10,0	35,0
45 (C)	10,0	0,18	115,00	137,5	10,0	30,0
46 (C)	10,0	0,18	115,00	137,5	10,0	30,0

Tabulka 9: Typy bodů v kódovaném měřítku

Měření	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
24	1,00000	-1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	-1,00000
25	1,00000	1,00000	-1,00000	-1,00000	-1,00000	-1,00000
43	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	-1,78419
44	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,78419
45 (C)	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
46 (C)	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000

Celý plán experimentu a v přirozeném a kódovaném měřítku je v Příloze 3.

3.4.1 Experimentální šroubovitě vrtáky

Pro vlastní realizaci experimentu bylo nutné vyrobit 25 ks speciálních šroubovitých vrtáků. Jejich geometrické vlastnosti byly dány kontrolovanými a konstantními faktory, viz podkapitola 3.3.1. Jednotlivé kombinace, respektive konkrétní vrtáky, jsou značeny čísly od 1 do 25. Odlišení dvou stejných vrtáků je pak provedeno pomocí dodatkových čísel 1 a 2. Kombinace kontrolovaných geometrických faktorů, respektive jednotlivé šroubovitě vrtáky, jsou uvedeny v Tabulka 10, včetně četnosti použití v rámci jednoho bloku.

Tabulka 10 uvádí hodnoty navržené plánem. Pro výrobu je však nutné nastavit tolerance pro jednotlivé parametry. Nastavení bylo následující:

- D – jmenovitý průměr vrtáku $\pm 0,02$ [mm]
- ε_r – nástrojový úhel špičky (hrotu) v základní rovině $\pm 0,3$ [°]
- α_o – nástrojový úhel hřbetu v ortogonální rovině $\pm 0,2$ [°]
- ω_r – nástrojový úhel sklonu šroubovice drážky v základní rovině $\pm 0,2$ [°]

Hodnoty dosažené u reálných nástrojů jsou uvedeny v Příloze 4.

Tabulka 10: Experimentální šroubovitě vrtáky a četnost jejich použití

Číslo nástroje	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
D [mm]	8,0	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	10,0	10,0	10,0	10,0
ϵ_r [°]	137,5	133,3	133,3	133,3	133,3	141,7	141,7	141,7	141,7	145,0	130,0	137,5	137,5
α_o [°]	10,0	8,9	8,9	11,1	11,1	8,9	8,9	11,1	11,1	10,0	10,0	8,0	12,0
ω_r [°]	30,0	32,8	27,2	27,2	32,8	32,8	27,2	27,2	32,8	30,0	30,0	30,0	30,0
Měření/blok	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
Číslo nástroje	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
D [mm]	10,0	10,0	10,0	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	12,0
ϵ_r [°]	137,5	137,5	137,5	133,3	133,3	133,3	133,3	141,7	141,7	141,7	141,7	141,7	137,5
α_o [°]	10,0	10,0	10,0	11,1	11,1	8,9	8,9	8,9	8,9	11,1	11,1	10,0	
ω_r [°]	25,0	35,0	30,0	32,8	27,2	32,8	27,2	32,8	27,2	32,8	27,2	30,0	
Měření/blok	1	1	6	2	2	2	2	2	2	2	2	1	

3.5 Ověření vlivu polohy vrtaného otvoru na hodnotu F_f a M_c

Před zahájením hlavního experimentu bylo nutno ověřit, zda a případně jak velký vliv má poloha vrtaného otvoru na velikost posuvové síly a krouticího momentu. Pro tento případ byl sestaven jednoduchý plán experimentu pouze pro dva kontrolované faktory. Jsou to souřadnice polohy otvoru (x,y). Kde souřadnice x je zastoupena kontrolovaným faktorem x_1 a souřadnice y zastoupena kontrolovaným faktorem x_2 . Střed souřadného systému je shodný se středem souřadného systému dynamometru a směr x je orientován podle měřené síly F_x . Ostatní faktory jsou konstantního typu. Pro zvýšení vypovídací hodnoty je experiment proveden za podmínek jednoho z bodů hlavního experimentu.

Experiment je proveden na materiálu 12050. Plán je sestaven jako centrální kompozitní, kde podle definice z podkapitoly 2.7 vychází celkem 9 pokusů. Pro zjednodušení není provedeno opakování. Interval sledovaných faktorů byl vzhledem k polotvaru (kruhová deska) stejný, a to $\langle -46,6; 46,6 \rangle$ v mm.

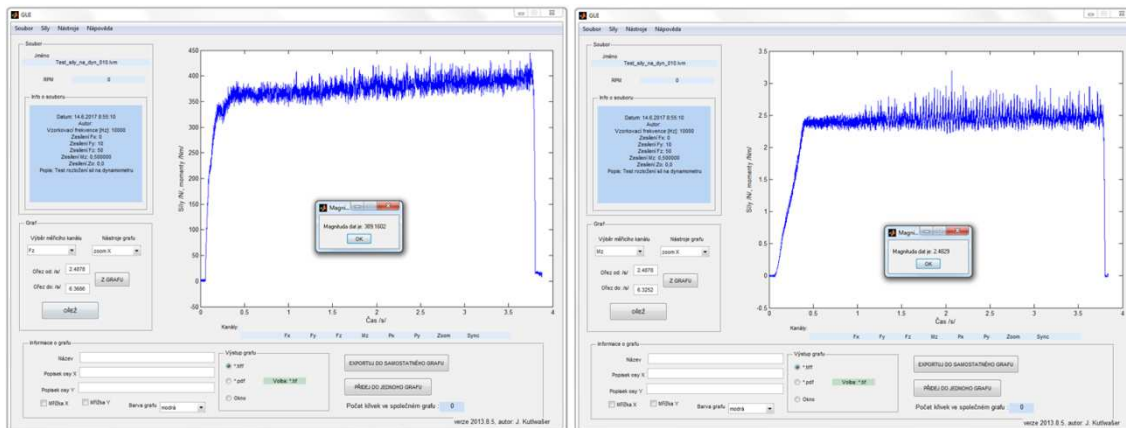
Tabulka 11: Plán experimentu pro stanovení vlivu polohy v přirozeném měřítku

Měření	souřadnice x	souřadnice y
1	-33	-33
2	-33	33
3	33	-33
4	33	33
5	-46,60	0
6	46,60	0
7	0	-46,60
8	0	46,60
9	0	0

Realizace experimentu probíhala shodně jako v podkapitole 3.6.

3.5.1 Vyhodnocování naměřených dat F_f a M_c

Vyhodnocování probíhalo za pomoci aplikace NASOMER 8.5, která byla naprogramována v SW MatLab. K vlastnímu vyhodnocení byla použita vnitřní funkce Data Magnitude, viz Obrázek 3-9. V tomto případě je posuvová síla 389N a krouticí moment 2,4829Nm.



Obrázek 3-9: Vyhodnocení F_f a M_c v aplikaci NASOMER 8.5

3.5.2 Posouzení vlivu polohy na F_f a M_c

Naměřená data byla podrobena statistické analýze a na jejím základě byly zjištěny následující skutečnosti pro posuvovou sílu a krouticí moment.

Krouticí moment

U krouticího momentu vyplývá z provedené analýzy metodou ANOVA, že variabilita způsobená náhodnými chybami je výrazně větší, než variabilita naměřených hodnot vysvětlená modelem. Nebyl tedy nalezen statisticky významný model, a proto poloha nemá na základě hodnoty Fisher-Snedecorova testovacího kritéria vliv na měření krouticího momentu, viz Tabulka 12. Zde je třeba podotknout, že hladina významnosti je $\alpha = 5\%$, viz podkapitola 2.7, a dosažená hodnota hladiny významnosti (Prob>F) je větší než α . Potom tedy může být napsáno, že v modelu neexistuje ani jeden člen, který má vliv na hodnotu krouticího momentu.

Tabulka 12: ANOVA pro posouzení vlivu polohy na krouticí moment

Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Model	2	0,07464243	0,037321	2,4436	0,1674
Error	6	0,09163942	0,015273		
C. Total	8	0,16628185			

Posuvová síla

Pro posuvovou sílu existuje relevantní model. Tabulka 13 uvádí jeho základní parametry. U tohoto modelu je nutné doplnit, že model nedokáže vysvětlit až 33,870 % variability naměřených hodnot posuvové síly. Model se považuje za dostatečný, pokud dokáže vysvětlit alespoň 70% variability naměřených hodnot sledované veličiny.

Tabulka 13: Analýza vhodnosti modelu působení kontrolovaných faktorů na F_f

Summary of Fit	
RSquare	0,745976
RSquare Adj	0,661301
Root Mean Square Error	3,149023
Mean of Response	394,4444
Observations (or Sum Wgts)	9

Podobně jako u krouticího momentu byla provedena analýza metodou ANOVA, viz Tabulka 14. Z provedené analýzy vyplývá, že variabilita způsobená náhodnými chybami je výrazně menší, než variabilita naměřených hodnot vysvětlená modelem. Hodnota dosažené hladiny významnosti (Prob>F) poukazuje na vhodnost použitého modelu podle Fisher-Snedecorova testovacího kritéria. Důvodem je samotná povaha testu. Nulová hypotéza, která je testována, říká, že žádný z efektů (členů) modelu nemá vliv na hodnotu posuvové síly. Protože pracujeme s hladinou významnosti $\alpha = 5 \%$ a dosažená hodnota hladiny významnosti je menší než α , lze tedy tvrdit, že v modelu je obsažen alespoň jeden člen, který má vliv na hodnotu posuvové síly.

Tabulka 14: ANOVA pro posouzení vlivu polohy na posuvovou sílu

Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Model	2	174,72413	87,3621	8,8099	0,0164
Error	6	59,49809	9,9163		
C. Total	8	234,22222			

Tabulka 15 odhadu parametrů modelu obsahuje několik základních informací. Při zvolené hladině významnosti $\alpha = 5 \%$ má signifikantní vliv na hodnotu posuvové síly absolutní člen a dále pak kontrolované faktory X_1 a X_2 (souřadnice x a y). Střední chyba absolutního členu je pak 1,049 a střední chyba odhadu kontrolovaných faktorů X_1 a X_2 a je rovna 1,113. V absolutním členu je zahrnut vliv všech konstantních faktorů a rovněž případný vliv náhodných faktorů.

Tabulka 15: Tabulka odhadu parametrů modelu pro F_f při posouzení vlivu polohy

Parameter Estimates							
Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t	Lower 95%	Upper 95%	VIF
Intercept	394,44444	1,049674	375,78	<,0001	391,87598	397,01291	.
x2	-3,34099	1,113348	-3	0,024	-6,065254	-0,616726	1
x1	3,267767	1,113348	2,94	0,0261	0,5435028	5,9920311	1

Na základě výše provedeného odhadu parametrů modelu může být sestavena statistická predikční závislost (19), kde \hat{y} je posuvová síla, x_1 a x_2 jsou kontrolované faktory.

$$\hat{y} = 394,444 + 3,267767 \cdot x_1 - 3,34099 \cdot x_2 \quad (19)$$

Pro převedení predikčního vztahu do přirozeného měřítka musí být provedeno odkódování podle DoE normování (18), neboť v průběhu analýzy byly použity kontrolované faktory v kódovaném měřítku, kódovaném podle DoE normování, viz podkapitola 2.7.

Na základě převodového vztahu (18) pak může být statistická rovnice (19) převedena na predikční vztah posuvové síly F_f do přirozeného měřítka jako (20).

$$F_f = 394,4444 - 0,07169 \cdot y - 0,070123 \cdot x \quad (20)$$

Na základě (20) jsou vypočteny hodnoty, které uvádí Tabulka 16. Po porovnání měřených a vypočtených hodnot je dojito k závěru, že průměrná hodnota chyby rozdílu představuje -0,0164 %.

Tabulka 16: Porovnání měřených a vypočtených F_f při posouzení vlivu polohy

Souřadnice [mm]		Posuvová síla F_f [N]		Rozdíl měřená - vypočítaná	
x	y	Vypočítaná	Měřená	[N]	[%]
-33	-33	399,12	393	-6,12	-1,56
-33	33	394,39	390	-4,39	-1,13
33	-33	394,50	403	8,50	2,11
33	33	389,76	392	2,24	0,57
-46,6	0	397,71	392	-5,71	-1,46
46,6	0	391,18	402	10,82	2,69
0	-46,6	397,79	399	1,21	0,30
0	46,6	391,10	390	-1,10	-0,28
0	0	394,44	389	-5,44	-1,40
Průměrná hodnota chyby [%]					-0,0164

3.5.3 Zhodnocení vlivu polohy na hodnotu F_f a M_c

Při zhodnocení vlivu polohy jsou brány v úvahu dva přístupy a to zda byl nalezen adekvátní statisticky významný model a pokud ano, zda má význam tento model využít pro polohovou korekci měřených hodnot.

Krouticí moment M_c

U krouticího momentu nebyl nalezen statisticky významný model, viz Tabulka 12. A proto může být vysloveno tvrzení, že poloha vrtaného otvoru nemá vliv na velikost krouticího momentu.

Posuvová síla F_f

Pro posuvovou sílu byl nalezen statisticky významný model, viz Tabulka 14, ale vzhledem k tomu, že model nedokáže vysvětlit až 33,87 % variability měřených dat, je dojito k závěru, že nalezený statistický model nezpřesňuje dostatečně proces měření, respektive, že zpřesnění nemá signifikantní vliv.

Vydeme-li z předpokladu, že měřené hodnoty, respektive opakování pro jednotlivé body plánu budou mít normální rozdělení, pak bude možné z měřených hodnot počítat průměr. Jsou-li porovnány procentuální odchylky od průměrné hodnoty u vypočtených a měřených hodnot z Tabulka 16, je dojito k závěru, že průměrná hodnota odchylky pro vypočtené hodnoty je 2,52 % a u měřených hodnot pak 1,16 %, kdy průměr je vypočítán z absolutních hodnot odchylek. Z toho plyne, že vypočtené hodnoty kolísají více, než hodnoty měřené, proto ani v případě posuvové síly nebude uvažován vliv polohy vrtaného otvoru.

3.6 Hlavní experiment F_f a M_c

Hlavní experiment si klade za cíl na základě výše uvedených skutečností realizovat měření, vyhodnocení a statistické zpracování dat pro získání korektních výpočtových modelů posuvové síly a krouticího momentu v závislosti výše popsaných kontrolovaných a konstantních faktorů.

3.6.1 Realizace měření hlavního experimentu

Experimentální měření bylo realizováno na stroji DMU eVo 40 linear. Hodnoty posuvové síly a krouticího momentu byly měřeny dynamometrem Kistler typ 9272, který je zapojen v měřící soustavě, viz Obrázek 3-10. Pro záznam měřených dat je použita aplikace v prostředí SW LabView.



Obrázek 3-10: Zapojení dynamometru do měřící soustavy

Celý experiment byl rozdělen čtyř etap (bloků) podle obráběného materiálu. Pro materiály 12050 a 14220 byly použity nástroje s indexem 1 a pro materiály 19313 a 19573 nástroje s indexem 2. Důvodem byla snaha o eliminaci vlivu opotřebení na měřené hodnoty posuvové síly a krouticího momentu.

3.6.2 Vyhodnocení naměřených dat F_f a M_c

Vyhodnocování probíhalo za pomoci aplikace NASOMER 8.5, viz podkapitola 3.5.1. Měřené hodnoty pro materiály, které jsou použity, jsou uvedeny v Příloze 5. Následně pak byla data opět podrobena statistické analýze.

Pro všechny níže uvedené testy je hladina významnosti $\alpha = 5 \%$.

Jako první byla provedena analýza centrálních bodů (45C a 46C) t-testem, zda v nich měřené hodnoty jsou signifikantně rozdílné či nikoliv. Signifikantní rozdílnost by znamenala, že měření bylo zatíženo významnou chybou. Hodnoty pravděpodobnosti (p) nulové hypotézy jsou uvedeny v Tabulka 17 a vyplývá z nich, že hodnoty nejsou signifikantně rozdílné, respektive, že není dostatek důkazů na to, aby byla zamítnuta nulová statistická hypotéza. Podklady k t-testu jsou uvedeny v Příloze 6.

Tabulka 17: Shrnutí výsledků t-testu nulových bodů

Materiál	Posuvová síla F_f pro centrální body				Kroučicí moment M_c pro centrální body			
	F_f 12050	F_f 14220	F_f 19313	F_f 19573	M_c 12050	M_c 14220	M_c 19313	M_c 19573
p [-]	0,201	0,924	0,78	0,277	0,432	0,370	0,137	0,611
Hladina významnosti α [-]								0,05

Posuvová síla

Pro posuvovou sílu existuje relevantní model u všech sledovaných materiálů. Tabulka 18 uvádí jejich základní parametry. Vzhledem k vysokým hodnotám upraveného indexu determinace (F_f 12050 = 99,6 %, F_f 14220 = 97,9 %, F_f 19313 = 97,6 %, F_f 19573 = 99,1 %) může být řečeno, že se jedná o adekvátní model.

Tabulka 18: Analýza vhodnosti modelů F_f pro zvolené materiály

Summary of Fit F_f 12050	
RSquare	0,997156
RSquare Adj	0,996
Root Mean Square Error	18,7112
Mean of Response	912,1905
Observations (or Sum Wgts)	46
Summary of Fit F_f 14220	
RSquare	0,986544
RSquare Adj	0,97912
Root Mean Square Error	55,18647
Mean of Response	1134,717
Observations (or Sum Wgts)	46
Summary of Fit F_f 19313	
RSquare	0,983133
RSquare Adj	0,976281
Root Mean Square Error	63,89768
Mean of Response	1516,499
Observations (or Sum Wgts)	46
Summary of Fit F_f 19573	
RSquare	0,99371
RSquare Adj	0,99087
Root Mean Square Error	24,8524
Mean of Response	1198,88
Observations (or Sum Wgts)	46

Po provedení analýzy metodou ANOVA bylo dojitto k závěru, že v každém z modelů je alespoň jeden člen, který má vliv na hodnotu posuvové síly, neboť nulová hypotéza, která je testována tvrdí, že žádný z členů modelu nemá vliv na hodnotu posuvové síly, protože všechny dosažené hodnoty pravděpodobnosti ($\text{Prob}>F$), které jsou uvedeny v Tabulka 19, jsou menší než α , může být tedy nulová hypotéza zamítnuta.

Tabulka 19: ANOVA pro posouzení vlivu kontrolovaných faktorů na F_f

Analysis of Variance F_f 12050					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Model	13	3927713,8	302132	862,965	<,0001
Error	32	11203,5	350		
C. Total	45	3938917,3			
Analysis of Variance F_f 14220					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Model	16	6475432,5	404715	132,887	<,0001
Error	29	88320,8	3046		
C. Total	45	6563753,3			
Analysis of Variance F_f 19313					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Model	13	7615586,9	585814	143,48	<,0001
Error	32	130653,2	4083		
C. Total	45	7746240,2			
Analysis of Variance F_f 19573					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Model	14	3024983,7	216070	349,831	<,0001
Error	31	19146,9	618		
C. Total	45	3044130,6			

V dalším kroku je pak model testován tzv. testem chyby nedostatečného přizpůsobení modelu (test Lack-of-fit), kde je testován rozptyl reziduí a rozptyl měřených hodnot uvnitř skupin. Tento test zjišťuje, zda regresní model dostatečně vystihuje sledovanou závislost.

Test je tedy určen ke zjištění, zda variabilita reziduí je větší než variabilita hodnot uvnitř skupin měřených hodnot. Nulová statistická hypotéza testu vychází z předpokladu, že rozptyl reziduí je menší nebo roven rozptylu uvnitř skupiny měřených hodnot. Vzhledem k tomu, že hodnoty dosažené pravděpodobnosti (Prob>F) uvedené v Tabulka 20, jsou vyšší než α , může být konstatováno, že není nalezen dostatek důkazů na to, aby bylo možné nulovou statistickou hypotézu zamítnout. Z čehož plyne, že rozptyl reziduí je menší, anebo roven rozptylu uvnitř skupin měřených hodnot, tedy model je dostatečný.

Tabulka 20: Hodnoty testu Lack-of-fit pro posuvovou sílu F_f

Lack Of Fit F_f 12050						
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F	Max RSq
Lack Of Fit	31	11105,489	358,242	3,6555	0,3953	1
Pure Error	1	98	98			
Total Error	32	11203,489				
Lack Of Fit F_f 14220						
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F	Max RSq
Lack Of Fit	28	86916,338	3104,15	2,2101	0,4933	0,9998
Pure Error	1	1404,5	1404,5			
Total Error	29	88320,838				
Lack Of Fit F_f 19313						
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F	Max RSq
Lack Of Fit	31	130522	4210,39	32,0865	0,139	1
Pure Error	1	131,22	131,22			
Total Error	32	130653,22				
Lack Of Fit F_f 19573						
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F	Max RSq
Lack Of Fit	30	19125,77	637,526	30,1787	0,1432	1
Pure Error	1	21,125	21,125			
Total Error	31	19146,895				

Vzhledem k tomu, že jsou splněny dva základní předpoklady kladené na model, může být sestavena tabulka odhadu parametrů (členů) modelu. Upravená tabulka odhadu parametrů modelu, Tabulka 21, uvádí několik základních informací. Níže jsou uvedeny pouze ty členy, pro něž je nalezená hodnota pravděpodobnosti (Prob>t) nižší než α . Úplné tabulky odhadu parametrů jsou uvedeny v Příloze 7.

Tabulka 21: Upravená tabulka odhadu členů modelu pro F_f

Parameter Estimates F_f											
F_f 12050			F_f 14220			F_f 19313			F_f 19573		
Term	Estimate	Prob> t	Term	Estimate	Prob> t	Term	Estimate	Prob> t	Term	Estimate	Prob> t
Intercept	920,8523	<,0001	Intercept	1185,312	<,0001	Intercept	1606,003	<,0001	Intercept	1184,481	<,0001
x2	291,4938	<,0001	x2	329,1925	<,0001	x2	373,8817	<,0001	x2	240,358	<,0001
x1	79,14587	<,0001	x4	-103,969	<,0001	x1	245,2561	<,0001	x1	110,3202	<,0001
x3	59,16524	<,0001	x1	135,3741	<,0001	x4	-109,892	<,0001	x4	-58,4684	<,0001
x4	-56,0298	<,0001	x6	-59,1822	<,0001	x6	-75,8149	<,0001	x5	-36,5092	<,0001
x6	-51,3596	<,0001	x5	-56,4103	<,0001	x5	-52,1494	<,0001	x6	-33,417	<,0001
x5	-16,0699	<,0001	x2*x2	-60,6608	<,0001	x3	-32,2258	0,0038	x3	-31,3037	<,0001
x2*x1	24,40419	<,0001	x2*x1	39,5	0,0004	x2*x2	-147,521	<,0001	x2*x2	17,26397	0,0038
x3*x3	-10,3851	0,0178	x4*x1	-36,5	0,0008	x2*x1	50,93959	<,0001	x2*x1	24,79375	<,0001
x2*x4	-25,9802	<,0001	x4*x5	31,1875	0,0033	x2*x6	-29,1333	0,0147	x2*x4	-18,775	0,0002
x2*x6	-13,0312	0,0004	x1*x5	41,875	0,0002	x6*x5	-31,8563	0,0082	x2*x5	-12,1125	0,0097
x2*x5	-15,9209	<,0001	x6*x5	-25,875	0,0128	x2*x3	-23,3458	0,0469	x1*x5	13,69375	0,0039
x4*x5	9,429188	0,0076	x2*x3	-39,3125	0,0004	x2*x2*x1	-92,5665	0,0021	x2*x3	-27,4063	<,0001
x2*x4*x6	8,523938	0,0148	x2*x2*x4	-61,8438	0,0151	x2*x2*x2*x2	29,51617	0,0065	x6*x3	10,55625	0,0224
-----	-----	-----	x2*x4*x5	25,1875	0,0151	-----	-----	-----	x1*x4*x6	10,45	0,0237
-----	-----	-----	x4*x1*x5	-29,75	0,0049	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	-----	-----	x4*x6*x5	33,375	0,0019	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Na základě výše provedeného odhadu parametrů modelu může být pro každý z modelů sestavena statistická predikční závislost (21),(22), (23) a (24) pro testované materiály:

F_f 12050

$$\hat{y} = 920,85233 + 291,49378 \cdot x_2 + 79,14587 \cdot x_1 + 59,165235 \cdot x_3 - 56,2979 \cdot x_4 - 51,35963 \cdot x_6 - 16,06986 \cdot x_5 + 24,404188 \cdot x_2 \cdot x_1 - 10,38511 \cdot x_3 \cdot x_3 - 25,98019 \cdot x_2 \cdot x_4 - 13,03119 \cdot x_2 \cdot x_6 - 15,92088 \cdot x_2 \cdot x_5 + 9,4291875 \cdot x_4 \cdot x_5 + 8,5239375 \cdot x_2 \cdot x_4 \cdot x_6 \quad (21)$$

F_f 14220

$$\hat{y} = 1185,312 + 329,1925 \cdot x_2 - 103,9687 \cdot x_4 + 135,37406 \cdot x_1 - 59,18216 \cdot x_6 - 56,41032 \cdot x_5 - 60,66077 \cdot x_2^2 + 39,5 \cdot x_2 \cdot x_1 - 36,5 \cdot x_4 \cdot x_1 + 31,1875 \cdot x_4 \cdot x_5 + 41,875 \cdot x_1 \cdot x_5 - 25,875 \cdot x_6 \cdot x_5 - 39,3125 \cdot x_2 \cdot x_3 - 61,84375 \cdot x_2^2 \cdot x_4 + 25,1875 \cdot x_2 \cdot x_4 \cdot x_5 - 29,75 \cdot x_4 \cdot x_1 \cdot x_5 + 33,375 \cdot x_4 \cdot x_6 \cdot x_5 \quad (22)$$

F_f 19313

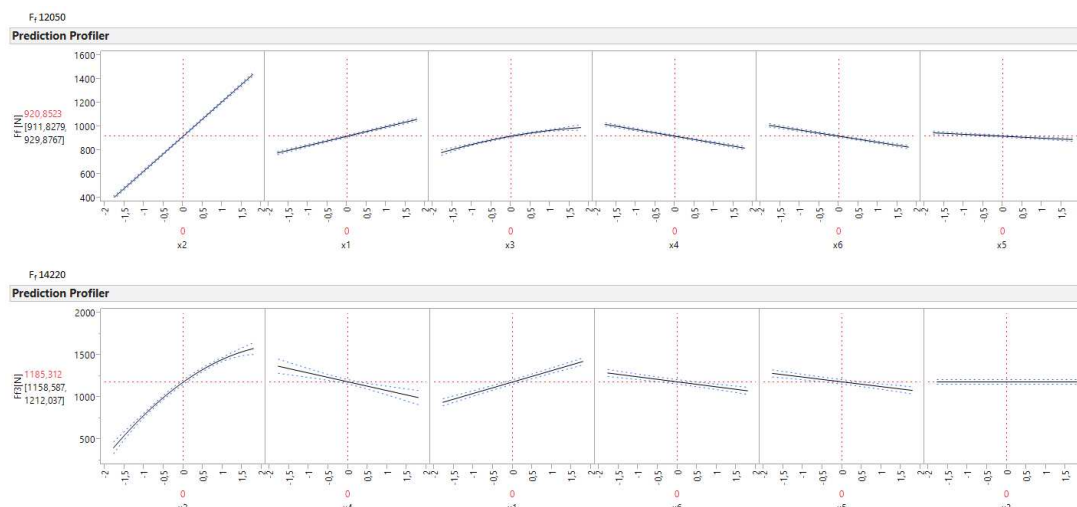
$$\hat{y} = 1606,0027 + 373,88172 \cdot x_2 + 245,25611 \cdot x_1 - 109,892 \cdot x_4 - 75,81492 \cdot x_6 - 52,14938 \cdot x_5 - 32,22579 \cdot x_3 - 147,5209 \cdot x_2^2 + 50,939594 \cdot x_2 \cdot x_1 - 29,13334 \cdot x_2 \cdot x_6 - 31,85628 \cdot x_6 \cdot x_5 - 23,34584 \cdot x_2 \cdot x_3 - 92,56645 \cdot x_2^2 \cdot x_1 + 29,516172 \cdot x_2^4 \quad (23)$$

F_f 19573

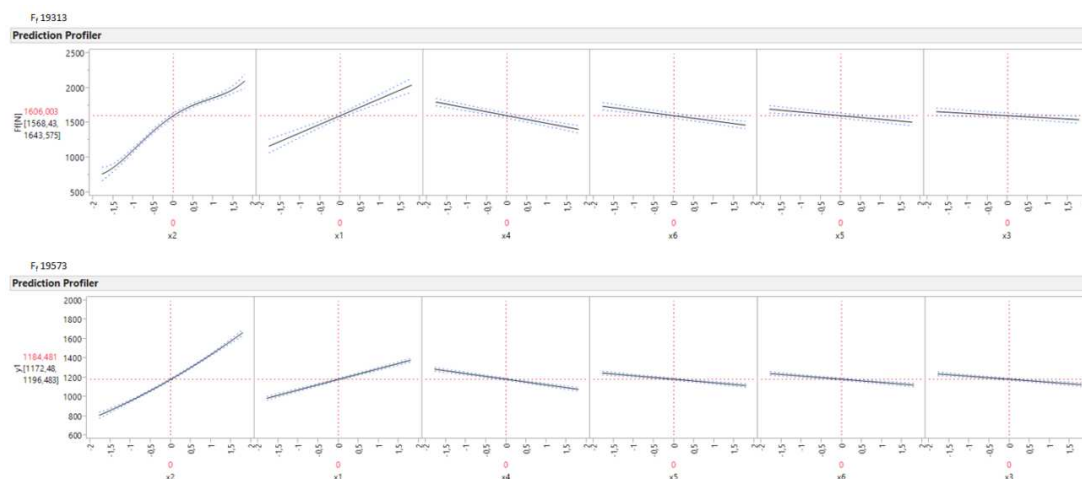
$$\hat{y} = 1184,4813 + 240,35804 \cdot x_2 + 110,32023 \cdot x_1 - 58,46843 \cdot x_4 - 36,50921 \cdot x_5 - 33,41699 \cdot x_6 - 31,30367 \cdot x_3 + 17,26397 \cdot x_2^2 + 24,79375 \cdot x_2 \cdot x_1 - 18,775 \cdot x_2 \cdot x_4 - 12,1125 \cdot x_2 \cdot x_5 + 13,69375 \cdot x_1 \cdot x_5 - 27,40625 \cdot x_2 \cdot x_3 + 10,55625 \cdot x_6 \cdot x_3 + 10,45 \cdot x_1 \cdot x_4 \cdot x_6 \quad (24)$$

Pro převedení predikčního vztahu do přirozeného měřítka musí být provedeno odkódování podle DoE normování (18), neboť v průběhu analýzy byly použity kontrolované faktory v kódovaném měřítku, kódovaném podle DoE normování, viz podkapitola 2.7. Odkódované modely jsou uvedeny v Příloze 10.

Na tomto místě musí být řečeno, že absolutní člen modelu vyjadřuje vliv všech konstantních faktorů. Vliv kontrolovaných faktorů jako hlavních efektů na změnu hodnoty F_f pro jednotlivé materiály uvádí Obrázek 3-11 a Obrázek 3-12.



Obrázek 3-11: Vliv kontrolovaných faktorů na změnu F_f 12050 a F_f 14220



Obrázek 3-12: Vliv kontrolovaných faktorů na změnu F_f 19313 a F_f 19573

Vliv jednotlivých členů modelu vyjádřený pomocí Paretova diagramu je uveden v Příloze 8.

Pro dosažení komplexnosti provedené analýzy a potvrzení vhodnosti a správnosti zvolených modelů musí být ještě provedeno ověření reziduí, tedy rozdíl mezi měřenou hodnotou a hodnotou predikovanou modelem. Tato analýza zjišťuje, jaké je jejich rozdělení a zda dochází k autokorelaci.

Pro analýzu autokorelace je použit Durbin-Watsonův test, při kterém nulová hypotéza hovoří o nulovosti korelačního koeficientu. Na základě hodnot pravděpodobnosti (Prob<DW), které byly dosaženy pro jednotlivé modely, viz Tabulka 22 je možno pro modely přijmout tvrzení, že nebyl nalezen dostatek důkazů na to, aby mohla být nulová statistická hypotéza zamítnuta, to znamená neexistenci autokorelace.

Tabulka 22: Hodnoty Durbin-Watsonova testu pro posuvovou sílu F_f

Durbin-Watson F_f 12050				Durbin-Watson F_f 14220			
Durbin-Watson	Number of Obs.	AutoCorrelation	Prob<DW	Durbin-Watson	Number of Obs.	AutoCorrelation	Prob<DW
1,8074041	46	0,075	0,257	1,6355522	46	0,1297	0,0761
Durbin-Watson F_f 19313				Durbin-Watson F_f 19573			
Durbin-Watson	Number of Obs.	AutoCorrelation	Prob<DW	Durbin-Watson	Number of Obs.	AutoCorrelation	Prob<DW
2,4180458	46	-0,2462	0,7784	1,9946367	46	-0,009	0,4806

Pro posouzení normality dat je použit Shapiro-Wilkův test, při kterém nulová hypotéza říká, že rezidua jsou v normálním rozdělení. Dosažené hodnoty, viz Tabulka 23, dovolují u všech modelů přijmout tvrzení, že nebyl nalezen dostatek důkazů na to, aby mohla být nulová statistická hypotéza zamítnuta. Z toho plyne, že rezidua mají normální rozdělení. Podrobnosti k Shapiro-Wilkovu testu jsou uvedeny v Příloze 9.

Tabulka 23: Vybrané hodnoty Shapiro-Wilkova testu reziduí posuvové síly F_f

Shapiro-Wilk F_f				
Material	12050	14220	19313	19573
Shapiro-Wilks p	0,447	0,930	0,497	0,454

Na závěr zpracování tedy mohou být predikční modely posuvové síly pro jednotlivé materiály hodnoceny jako statisticky a numericky korektní.

Krouticí moment

Pro krouticí moment, podobně jako pro posuvovou sílu, existuje relevantní model u všech sledovaných materiálů. Tabulka 24 uvádí jejich základní parametry. Vzhledem k vysokým hodnotám upraveného indexu determinace (M_c 12050 = 98,4 %, M_c 14220 = 98,5 %, M_c 19313 = 96 %, M_c 19573 = 98,6 %) může být řečeno, že se jedná o adekvátní model.

Tabulka 24: Analýza vhodnosti modelů M_c pro zvolené materiály

Summary of Fit M_c 12050	
RSquare	0,987155
RSquare Adj	0,983943
Root Mean Square Error	0,209495
Mean of Response	5,623478
Observations (or Sum Wgts)	46
Summary of Fit M_c 14220	
RSquare	0,987417
RSquare Adj	0,984696
Root Mean Square Error	0,196076
Mean of Response	5,376327
Observations (or Sum Wgts)	46
Summary of Fit M_c 19313	
RSquare	0,975017
RSquare Adj	0,969615
Root Mean Square Error	0,369626
Mean of Response	7,089813
Observations (or Sum Wgts)	46
Summary of Fit M_c 19573	
RSquare	0,988815
RSquare Adj	0,985619
Root Mean Square Error	0,181796
Mean of Response	5,785907
Observations (or Sum Wgts)	46

Po provedení analýzy metodou ANOVA bylo dojito k poznání, že v každém z modelů je alespoň jeden člen, který má vliv na hodnotu posuvové síly, neboť nulová hypotéza, která je testována tvrdí, že žádný z členů modelu nemá vliv na hodnotu posuvové síly, protože všechny dosažené hodnoty pravděpodobnosti ($\text{Prob}>F$), které jsou uvedeny v Tabulka 25, jsou menší než α , může být tedy nulová hypotéza zamítnuta.

V dalším kroku je pak model testován tzv. testem chyby nedostatečného přizpůsobení modelu (test Lack-of-fit), kde je testován rozptyl reziduí a rozptyl měřených hodnot uvnitř skupin. Tento test zjišťuje, zda regresní model dostatečně vystihuje sledovanou závislost.

Test je tedy určen ke zjištění, zda variabilita reziduí je větší než variabilita hodnot uvnitř skupin měřených hodnot. Nulová statistická hypotéza testu vychází z předpokladu, že rozptyl reziduí je menší nebo roven rozptylu uvnitř skupiny měřených hodnot. Vzhledem

k tomu, že hodnoty dosažené pravděpodobnosti ($Prob > F$) uvedené v Tabulka 26, jsou vyšší α , proto může být konstatováno, že není nalezen dostatek důkazů na to, aby bylo možné nulovou statistickou hypotézu zamítnout. Z čehož plyne, že rozptyl reziduí je menší, anebo roven rozptylu uvnitř skupin měřených hodnot, tedy model je dostatečný.

Tabulka 25: ANOVA pro posouzení vlivu kontrolovaných faktorů na M_c

Analysis of Variance M_c 12050					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Model	9	121,41919	13,491	307,396	<,0001
Error	36	1,57997	0,0439		
C. Total	45	122,99916			
Analysis of Variance M_c 14220					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Model	8	111,62349	13,9529	362,924	<,0001
Error	37	1,4225	0,0384		
C. Total	45	113,04598			
Analysis of Variance M_c 19313					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Model	8	197,28484	24,6606	180,501	<,0001
Error	37	5,05507	0,1366		
C. Total	45	202,33991			
Analysis of Variance M_c 19573					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Model	10	102,26277	10,2263	309,421	<,0001
Error	35	1,15674	0,033		
C. Total	45	103,41952			

Tabulka 26: Hodnoty testu Lack-of-fit pro krouticí moment M_c

Lack Of Fit M_c 12050						
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F	Max RSq
Lack Of Fit	33	1,5408185	0,046691	3,5774	0,1602	0,9997
Pure Error	3	0,039155	0,013052			
Total Error	36	1,5799735				
Lack Of Fit M_c 14220						
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F	Max RSq
Lack Of Fit	34	1,2791788	0,037623	0,7875	0,6997	0,9987
Pure Error	3	0,1433185	0,047773			
Total Error	37	1,4224973				
Lack Of Fit M_c 19313						
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F	Max RSq
Lack Of Fit	36	5,0363842	0,1399	7,4883	0,2831	0,9999
Pure Error	1	0,0186824	0,018682			
Total Error	37	5,0550667				
Lack Of Fit M_c 19573						
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F	Max RSq
Lack Of Fit	34	1,1557953	0,033994	35,9297	0,1315	1
Pure Error	1	0,0009461	0,000946			
Total Error	35	1,1567414				

Vzhledem k tomu, že byly splněny dva základní předpoklady kladené na model, může být sestavena tabulka odhadu parametrů (členů) modelu. Upravená tabulka odhadu parametrů modelu, Tabulka 27, uvádí několik základních informací. Níže jsou uvedeny pouze ty členy, pro něž je nalezená hodnota pravděpodobnosti (Prob>t) nižší než α . Úplné tabulky odhadu parametrů jsou uvedeny v Příloze 7.

Tabulka 27: Upravená tabulka odhadu členů modelu pro M_c

Parameter Estimates M_c											
M_c 12050			M_c 14220			M_c 19313			M_c 19573		
Term	Estimate	Prob> t	Term	Estimate	Prob> t	Term	Estimate	Prob> t	Term	Estimate	Prob> t
Intercept	5,7907067	<,0001	Intercept	5,376327	<,0001	Intercept	7,089813	<,0001	Intercept	5,7859065	<,0001
x2	1,2009613	<,0001	x2	1,2652853	<,0001	x2	1,6193774	<,0001	x1	1,1879387	<,0001
x1	1,0524507	<,0001	x1	1,0643813	<,0001	x1	1,4681161	<,0001	x2	1,0453922	<,0001
x6	-0,176571	<,0001	x4	-0,292001	<,0001	x6	-0,32239	<,0001	x6	-0,158077	<,0001
x4	-0,113194	0,0019	x6	-0,069672	0,0341	x4	-0,255986	0,0001	x3	-0,119199	0,0003
x3	0,0960695	0,0074	x2*x1	0,2803647	<,0001	x5	-0,189505	0,003	x4	-0,1075	0,0008
x2*x1	0,3584688	<,0001	x2*x4	-0,090597	0,0129	x2*x1	0,3871937	<,0001	x1*x2	0,3165437	<,0001
x6*x6	-0,098365	0,0415	x1*x4	-0,086275	0,0174	x6*x4	0,1499063	0,0276	x2*x3	-0,066556	0,0458
x4*x4	-0,102135	0,0347	x2*x3	-0,09029	0,0132	x4*x3	0,1349125	0,046	x1*x5	0,0803438	0,0173
x2*x2*x2	0,12382	0,0052	-----	-----	-----	-----	-----	-----	x1*x6*x4	0,1240562	0,0005
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	x2*x6*x4	-0,078375	0,02

Na základě výše provedeného odhadu parametrů modelu může být pro každý z modelů sestavena statistická predikční závislost (25), (26), (27) a (28) pro testované materiály:

M_c 12050

$$\hat{y} = 5,7907067 + 1,2009613 \cdot x_2 + 1,0524507 \cdot x_1 - 0,176571 \cdot x_6 - 0,113194 \cdot x_4 + 0,0960695 \cdot x_3 + 0,3584688 \cdot x_2 \cdot x_1 - 0,098365 \cdot x_6^2 - 0,102135 \cdot x_4^2 + 0,12382 \cdot x_2^3 \quad (25)$$

M_c 14220

$$\hat{y} = 5,376327 + 1,2652853 \cdot x_2 + 1,0643813 \cdot x_1 - 0,292001 \cdot x_4 - 0,069672 \cdot x_6 + 0,2803647 \cdot x_2 \cdot x_1 - 0,090597 \cdot x_2 \cdot x_4 - 0,086275 \cdot x_1 \cdot x_4 - 0,09029 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (26)$$

M_c 19313

$$\hat{y} = 7,089813 + 1,6193774 \cdot x_2 + 1,4681161 \cdot x_1 - 0,32239 \cdot x_6 - 0,255986 \cdot x_4 - 0,189505 \cdot x_5 + 0,3871937 \cdot x_2 \cdot x_1 + 0,1499063 \cdot x_6 \cdot x_4 + 0,1349125 \cdot x_4 \cdot x_3 \quad (27)$$

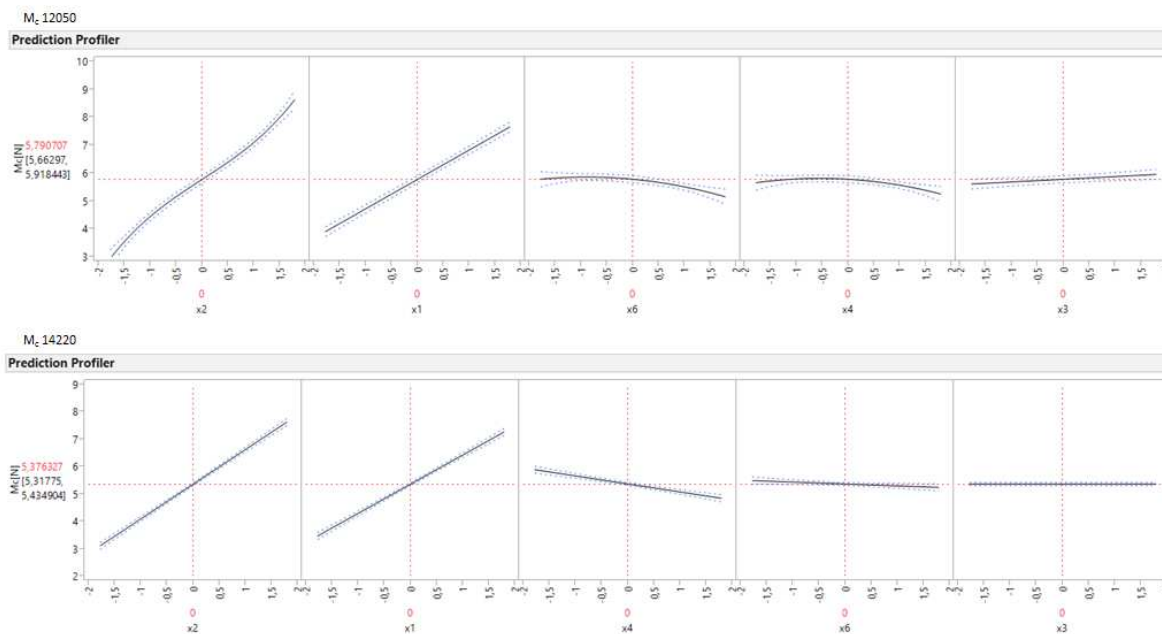
M_c 19573

$$\hat{y} = 5,7859065 + 1,1879387 \cdot x_1 + 1,0453922 \cdot x_2 - 0,158077 \cdot x_6 - 0,119199 \cdot x_3 - 0,1075 \cdot x_4 + 0,3165437 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,066556 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,0803438 \cdot x_1 \cdot x_5 + 0,1240562 \cdot x_1 \cdot x_6 \cdot x_4 - 0,078375 \cdot x_2 \cdot x_6 \cdot x_4 \quad (28)$$

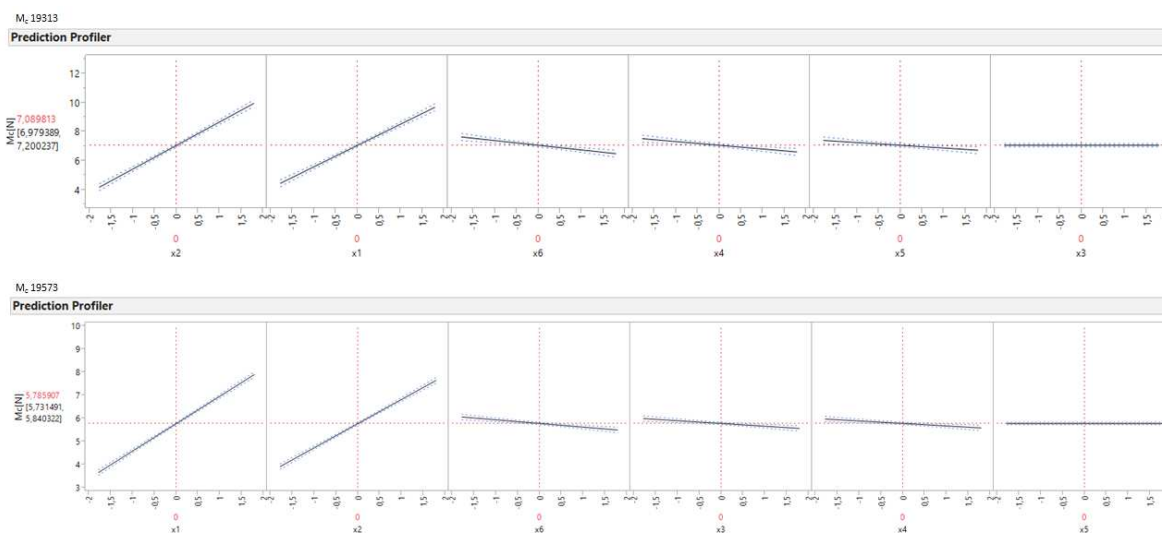
Pro převedení predikčního vztahu do přirozeného měřítka musí být provedeno odkódování podle DoE normování (18), neboť v průběhu analýzy byly použity kontrolované

faktory v kódovaném měřítku kódovaném podle DoE normování, viz podkapitola 2.7. Odkódované modely jsou uvedeny v Příloze 10.

Na tomto místě musí být řečeno, že absolutní člen modelu vyjadřuje vliv všech konstantních faktorů. Vliv kontrolovaných faktorů jako hlavních efektů na změnu hodnoty F_f pro jednotlivé materiály uvádí Obrázek 3-13 a Obrázek 3-14.



Obrázek 3-13: Vliv kontrolovaných faktorů na změnu $M_c 12050$ a $M_c 14220$



Obrázek 3-14: Vliv kontrolovaných faktorů na změnu $M_c 19313$ a $M_c 19573$

Vliv jednotlivých členů modelu vyjádřený pomocí Paretova diagramu je uveden v Příloze 8.

Pro dosažení komplexnosti provedené analýzy a potvrzení vhodnosti a správnosti zvolených modelů musí být ještě provedeno ověření reziduí, tedy rozdíl mezi měřenou hodnotou a hodnotou predikovanou modelem. Tato analýza zjišťuje, jaké je jejich rozdělení a zda dochází k autokorelaci.

Pro analýzu autokorelace je použit Durbin-Watsonův test, při kterém nulová hypotéza hovoří o nulovosti korelačního koeficientu. Na základě hodnot pravděpodobnosti (Prob<DW), které byly dosaženy pro jednotlivé modely, viz Tabulka 22. Je možno pro modely přijmout tvrzení, že nebyl nalezen dostatek důkazů na to, aby mohla být nulová statistická hypotéza zamítnuta, to znamená neexistenci autokorelace.

Tabulka 28: Hodnoty Durbin-Watsonova testu pro krouticí moment M_c

Durbin-Watson M_c 12050				Durbin-Watson M_c 14220			
Durbin-Watson	Number of Obs.	AutoCorrelation	Prob<DW	Durbin-Watson	Number of Obs.	AutoCorrelation	Prob<DW
1,8004433	46	0,0811	0,1186	2,1777132	46	-0,09	0,5331
Durbin-Watson M_c 19313				Durbin-Watson M_c 19573			
Durbin-Watson	Number of Obs.	AutoCorrelation	Prob<DW	Durbin-Watson	Number of Obs.	AutoCorrelation	Prob<DW
1,9940915	46	-0,0106	0,4433	2,0169059	46	-0,0207	0,4739

Pro posouzení normality dat je použit Shapiro-Wilkův test, při kterém nulová hypotéza říká, že rezidua jsou v normálním rozdělení. Dosažené hodnoty, viz Tabulka 23, dovolují u všech modelů přijmout tvrzení, že nebyl nalezen dostatek důkazů na to, aby mohla být nulová statistická hypotéza zamítnuta. Z toho plyne, že rezidua mají normální rozdělení. Podrobnosti k Shapiro-Wilkově testu jsou uvedeny v Příloze 9.

Tabulka 29: Vybrané hodnoty Shapiro-Wilkova testu reziduí M_c

Shapiro-Wilk M_c				
Material	12050	14220	19313	19573
Shapiro-Wilks p	0,723	0,562	0,791	0,0536

Na závěr zpracování tedy mohou být predikční modely krouticího momentu pro jednotlivé materiály hodnoceny jako statisticky a numericky korektní.

3.6.3 Zhodnocení nalezených modelů pro F_f a M_c

Po provedení statistického vyhodnocení a nalezení predikčních modelů je provedeno porovnání těchto modelů pro materiály. Následující část je opět rozdělena na zhodnocení posuvové síly a krouticího momentu.

Pro všechny níže uvedené testy je hladina významnosti $\alpha = 5 \%$.

Posuvová síla

Tabulka 30 uvádí porovnání modelů pro výpočet posuvové síly z pohledu vlivu jednotlivých členů modelu. Podíl je uveden na základě hodnot uvedených v Tabulka 21 bez započtení absolutního členu. Z Tabulka 30 je patrné, že nejvýznamnějším členem ve všech modelech je otáčkový posuv s vlivem od 44,867 % do 34,087 %. Jako druhý pak je průměr vrtáku s vlivem od 17,499% do 10,146%.

Pro porovnání podobnosti jednotlivých modelů je použita shluková analýza. Pro její provedení je nezbytné určit nejvhodnější metodu shlukování na základě tří ukazatelů. Těmito ukazateli jsou koeficient kofenetické korelace (jeho maximální hodnota), delta (0,5) a delta (1,0), kde kritérium delta měří stupeň přetvoření struktury dat a hodnota delta by měla být co nejnižší. Na základě Tabulka 31 je pak dojit k závěru, že shluková analýza bude provedena metodou skupinového průměru.

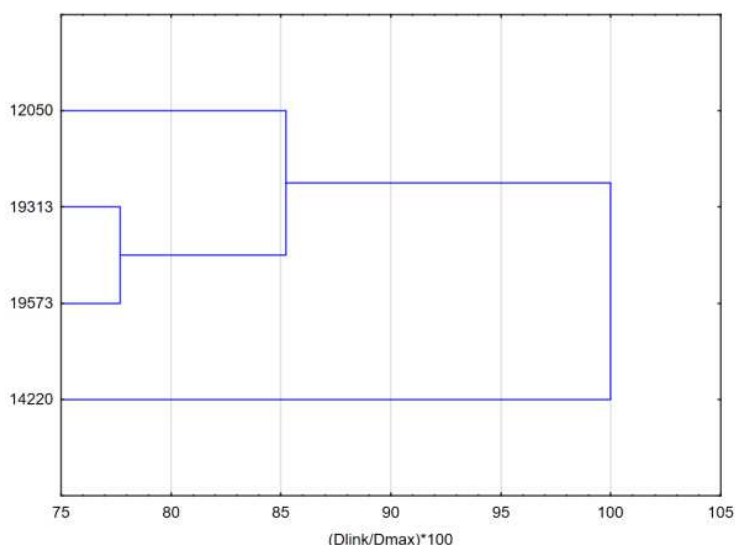
Tabulka 30: Procentuální vliv jednotlivých členů modelu na velikost F_f

Posuvová síla F_f				
Term	12050	14220	19313	19573
x2	44,867%	34,087%	38,051%	38,123%
x1	12,183%	14,013%	10,164%	17,499%
x3	9,109%	-----	3,276%	4,963%
x4	8,625%	4,382%	11,182%	9,271%
x6	7,905%	6,125%	7,717%	5,301%
x5	2,474%	5,839%	5,313%	5,791%
x2*x1	3,432%	3,736%	4,735%	3,589%
x3*x3	1,162%	-----	-----	-----
x2*x4	3,650%	-----	-----	2,717%
x2*x6	1,832%	-----	2,709%	-----
x2*x5	2,237%	-----	-----	1,756%
x4*x5	1,325%	2,952%	-----	-----
x2*x4*x6	1,200%	-----	-----	-----
x2*x2	-----	4,566%	5,155%	1,992%
x4*x1	-----	3,450%	-----	-----
x1*x5	-----	3,958%	-----	1,985%
x6*x5	-----	2,445%	2,961%	-----
x2*x3	-----	3,718%	2,173%	3,971%
x2*x2*x4	-----	2,380%	-----	-----
x2*x4*x5	-----	2,380%	-----	-----
x4*x1*x5	-----	2,814%	-----	-----
x4*x6*x5	-----	3,155%	-----	-----
x2*x2*x1	-----	-----	3,507%	-----
x2*x2*x2*x2	-----	-----	3,055%	-----
x6*x3	-----	-----	-----	1,527%
x1*x4*x6	-----	-----	-----	1,514%

Z metody skupinového průměru v dendrogramu na Obrázek 3-15 je patrné, že největší míru podobnosti vykazují modely pro materiál 19313 a 19573. Do určité míry je těmto dvěma podobný model pro materiál 12050. Dále je pak z dendrogramu zřejmé, že model pro materiál 14220 je od ostatních diametrálně odlišný.

Tabulka 31: Výběr metody shlukování pro F_f

Metoda shlukování		Cophenetic Correlation	Delta(0.5)	Delta(1.0)
Single Linkage (Nearest Neighbor)	Nejbližší soused	0,690653	0,055645	0,101733
Complete Linkage (Furthest Neighbor)	Nejvzdálenější soused	0,71692	0,065592	0,106782
Simple Average (Weighted Pair-Group)	Párový průměr	0,72087	0,047168	0,068592
Group Average (Unweighted Pair-Group)	Skupinový průměr	0,721015	0,048419	0,067995
Median (Weighted Pair-Group Centroid)	Medián	0,670435	0,290977	0,361139
Centroid (Unweighted Pair-Group Centroid)	Těžiště	0,670435	0,284792	0,354288
Ward's Minimum Variance	Waradova	0,697776	0,120992	0,16168
Flexible Strategy	Flexibilní	0,312088	0,431673	0,505349



Obrázek 3-15: Dendrogram pro modely F_f

Poslední bude posouzen vliv materiálu jako nezávisle proměnné. Nejprve musí být ověřeno, zda jsou naměřená data pro jednotlivé bloky (materiály) v normálním rozdělení. Pro ověření normality je použit Shapiro-Wilkův test, jehož základní hodnoty jsou uvedeny v Tabulka 32. Podrobnosti tohoto testu jsou uvedeny v Příloze 11.

Tabulka 32: Vybrané hodnoty Shapiro-Wilkova testu pro bloky F_f

Shapiro-Wilk F_f -bloky				
Materiál	12050	14220	19313	19573
Shapiro-Wilks p	0,164	0,369	0,541	0,220

Na základě provedeného testu může být tvrzeno, že sledovaná data mají normální rozdělení, proto je možné porovnat vliv materiálu za pomoci analýzy rozptylů (ANOVA), viz Tabulka 33, z které vyplývá, materiál má vliv na variabilitu hodnot posuvové síly.

Tabulka 33: ANOVA pro analýzu vlivu materiálu na F_f

Analysis of Variance F_f -bloky					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Effect	3	8607420	2869140	24,2543	<,0001
Error	180	21292913	118294		
C. Total	183	29900333			

Pro úplnost provedené analýzy byl proveden Levenův test homogenity rozptylu mezi jednotlivými bloky. Tabulka 34 uvádí hodnotu pravděpodobnosti $p = 0,02232$, z níž vyplývá, že rozptyl hodnot homogenní.

Tabulka 34: Levenův test homogenity rozptylů bloků pro posuvovou sílu F_f

Levene Test of Homogeneity of Variances F_f -bloky					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	p
Effect	3	402993,7	134331,2	3,27659	0,02232
Error	180	7379503	40997,24		
C. Total	183	7782496,7			

Pro porovnání rozdílů jednotlivých bloků (materiálů) nezávisle proměnné je využit Scheffeho test. Ten na hladině významnosti potvrdil, že signifikantní rozdíl je mezi naměřenými hodnotami posuvové síly pro materiály 12050 a 14220, 12050 a 19313, 12050 a 19573, 14220 a 19313, 19313 a 19573. Naopak signifikantní rozdíl se neprojevil mezi hodnotami pro 14220 a 19573, z čehož plyne, že rozdíl může být přisouzen pouze náhodným vlivům. Stejný výsledek potvrdil i Fisherův přesný test rozdílu středních hodnot. Podklady z dvou výše uvedených testů jsou uvedeny v Příloze 12.

Na základě výše provedeného zhodnocení nalezených modelů posuvové síly může být konstatováno, že není možné provést sloučení modelů do jednoho univerzálního modelu, neboť by došlo k značnému nepřesnění výpočtu posuvové síly. Jako hlavní argument se ukazuje výsledek, viz Tabulka 33, kde je jednoznačně prokázán statisticky významný vliv materiálu na velikost posuvové síly a dendrogramu, viz Obrázek 3-15, z kterého sice plyne značná míra podobnosti mezi modely 19313 a 19573, avšak model 12050 již je podobný pouze částečně a model 14220 je dokonce diametrálně odlišný.

Krouticí moment

Obdobně jako u posuvové síly, je i pro krouticí moment sestavena Tabulka 35, v které je provedeno porovnání modelů pro výpočet krouticího momentu z pohledu vlivu jednotlivých členů, a to opět bez uvažování absolutního členu. Z Tabulka 35 je patrné, že nejvýznamnějšími členy ve všech modelech je posuv s vlivem od 39,653 % do 23,41 % a průměr vrtáku s vlivem od 40,072% do 32,848%. Interakce faktorů dosahují max. 5 %, s výjimkou interakcí posuvu a průměru nástroje, kde je vliv od 12,465 % do 7,918 %. U modelů 12050 a 14220 můžeme konstatovat, že úhel hřbetu ve zvoleném intervalu nemá vliv na velikost krouticího momentu.

Tabulka 35: Procentuální vliv jednotlivých členů modelu na velikost M_c

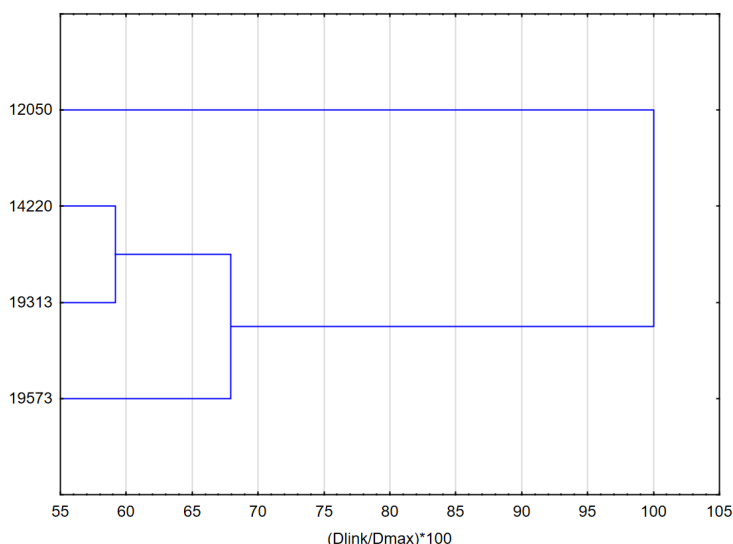
Krouticí moment M_c				
Term	12050	14220	19313	19573
x2	23,410%	39,653%	36,240%	32,402%
x1	40,072%	33,353%	32,848%	36,823%
x6	6,722%	2,183%	7,211%	4,903%
x4	4,314%	9,147%	5,728%	3,329%
x3	3,657%	-----	-----	3,693%
x5	-----	-----	4,246%	-----
x2*x1	12,465%	8,026%	7,918%	8,960%
x6*x6	2,717%	-----	-----	-----
x4*x4	2,820%	-----	-----	-----
x2*x2*x2	3,824%	-----	-----	-----
x2*x4	-----	2,589%	-----	-----
x1*x4	-----	2,470%	-----	-----
x2*x3	-----	2,579%	-----	1,883%
x6*x4	-----	-----	3,058%	-----
x4*x3	-----	-----	2,751%	-----
x1*x5	-----	-----	-----	2,274%
x1*x6*x4	-----	-----	-----	3,511%
x2*x6*x4	-----	-----	-----	2,220%

Pro porovnání podobnosti jednotlivých modelů je opět použita shluková analýza. Metoda shlukování je opět zvolena na základě koeficientu kofenetické korelace a dvou hodnot delta. Na základě Tabulka 36, je opět volena metoda skupinového průměru.

Tabulka 36: Výběr metody shlukování pro M_c

Metoda shlukování		Cophenetic Correlation	Delta(0.5)	Delta(1.0)
Single Linkage (Nearest Neighbor)	Nejbližší soused	0,435751	0,056958	0,10107
Complete Linkage (Furthest Neighbor)	Nejvzdálenější soused	0,539193	0,07881	0,115137
Simple Average (Weighted Pair-Group)	Párový průměr	0,540695	0,050848	0,069131
Group Average (Unweighted Pair-Group)	Skupinový průměr	0,540795	0,050748	0,068131
Median (Weighted Pair-Group Centroid)	Medián	0,652134	0,361875	0,412584
Centroid (Unweighted Pair-Group Centroid)	Těžiště	0,652134	0,327126	0,374015
Ward's Minimum Variance	Waradova	0,527975	0,136719	0,185979
Flexible Strategy	Flexibilní	0,53688	0,415422	0,486173

Z metody skupinového průměru v dendrogramu na Obrázek 3-16 je patrné, že největší míru podobnosti vykazují modely pro materiál 19313 a 14220. Do určité míry je těmto dvěma podobný model pro materiál 19573, dále je pak z dendrogramu zřejmé, model pro materiál 12050 je od ostatních diametrálně odlišný.



Obrázek 3-16: Dendrogram pro modely M_c

Poslední bude posouzen vliv materiálu jako nezávisle proměnné. Nejprve musí být ověřeno, zda jsou naměřená data pro jednotlivé bloky (materiály) v normálním rozdělení. Pro ověření normality je použit Shapiro-Wilkův test, jehož základní hodnoty jsou uvedeny v Tabulka 32. Podrobnosti tohoto testu jsou uvedeny v Příloze 11.

Tabulka 37: Vybrané hodnoty Shapiro-Wilkova testu pro bloky M_c

Shapiro-Wilk M_c - Bloky				
Materiál	12050	14220	19313	19573
Shapiro-Wilks p	0,00148	0,00566	0,0159	0,00281

Na základě provedeního testu může být tvrzeno, že sledovaná data nemají normální rozdělení, nemůže být použita parametrická analýza rozptylů (ANOVA), proto bude použita Kruskal-Wallisova analýza rozptylu, která je neparametrická. Po jejím provedení dostáváme

níže uvedenou Tabulka 38, ze které vyplývá, že existuje signifikantní vztah mezi závisle proměnnou, která je reprezentována hodnotami krouticího momentu a druhem materiálu, což potvrzuje dosažená hodnota $p = 0,0001$, viz Tabulka 38.

Tabulka 38: Kruskal-Wallisova analýza vlivu materiálu na krouticí moment M_c

Kruskal-Wallis ANOVA by Ranks; Mc [N.m] (Kruskal-Wallis test: H (3, N= 184) =21,10950 p =,0001				
Depend.:Mc [N.m]	Code	Valid N	Sum of Ranks	Mean Rank
12 050	101	46	3820	83,0435
14 220	102	46	3402	73,9565
19 313	103	46	5609	121,9348
19 573	104	46	4189	91,0652

Pro porovnání rozdílů jednotlivých bloků (materiálů) nezávisle proměnné je využita vícenásobná Kruskal-Wallisova analýza rozptylu, jejíž podrobnosti jsou uvedeny v Příloze 12. Ta potvrdila, že signifikantní rozdíl je mezi naměřenými hodnotami krouticího momentu pro materiály 12050 a 9313, 14220 a 19313, 19313 a 19573. Naopak se signifikantní rozdíl neprojevil mezi hodnotami pro 14220 a 19573, 12050 a 19573, 14220 a 12050.

Na základě výše provedeného zhodnocení nalezených modelů krouticího momentu může být konstatováno, že není možné provést sloučení modelů do jednoho univerzálního modelu, neboť by došlo k značnému nepřesnění výpočtu krouticího momentu. Jako hlavní argument se ukazuje výsledek, viz Tabulka 38, kde je jednoznačně prokázán statisticky významný vliv materiálu na velikost posuvové síly a dendrogramu, viz Obrázek 3-16, z kterého sice plyne značná míra podobnosti mezi modely 19313 a 14220, avšak model 19573 již je podobný pouze částečně a model 12050 je dokonce diametrálně odlišný.

Po celkovém zhodnocení získaných modelů posuvové síly a krouticího momentu bylo dojit k závěru, že materiál má významný vliv na jejich velikost. Tento poznatek se plně shoduje s poznatky teorie obrábění. Při samotném porovnání vlivu jednotlivých kontrolovaných faktorů s poznatky teorie obrábění nesmí být opomenut fakt, že výše uvedené platí pro přesně ohraničené intervaly jednotlivých kontrolovaných faktorů a nemůže být korektním způsobem provedena například extrapolace mimo tento interval.

Rovněž nesmí být opomenut fakt, že testovaný materiál měl konkrétní mechanické a chemické vlastnosti. Pokud však bude materiál jinak zpracován nebo bude mít jiné chemické složení (odpovídají však daným normám), bude nutné do modelu zanést opravný koeficient. To je umožněno především vhodným rozdělením celého experimentu do bloků, neboť jak již bylo uvedeno v podkapitole 3.6.2, je absolutní člen modelu složen z vlivu konstantních faktorů. Pokud byl tedy materiál uvažován v rámci jednoho bloku jako konstantní, je možné jeho vliv přisoudit absolutnímu členu. Proto by mohl být absolutní člen korigován podle změny materiálu, avšak pouze za předpokladu, že materiál bude typově shodný s výše testovaným materiálem, aby mohla být zachována platnost modelu jako celku. Jako vhodný ukazatel se jeví jednotkový měrný rezný odpor k_{c1} . Proto se jeho experimentálním zjišťováním zabývá následující část práce.

3.7 Experimentální zjišťování jednotkového měrného řezného odporu

Experimentální zjišťování jednotkového měrného řezného odporu (dále jen řezného odporu) bylo realizováno na soustruhu EMCO při operaci podélného soustružení. Aby bylo dosaženo co možná nejvyšší vypovídací hodnoty provedených experimentů, byly jako materiály použity upínací části vzorků z tahových zkoušek, na kterých byla ještě následně měřena tvrdost HV10 (dosažené hodnoty jsou uvedeny v Příloze 1). Tato volba vstupního polotovaru zajišťuje, že bude možné přesněji porovnat naměřené hodnoty s mechanickými vlastnostmi materiálu.

3.7.1 Návrh a realizace experimentu

Po naměření dat na soustruhu EMCO, bylo provedeno jejich vyhodnocení pomocí aplikace Dynoware od společnosti KISTLER. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Příloze 13.

Celý experiment byl rozdělen opět na základě obráběného materiálu. Pro vlastní obrábění byl použit soustružnický nůž s vyměnitelnými břitovými destičkami, viz Obrázek 3-17, který zaručoval úhel nastavení hlavního ostří $\kappa_r = 90^\circ$ a úhel čela $\gamma_o = 0^\circ$, viz definice v podkapitole 2.4.2, kdy hloubka řezu byla nastavena na 1mm a posuv na otáčku rovněž 1mm.



Obrázek 3-17: Soustružnický nůž použitý pro měření měrného řezného odporu

Na tomto místě je nutné uvést, že plocha řezu nebyla 1 mm^2 , ale pouze $0,961334 \text{ mm}^2$, tato nepřesnost je způsobena zaoblením špičky, které bylo 1,2 mm. Proto je pro určení řezného odporu naměřená síla dělena reálně odřezávanou plochou.

3.7.2 Vyhodnocení získaných hodnot k_{c1} v závislosti na řezné rychlosti

Při analýze řezného odporu je vyjito ze dvou základních hypotéz, a to:

- H1 : Měrný řezný odpor je ve sledovaném rozsahu nezávislý na řezné rychlosti
- H2 : Měrný řezný odpor zjištěný experimentálně dosahuje tabulkových hodnot

Pro všechny níže uvedené testy je hladina významnosti $\alpha = 5 \%$.

Pro potřeby hypotéz jsou jednotlivá měření považována za nezávislá, ale základní deskriptivní statistika je provedena pro opakované měření pro každý materiál a řeznou rychlost.

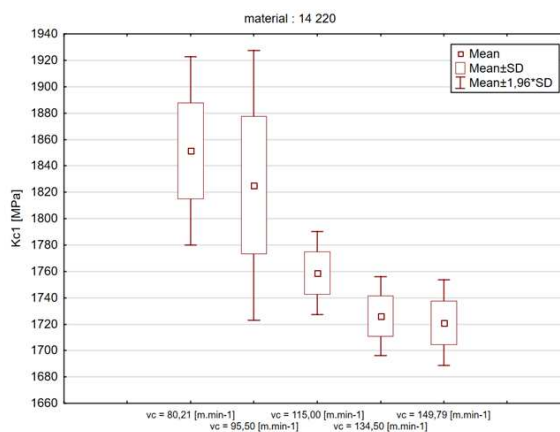
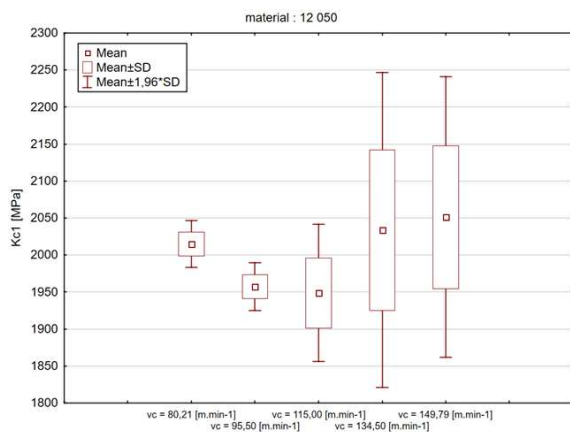
Deskriptivní statistika

Pro sestavení tabulky deskriptivní statistiky je potřeba nejprve provést odstranění odlehlých hodnot. Za tímto účelem je použit Grubbsův test.

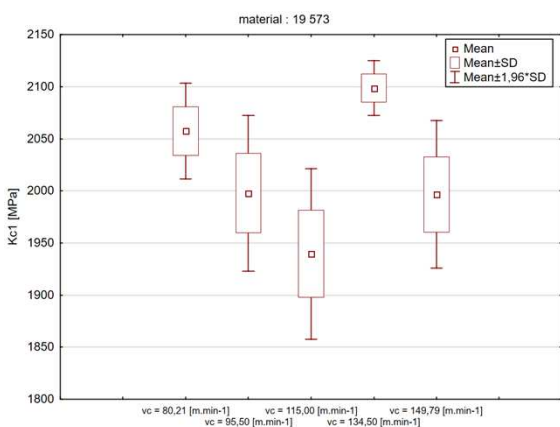
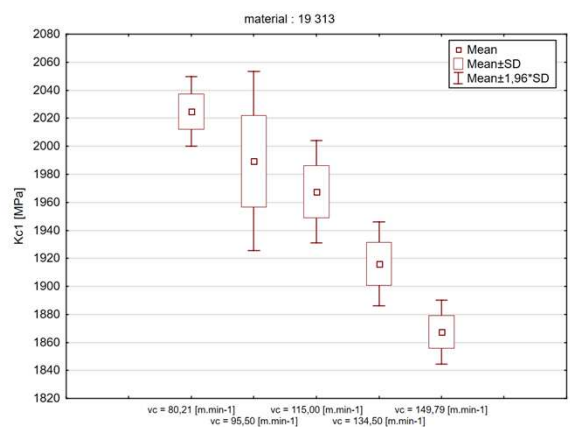
Následně je provedena deskriptivní statistika, jejíž výsledky uvádí Tabulka 39.

Tabulka 39: Hodnoty deskriptivní statistiky pro zvolené materiály a rychlosti

Material	Variable	Mean	Median	Minimum	Maximum	Lower Quartile	Upper Quartile	Variance	Std.Dev.	Skewness	Kurtosis
12050	vc = 80,21	2014,908	2009,707	1997,225	2034,673	2004,51	2028,43	255,37	15,9802	0,34685	-2,3212
	vc = 95,50	1957,488	1952,495	1937,932	1979,541	1949,38	1968,1	268,03	16,3715	0,35907	-1,0329
	vc = 115,00	1948,854	1938,972	1905,685	2032,592	1908,81	1968,1	2244,08	47,3718	1,24872	1,46293
	vc = 134,50	2033,806	2063,279	1896,323	2170,942	1910,89	2098,13	11769,53	108,4875	-0,36317	-1,4055
	vc = 149,79	2051,49	2060,158	1879,68	2176,143	2046,12	2086,68	9326,24	96,5725	-1,02787	2,71879
14220	vc = 80,21	1851,42	1848,993	1811,025	1896,323	1817,27	1885,92	1321,159	36,34776	0,134486	-2,3599
	vc = 95,50	1825,241	1812,585	1774,617	1923,369	1798,54	1829,75	2716,692	52,1219	1,651066	3,25617
	vc = 115,00	1758,667	1756,934	1740,29	1777,738	1743,41	1776,7	256,953	16,02976	0,21328	-1,9376
	vc = 134,50	1726,143	1727,807	1711,164	1749,652	1714,29	1727,81	230,803	15,19222	0,947483	0,81315
	vc = 149,79	1721,046	1719,486	1699,721	1746,531	1709,08	1731,97	274,735	16,57513	0,42356	-0,0976
19313	vc = 80,21	2024,791	2019,589	2013,868	2040,914	2014,91	2039,87	160,47	12,66766	0,64785	-2,1005
	vc = 95,50	1989,423	1980,581	1960,817	2048,196	1962,9	2003,47	1065,937	32,6487	1,399311	1,84977
	vc = 115,00	1967,578	1966,018	1948,334	1988,903	1951,46	1984,74	350,046	18,70953	0,078577	-2,9907
	vc = 134,50	1916,087	1917,128	1898,404	1935,852	1899,44	1928,57	234,591	15,31635	-0,03045	-1,7699
	vc = 149,79	1867,405	1864,076	1852,634	1880,72	1862	1877,6	134,933	11,61606	0,000503	-1,7652
19573	vc = 80,21	2057,384	2063,279	2024,27	2081,483	2033,63	2078,36	551,165	23,47691	-0,60249	-1,5148
	vc = 95,50	1997,745	2007,627	1945,214	2051,316	1962,9	2011,79	1448,987	38,06556	-0,15543	-0,4525
	vc = 115,00	1939,492	1939,492	1877,599	1992,024	1916,09	1972,26	1746,337	41,7892	-0,28684	-0,7693
	vc = 134,50	2098,646	2099,166	2078,362	2114,77	2089,8	2110,61	182,544	13,51087	-0,37747	-0,7107
	vc = 149,79	1996,531	2009,187	1929,61	2026,351	1982,66	2022,19	1307,85	36,16421	-1,61668	2,49518



Obrázek 3-18: Grafický popis naměřených hodnot k_{c1} pro materiál 12050 a 14220



Obrázek 3-19: Grafický popis naměřených hodnot k_{c1} pro materiál 19313 a 19573

Na základě výše uvedené tabulky, Obrázek 3-19 a Obrázek 3-18 je možno konstatovat několik skutečností:

- **materiál 12050** – hodnota řezného odporu klesá se zvyšující se řeznou rychlostí a následně opět roste od rychlosti 115 m/min
- **materiál 14220** – hodnota řezného odporu klesá se zvyšující se rychlostí
- **materiál 19313** – hodnota řezného odporu klesá se zvyšující se řeznou rychlostí a to výrazně a jednotlivá opakovaná měření vykazují vysoký stupeň homogenity
- **materiál 19573** – hodnota řezného odporu klesá s rostoucí hodnotou řezné rychlosti až do 115 m/min, kdy při rychlosti 134,5 m/min dojde k nárůstu na jeho maximum a následně opět klesne při rychlosti 149,79 m/min

U všech materiálů rovněž lze konstatovat, že se měrný řezný odpor chová nelineárně. Jako poslední krok deskriptivní statistiky byl proveden Shapiro-Wilkův test normality pro jednotlivé pokusy (opakovaná měření). Tabulka 40 uvádí hodnoty pravděpodobnosti p , kdy při porovnání s hladinou významnosti 5 %, je dojito k poznatku, že pokusy při nichž je zjištěná hodnota $p > 0,05$ mají normální rozdělení a je možné u nich pracovat s hodnotou průměru, naopak pokusy kde $p < 0,05$ nemají normální rozdělení, a je proto nutné použít hodnotu mediánu. Hodnota *TOTAL* je pak určena vždy pro jeden materiál jako celek. Podrobné parametry Shapiro-Wilkových testů jsou uvedeny v Příloze 14.

Tabulka 40: Shapiro-Wilkův test- p hodnoty pro k_{c1}

Shapiro-Wilk k_{c1}												
Material	12050						14220					
v_c	80,21	95,5	115	134,5	149,790	Total	80,21	95,5	115	134,5	149,790	Total
Shapiro-Wilk p	0,533	0,8446	0,315	0,4	0,311	0,441	0,38	0,126	0,364	0,417	0,955	0,0455
Material	19313						19573					
v_c	80,21	95,5	115	134,5	149,790	Total	80,21	95,5	115	134,5	149,790	Total
Shapiro-Wilk p	0,0508	0,178	0,0832	0,563	0,613	0,128	0,336	0,621	0,914	0,912	0,0949	0,449

U skupin, které nemají normální rozdělení, pak rovněž není možné aplikovat parametrické testy, ale musejí být využity testy neparametrické.

Ověření nezávislosti (závislosti) měrného řezného odporu na řezné rychlosti – H1

Vzhledem k poznatkům deskriptivní statistiky bude pro ověření první hypotézy použito parametrických testů pro materiály 12050, 19313 a 19573. Pro materiál 14220 budou použity neparametrické testy, neboť hodnota pravděpodobnosti Shapiro-Wilk p je rovna 0,0455 z čehož plyne, že vybrané hodnoty neodpovídají Gaussovu-normálnímu rozdělení. Vzhledem k samotné povaze experimentu je řezná rychlost modelována jako ordinální proměnná.

Tabulka 41 uvádí parametry analýzy rozptylu pro materiál 12050 a na jejich základě je možné usuzovat, že rychlost není signifikantním faktorem, tudíž že neovlivňuje změnu řezného odporu ($p=0,136674$), respektive není dostatek důkazů pro zamítnutí hypotézy H1.

Tabulka 41: ANOVA pro k_{c1} u materiálu 12050

Dependent Variable	Test of SS Whole Model vs. SS Residual (KC1_ANOVA) 12050										
	Multiple R	Multiple R2	Adjusted R2	SS Model	df Model	MS Model	SS Residual	df Residual	MS Residual	F	p
k_{c1} [Mpa]	0,485722	0,235926	0,113674	43631,7	4	10907,92	141306,2	25	5652,249	1,929838	0,136674

Tabulka 42 uvádí parametry analýzy rozptylu pro materiál 19313 a 19573, na jejichž základě je možné usuzovat, že rychlost je signifikantním faktorem, tudíž že ovlivňuje změnu řezného odporu ($p=0,00000$), respektive je možné hypotézu H1 pro tyto materiály zamítnout.

Tabulka 42: ANOVA pro k_{c1} u materiálu 19313 a 19573

Dependent Variable	Test of SS Whole Model vs. SS Residual (KC1_ANOVA) 19313										
	Multiple R	Multiple R2	Adjusted R2	SS Model	df Model	MS Model	SS Residual	df Residual	MS Residual	F	p
k_{c1} [Mpa]	0,91579	0,838671	0,812858	115371	4	28842,64	22193,05	25	887,7221	32,49061	0,00000
Dependent Variable	Test of SS Whole Model vs. SS Residual (KC1_ANOVA) 19573										
	Multiple R	Multiple R2	Adjusted R2	SS Model	df Model	MS Model	SS Residual	df Residual	MS Residual	F	p
k_{c1} [Mpa]	0,88072	0,775668	0,739775	90537,3	4	22634,32	26184,41	25	1047,376	21,61049	0,00000

Tabulka 43 uvádí parametry analýzy rozptylu pro materiál 14220 a na jejich základě je možné usuzovat, že rychlost je signifikantním faktorem, tudíž že ovlivňuje změnu řezného odporu ($p=0,0002$), respektive je možné hypotézu H1 pro tyto materiály zamítnout. Jak již bylo zmíněno výše, jedná se o neparametrický test.

Tabulka 43: Kruskal-Wallis ANOVA pro k_{c1} u materiálu 14220

Kruskal-Wallis ANOVA by Ranks; Kc1 [MPa] (Kruskal-Wallis test: H (4, N= 30) =21,78119 p =,0002				
Depend.:kc1 [MPa]	Code	Valid N	Sum of Ranks	Mean Rank
Vc1	1	6	154	25,66667
Vc2	2	6	134	22,33333
Vc3	3	6	85	14,16667
Vc4	4	6	57	9,5

Na základě výše provedené analýzy je možné říci, že u materiálu 12050 se vliv řezné rychlosti nejeví jako statisticky významný, tudíž není dostatek důkazů na zamítnutí hypotézy H1. K opačnému závěru se dochází u materiálů 14220, 19313 a 19573. Z výše uvedeného rovněž vyplývá, že modelovány budou tedy pouze měrné řezné odpory pro materiály 14220, 19313 a 19573.

Ověření rozdílu experimentálního a tabulkového řezného odporu – H2

Druhá hypotéza říká, že experimentálně zjištěný řezný odpor dosahuje tabulkové hodnoty. Za tímto účelem je sestavena Tabulka 44, která uvádí hodnoty jednotkového měrného řezného odporu získané z Tabulka 2. Tyto hodnoty reflektují skutečné parametry testovaných materiálů, tzn. konkrétní chemické složení a tepelné zpracování.

Tabulka 44: Tabulkové hodnoty měrného řezného odporu

Materiál	12050	14220	19313	19573
MC kód	P1.3.Z.AN	P1.1.Z.AN	P2.3.Z.AN	P2.2.Z.AN
k_{c1} [MPa]	1750	1500	2020	1950
mc koef.	0,25			

Pro analýzu materiálů 12050, 19313 a 19573 je opět použit parametrický test, konkrétně oboustranný parametrický individuální t-test. Tabulka 45 pak uvádí jeho základní parametry. Na základě dosažených hodnot pravděpodobnosti p uvedených v tabulce může být zamítnuta hypotéza H_2 , tudíž může být tvrzeno, že existuje signifikantní rozdíl mezi tabulkovou a experimentálně zjištěnou hodnotou u materiálů 12050, 19313 a 19573.

Tabulka 45: Individuální t-test pro porovnání tabulkového a experimentálního k_{c1}

Variable	Test of means against reference constant (value) (KC1_ANOVA) 12050							
	Mean	Std.Dv.	N	Std.Err.	Reference Constant	t-value	df	p
Kc1 [Mpa]	2008,875	79,85718	30	14,57986	1750	17,7557	29	<0,000001
Variable	Test of means against reference constant (value) (KC1_ANOVA) 19313							
	Mean	Std.Dv.	N	Std.Err.	Reference Constant	t-value	df	p
Kc1 [Mpa]	1948,958	68,8736	30	12,57545	2020	-5,6476	29	0,000004
Variable	Test of means against reference constant (value) (KC1_ANOVA) 19573							
	Mean	Std.Dv.	N	Std.Err.	Reference Constant	t-value	df	p
Kc1 [Mpa]	2017,96	63,44199	30	11,58287	1950	5,867265	29	0,000002

Tabulka 46 uvádí hodnoty neparametrického testu materiálu 14220. Z hodnoty pravděpodobnosti p je zřejmé, že může být zamítnuta hypotéza H_2 . Ke stejnému závěru je dojito i případě provedení Wilcoxonova rank sum testu, kdy pravděpodobnost $p < 0,00001$, tudíž může být tvrzeno, že existuje signifikantní rozdíl mezi tabulkovou a experimentálně zjištěnou hodnotou u materiálu 14220.

Tabulka 46: Mann-Whitney U test porovnání tabulkového a experimentálního k_{c1}

variable	Mann-Whitney U Test (KC1_ANOVA) By variable hodnota Kc1 Marked tests are significant at p <,05000									
	Rank Sum experimentálně získána	Rank Sum tabulkova	U	Z	p-value	Z adjusted	p-value	Valid N experimentálně získána	Valid N tabulkova	2*1sided exact p
Kc1 [Mpa]	465	1365	0	6,6465	< 0,00001	7,11204	0	30	30	0

Výše uvedená analýza dokazuje, že u všech sledovaných materiálů je nalezen signifikantní rozdíl mezi experimentálně získanou a tabulkovou hodnotou. Na základě tohoto zjištění je v další podkapitole provedeno sestavení výpočtových modelů pro jednotlivé materiály.

3.7.3 Zhodnocení experimentálně získaných hodnot k_{c1} v závislosti na v_c

Z výše provedené statistické analýzy vyplývá, že nejnižší hodnoty měrného řezného odporu jsou dosaženy u materiálu 14220. Dále pak je zřejmé, že u materiálů 14220 a 19313 se stoupající řeznou rychlostí klesá hodnota měrného řezného odporu. U materiálu 12050

a 19573 je tento klesající trend zřejmý pouze do rychlosti 115 m/min. Při zvýšení řezné rychlosti na 134,5 m/min dochází u obou materiálů ke zvýšení hodnoty měrného řezného odporu a následně při dalším navýšení na 149,79 m/min k jeho opětovnému poklesu. Tento pokles je však u materiálu 12050 nepatrný, oproti tomu u materiálu 19573 je výrazný.

Z výše provedené statistické analýzy vyplývají pro sestavení statistických modelů následující fakta:

- pro materiál 12050 není možné sestavit model, neboť na základě provedené analýzy nemá řezná rychlost významný vliv na velikost měrného řezného odporu a vzhledem k tomu, že hodnoty odpovídají Gaussovu-normálnímu rozdělení, je možné počítat s průměrovou hodnotou získanou z deskriptivní statistiky
- pro materiály 14220, 19313 a 19573 mohou být sestaveny modely závislosti měrného řezného odporu na řezné rychlosti $k_{c1}=f(v_c)$

Pro samotný výběr modelu je podstatná hodnota Akaikova kritéria (AICc) a Bayesova kritéria (BIC). Platí, že čím nižší je hodnota kritérií, tím model lépe vystihuje skutečnost.

V následující části je provedeno zhodnocení modelů pro jednotlivé materiály, provedení výběru nejvhodnějšího modelu a jeho sestavení a to včetně odhadu jednotlivých členů modelu.

Model pro materiál 14220

Tabulka 47 uvádí porovnání modelů, ze kterého je zřejmé, že při splnění podmínky uvedené výše se jako nejvhodnější model jeví „Exponential 2P“. Ačkoliv tento model vysvětluje pouze 67,284 % variability naměřených dat a minimální požadavek je 70 %, bude použit pro validační porovnávání.

Tabulka 47: Porovnání modelů $k_{c1}=f(v_c)$ pro materiál 14220

$k_{c1} = f(v_c)$ 14 220									
Model		AICc	Weights	BIC	SSE	MSE	RMSE	R-Square	R-Square Adj.
Exponential 2P		302,539		305,819	33429,012	1193,893	34,55276	0,68412	0,67284
Linear		302,751		306,031	33666,085	1202,360	34,67507	0,68188	0,67052
Quadratic		303,727		307,732	31810,453	1178,165	34,32441	0,69942	0,68868
Exponential 3P		303,887		307,891	31980,247	1184,454	34,41589	0,69781	0,68702
Mechanistic Growth		303,887		307,891	31980,247	1184,454	34,41589	0,69781	0,68702
Logistic 3P		305,217		309,222	33430,323	1238,160	35,18750	0,68411	0,67283
Gompertz 3P		305,250		309,254	33466,841	1239,513	35,20671	0,68376	0,67247
Cubic		306,339		310,845	31507,024	1211,809	34,81104	0,70228	0,69165

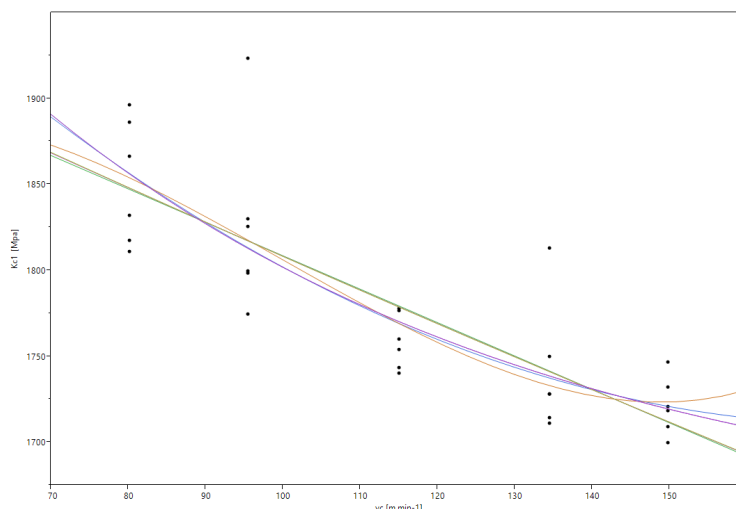
Tabulka 48 uvádí hodnoty odhadu jednotlivých členů modelu, který je pak uveden níže jako (29). Tento model je platný pro interval řezných rychlostí tak, jak je nastaven v hlavním experimentu.

Tabulka 48: Odhad parametrů modelu $k_{c1}=f(v_c)$ pro materiál 14220

$k_{c1} = f(v_c)$ 14 220				
Parameter	Estimate	Std Error	Lower 95%	Upper 95%
Scale	2017,7411	33,024343	1953,0146	2082,4676
Growth Rate	-0,001096	0,0001407	-0,001372	-0,000821

$$k_{c1} = 2017,7411 \cdot e^{-0,001096 \cdot v_c} \quad (29)$$

Obrázek 3-20 uvádí grafické porovnání modelů závislosti $k_{c1} = f(v_c)$ pro materiál 14220.



Obrázek 3-20: Grafické porovnání modelů $k_{c1} = f(v_c)$ pro materiál 14220

Model pro materiál 19313

Tabulka 49 uvádí porovnání modelů, ze kterého je zřejmé, že při splnění podmínky uvedené výše se jako nejvhodnější model jeví „Exponential 3P“. Tento model objasňuje 82,458 % variability naměřených hodnot.

Tabulka 49: Porovnání modelů $k_{c1} = f(v_c)$ pro materiál 19313

$k_{c1} = f(v_c)$ 19313									
Model		AICc	Weights	BIC	SSE	MSE	RMSE	R-Square	R-Square Adj.
Exponential 3P		294,386		298,390	23299,23	862,934	29,37574	0,83063	0,82458
Gompertz 3P		294,420		298,425	23326,24	863,935	29,39277	0,83043	0,82438
Logistic 3P		294,456		298,461	23353,90	864,959	29,41019	0,83023	0,82417
Quadratic		295,173		299,178	23918,72	885,878	29,76371	0,82613	0,81992
Cubic		296,013		300,519	22331,78	858,915	29,30725	0,83766	0,83186
Logistic 4P		297,286		301,792	23299,24	896,125	29,93534	0,83063	0,82458
Linear		297,324		300,604	28094,65	1003,380	31,67618	0,79577	0,78848
Exponential 2P		297,874		301,154	28614,48	1021,946	31,96789	0,79199	0,78456
Biexponential 4P		298,660		303,166	24391,41	938,131	30,62893	0,82269	0,81636

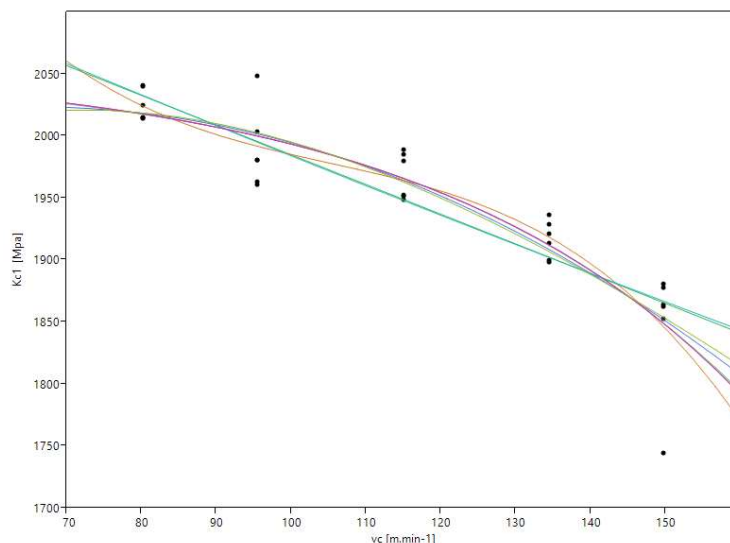
Tabulka 50 uvádí hodnoty odhadu jednotlivých členů modelu, který je pak uveden níže jako (30). Tento model je platný pro interval rezných rychlostí tak, jak je nastaven v hlavním experimentu.

Tabulka 50: Odhad parametrů modelu $k_{c1} = f(v_c)$ pro materiál 19313

$k_{c1} = f(v_c)$ 19313				
Parameter	Estimate	Std Error	Lower 95%	Upper 95%
Asymptote	2059,259	43,52918	1973,944	2144,575
Scale	-6,34686	10,52598	-26,9774	14,28368
Growth Rate	0,023374	0,009895	0,00398	0,042769

$$k_{c1} = 2059,2591 - 6,346858 \cdot e^{0,0233744 \cdot v_c} \quad (30)$$

Obrázek 3-21 pak uvádí grafické porovnání modelů závislosti $k_{c1} = f(v_c)$ pro materiál 19313.



Obrázek 3-21: Grafické porovnání modelů $k_{c1} = f(v_c)$ pro materiál 19313

Model pro materiál 19573

Tabulka 51 uvádí porovnání modelů, ze kterého je zřejmé, že při splnění podmínky uvedené výše se jako nejvhodnější model jeví „Quartic“. Tento model objasňuje 76,766 % variability naměřených hodnot.

Tabulka 51: Porovnání modelů $k_{c1} = f(v_c)$ pro materiál 19573

$k_{c1} = f(v_c)$ 19573									
Model		AICc	Weights	BIC	SSE	MSE	RMSE	R-Square	R-Square Adj.
Quartic		303,940		308,695	26184,4	1047,377	32,36320	0,77567	0,76766
Cubic		328,066		332,572	65003,4	2500,132	50,00132	0,44309	0,42320
Mechanistic Growth		339,595		343,600	105150,3	3894,456	62,40558	0,09914	0,06696
Exponential 3P		339,718		343,723	105582,2	3910,452	62,53361	0,09544	0,06313
Quadratic		340,009		344,014	106613,8	3948,661	62,83837	0,08660	0,05398
Exponential 2P		340,039		343,320	116679,2	4167,116	64,55320	0,00036	-0,03534
Linear		340,039		343,320	116679,5	4167,126	64,55328	0,00036	-0,03534
Logistic 3P		342,727		346,732	116721,7	4323,025	65,74972	0,00000	-0,03571
Gompertz 3P		342,727		346,732	116721,7	4323,025	65,749717	-2,44E-15	-0,03571
Lorentzian Peak		342,753		346,758	116824,2	4326,822	65,77858	-0,00088	-0,03662
Gaussian Peak		342,754		346,759	116828,6	4326,985	65,77982	-0,00092	-0,03666
Logistic 5P		346,122		350,877	106827,6	4273,104	65,36898	0,08477	0,05208
Quintic		1399,745		1404,462	1,705E+20	7,103E+18	2,67E+09	-1,46E+15	-1,51E+15

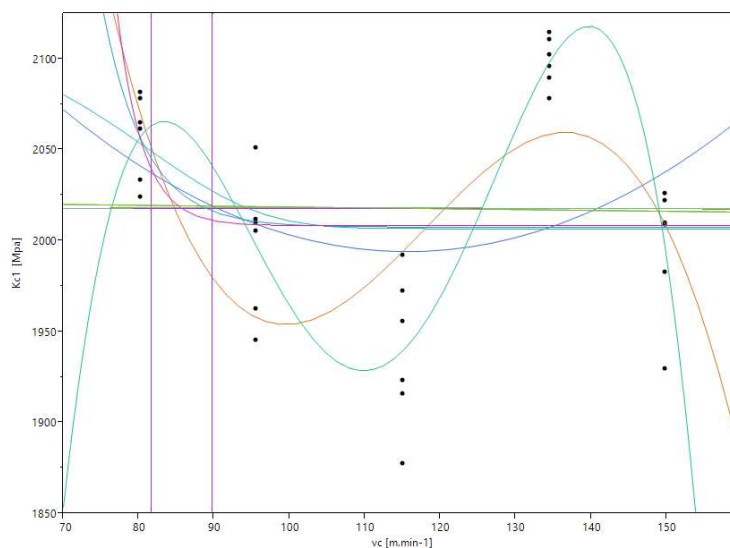
Tabulka 52 uvádí hodnoty odhadu jednotlivých členů modelu, který je pak uveden níže jako (31). Tento model je platný pro interval řezných rychlostí tak, jak je nastaven v hlavním experimentu.

$$k_{c1} = -32130,22 + 1315,9237 \cdot v_c - 18,59662 \cdot v_c^2 + 0,1142014 \cdot v_c^3 - 0,000257 \cdot v_c^4 \quad (31)$$

Tabulka 52: Odhad parametrů modelu $k_{c1} = f(v_c)$ pro materiál 19573

$k_{c1} = f(v_c)$ 19573				
Parameter	Estimate	Std Error	Lower 95%	Upper 95%
Intercept	-32130,22	6716,0213	-45293,38	-18967,06
Slope	1315,9237	245,41327	834,92252	1796,9249
Quadratic	-18,59662	3,3050623	-25,07443	-12,11882
Cubic	0,1142014	0,0194549	0,0760705	0,1523322
Quartic	-0,000257	4,23E-05	-0,00034	-0,000174

Obrázek 3-22 pak uvádí grafické porovnání modelů závislosti $k_{c1} = f(v_c)$ pro materiál 19573.



Obrázek 3-22: Grafické porovnání modelů $k_{c1} = f(v_c)$ pro materiál 19573

Po provedení vyhodnocení a zhodnocení naměřených hodnot a výsledků analýz může být řečeno, že u materiálů 19313 a 19573 byly nalezeny adekvátní modely pro výpočet jednotkového měrného řezného odporu v závislosti na řezné síle. U materiálu 14220 byl sice nalezen model, ale podle výše uvedené analýzy dostatečně nevysvětluje variabilitu naměřených hodnot. I přes tento nedostatek bude model použit při validačním porovnání v následující kapitole. Rovněž bude pro tento materiál použita hodnota mediánová, neboť naměřená data neodpovídají Gaussovu-normálnímu rozdělení. U materiálu 12050 nebyla na základě provedených statistických analýz nalezena závislost mezi jednotkovým měrným řezným odporem a řeznou rychlostí a vzhledem k tomu, že měřená data při Shapiro-Wilkově testu vykazala Gaussovo-normální rozdělení, bude při validaci počítáno s průměrnou hodnotou. Jak mediánová tak i průměrná hodnota bude převzata z tabulky deskriptivní statistiky (Tabulka 39).

Experiment rovněž prokázal, že při hladině významnosti $\alpha = 5 \%$ je signifikantní rozdíl mezi tabulkovou měřenou hodnotou jednotkového měrného řezného odporu. Na základě tohoto zjištění bude při validaci nalezených modelů posuvové síly a krouticího momentu proveden i porovnávací výpočet s využitím jednotkového měrného řezného odporu získaného na základě výše uvedených poznatků.

Vzhledem k tomu, že tento experiment je dílčím cílem, není provedená analýza natolik komplexní, jako v případě podkapitoly 3.6. Z toho pak plyne doporučení pro další postup, a

to podrobněji zanalyzovat nalezené modely pro výpočet jednotkového měrného řezného odporu.

3.8 Validace přesnosti nalezených modelů pro F_f a M_c

Validace nalezených modelů posuvové síly a krouticího momentu bude provedena ve dvou krocích. V prvním kroku budou porovnány vypočtené a měřené hodnoty v jednotlivých bodech plánu. V druhém kroku bude vybráno několik kombinací kontrolovaných faktorů mimo experimentálně ověřované body a pro ně proveden samostatný experiment. Při tomto experimentu již nebude prováděno opakování a měřená hodnota se bude porovnávat přímo s hodnotou vypočtenou pomocí modelu.

Pro zjištění objektivního srovnání nalezených modelů a standardně používaných výpočtů budou provedeny rovněž i výpočty podle několika variant standardních metod uvedených v podkapitole 2.4.2. Tyto výpočty budou provedeny pro obě výše uvedená porovnání. Pro srovnání metod výpočtu bude použita jednak průměrná chyba výpočtu, která je určena jako průměr hodnot chyb vypočtených podle (32) a rovněž i maximální chyba a to vždy pro celý soubor hodnot vypočtených pomocí jedné z metod.

$$chyba_{(i)} = \frac{m_{(i)} - v_{(i)}}{m_{(i)}} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (32)$$

kde

$m_{(i)}$ je měřená hodnota v i-tém bodě

$v_{(i)}$ je vypočítaná hodnota v i-tém bodě

i je počet bodů porovnání od 1 do n

3.8.1 Výběr porovnávacích metod výpočtu F_f a M_c

Na základě podkapitoly 2.4.2 jsou voleny dva základní přístupy, a to výpočet pomocí měrného řezného odporu a výpočet pomocí exponenciálních rovnic. Pro zvýšení vypovídací hodnoty provedených porovnávacích výpočtů bude v případě měrného řezného odporu proveden výpočet podle tabulkových hodnot získaných z Tabulka 2, které uvádí Tabulka 44 a rovněž podle experimentálně získaných hodnot.

Tedy pro materiál 12050 bude použita průměrná hodnota, jelikož naměřené hodnoty odpovídají Gaussovu-normálnímu rozdělení a podle provedené analýzy nebyl nalezen model vlivu řezné rychlosti. U materiálu 14220 budou provedeny dvě varianty, první bude uvažovat model a to i přes jeho nevyhovující vypovídací hodnotu a druhá, která bude počítat s hodnotou mediánu, neboť naměřená data neodpovídají Gaussovu-normálnímu rozdělení. Pro materiály 19313 a 19573 bude měrný řezný odpor stanoven na základě nalezených modelů, neboť jejich vypovídací hodnota je dostačující.

U exponenciálních rovnic bude oproti tomu využito postupů výpočtu podle pramenů [36], [4] a [12]. Každý z uvedených pramenů používá výpočet uvedený v podkapitole 2.4.2 v určité modifikaci, proto bude provedeno porovnání podle jednotlivých pramenů. Hodnoty exponentů konstant pro všechny uvedené materiály jsou dostupné pouze u pramenu [4]. Vzhledem k tomu, že dostupné hodnoty exponentů a konstant pro zbylé dva prameny se významně neliší od hodnot pro pramen [4], budou všechny výpočty prováděny na základě

exponentů a konstant uvedených v pramenu [4]. Tabulka 53 shrnuje exponenty a konstanty použité pro výpočet pomocí exponenciálních rovnic.

Tabulka 53: Hodnoty exponentů a konstant pro výpočet F_f a M_c

Materiál	12050	14220	19313	19573
C_{Fc}	1840	1710	1710	2030
x_{Fc}	1	1	1	1
y_{Fc}	0,78	0,78	0,78	0,75
C_{Ff}	630	550	550	690
x_{Ff}	1	1,1	1,1	1,1
y_{Ff}	0,55	0,55	0,55	0,55

Vzhledem k tomu, že výše uvedené hodnoty jsou získány při soustružení, je nutné upravit (12) a (13) tak, že parametr D je nahrazen hloubkou řezu a_p , která je při vrtání rovna hodnotě $D/2$, rovněž musí být nahrazen otáčkový posuv posuvem zubovým, neboť z definice řezných sil podle (4) je pro výpočet krouticího momentu vyžadována jedna z dvojice sil F_{c1} a F_{c2} . Po tomto zásahu je však nutné provést změnu (14) na (33). Tyto úpravy je nutné provést při výpočtu podle pramenu [12], pramen [4] již odvozuje výsledné rovnice s touto podmínkou. Při výpočtu podle pramenu [36] je pak uvažováno při výpočtu krouticího momentu s korekcí působíště řezné síly, konkrétně je působíště posunuto blíže ose vrtáku a krouticí moment je vypočítán podle (34).

$$M_c = C_{F_c} \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^{(x_{F_c}+1)} \cdot f_z^{y_{F_c}} [N] \quad (33)$$

$$M_c = C_{F_c} \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^{x_{F_c}} \cdot f_{ot}^{y_{F_c}} \cdot r_c [N] \quad (34)$$

kde

r_c je korigované působíště řezné síly, pro 12050 je stanoveno jako (35) dle pramenu [36]

f_z je posuv na zub

$$r_c = 0,41 \cdot \frac{D}{2} [N] \quad (35)$$

Tato úprava vychází z předpokladu, že průběh F_c podél ostří není rovnoměrný, tzn. odlišné chování v oblasti hlavního a příčného ostří. Poslední korekcí je úprava (13) podle pramenu [4], na (36) kde je zavedena konstanta C_0 , která vyjadřuje vliv obráběného materiálu, bohužel pramen [4] uvádí hodnotu této konstanty pouze obecně pro konstrukční ocel a to 787 MPa.

$$F_f = C_0 \cdot D^{x_{F_c}} \cdot f_{ot}^{y_{F_c}} [N] \quad (36)$$

Při akceptaci výše uvedených poznatků jsou sestaveny výpočty, na jejichž základě jsou získány tabulky hodnot uvedené v podkapitolách 3.8.2 a 3.8.3.

3.8.2 Validace výpočtu v bodech hlavního experimentu

Při prvním porovnávání se vychází z plánu experimentu uvedeného v Příloze 3. Zde jsou uvedeny konkrétní hodnoty kontrolovaných faktorů. Tabulka 54 a Tabulka 55 uvádí hodnoty dosažené po provedení výpočtů a přepočtu podle (32), dále jsou pak uvedeny hodnoty maximálních odchylek. Při výpočtech jsou respektovány poznatky z podkapitol 3.8.1 a 2.4.2.

Tabulka 54: Dosažené chyby v bodech hlavního plánu pro F_f

Metoda výpočtu	Posuvová síla F_f							
	Materiál							
	12050		14220		19313		19573	
	Průměrná chyba [%]	Maximální chyba ± [%]	Průměrná chyba [%]	Maximální chyba ± [%]	Průměrná chyba [%]	Maximální chyba ± [%]	Průměrná chyba [%]	Maximální chyba ± [%]
Nalezený statistický model	-0,03	6,26 -5,64	0,09	12,3 -10,02	-0,18	6,73 -8,72	0,12	5,99 -5,42
Experimentálně zjištěné k_{c1} - model	-----	-----	13,05	46,3 -38,8	31,17	44,15 9,05	9,24	33,02 -9,68
Experimentálně zjištěné k_{c1} - průměr (medián)	-5,24	26,15 -64,95	24,04	52,12 -34,96	39,75	54,06 11,37	23	39,19 -0,65
Tabulkové k_{c1}	-4,45	26,02 -44,53	26,73	55,67 -14,57	28,95	43,59 8,14	15,19	35,52 2,74
Exponenciální rovnice podle [4]	-131,75	-61,14 -226,66	-89,48	-201,27 -22,75	-36,57	-77,23 -12,29	-78,6	-99,26 -43,72
Exponenciální rovnice podle [12]	4,11	37,6 -42,78	19,65	51,82 -36,45	42,29	54,94 20,51	10,79	32,37 -4,51

Tabulka 55: Dosažené chyby v bodech hlavního plánu pro M_c

Metoda výpočtu	Kroučící moment M_c							
	Materiál							
	12050		14220		19313		19573	
	Průměrná chyba [%]	Maximální chyba ± [%]	Průměrná chyba [%]	Maximální chyba ± [%]	Průměrná chyba [%]	Maximální chyba ± [%]	Průměrná chyba [%]	Maximální chyba ± [%]
Nalezený statistický model	-0,12	11,25 -10,98	-0,01	8,37 -7,5	-0,13	8,67 -9,47	0,17	10,91 -5,64
Experimentálně zjištěné k_{c1} - model	-----	-----	5,98	20,38 -18,12	21,42	32,62 9,41	-1,12	11,46 -18,99
Experimentálně zjištěné k_{c1} - průměr (medián)	-1,39	16,02 -22,86	6,65	21,26 -14,85	21,75	34,34 11,73	2,17	11,79 -8,8
Tabulkové k_{c1}	11,67	26,85 -7,03	20,75	33,15 2,5	18,9	31,95 5,51	5,47	-5,14 14,76
Exponenciální rovnice podle [4]	-26,29	-5,83 -50,86	-22,75	-9,56 -43,07	6,59	24 -4,07	-44,4	-26,85 -59,48
Exponenciální rovnice podle [12]	-6,75	10,72 -27,91	-3,77	7,69 21,3	21,04	35,97 12,31	-19,3	-4,42 -32,21
Exponenciální rovnice podle [36]	12,46	26,79 -4,89	14,91	0,53 24,31	35,25	47,49 28,09	2,18	14,38 -8,41

Na základě výše uvedených tabulek může být konstatováno, že nalezené modely v těchto bodech dosahují nejmenší chybovosti v porovnání se standardně užívanými výpočty. Na základě tohoto výpočtu je tedy ověřeno, že v bodech plánu fungují nalezené modely s vyšší přesností, než standardně užívané výpočty.

U výpočtů pomocí experimentálně zjištěného řezného odporu může být konstatováno, že v případě posuvové síly došlo k výraznému zpřesnění výpočtu u materiálu 14220 (z 26,73 % na 13,05 %) a materiálu 19573 (z 15,19 % na 9,24 %). U materiálu 12050 došlo k mírnému zhoršení přesnosti (z -4,45 % na -5,24 %), rovněž tak u materiálu 19313 (z 28,95 % na 31,17 %). V případě krouticího momentu došlo ke zhoršení přesnosti pouze u materiálu 19313 (z 18,9 % na 21,42 %), naopak u zbylých tří materiálů bylo dosaženo zvýšení přesnosti výpočtu, konkrétně pak pro materiál 12050 (z 11,67 % na -1,39 %), pro materiál 14220 (z 20,75 % na 5,98 %) a 19573 (z 5,74% na -1,12 %).

Na tomto místě je možné konstatovat, že při porovnání nalezených modelů a standardních experimentálně zjištěných výpočtů je v bodech plánu dosaženo vyšší přesnosti výpočtu pomocí nalezených modelů. Dále je možné tvrdit, že při aplikaci poznatků z experimentálního měření jednotkového měrného řezného odporu ve většině případů dochází k zpřesnění výpočtu oproti výpočtu založenému na tabulkových hodnotách.

3.8.3 Validace výpočtu v bodech ověřovacího experimentu

Pro provedení vlastního porovnání v rozsahu nastavených intervalů bylo vybráno celkem čtrnáct náhodných bodů, které se neshodují s body hlavního plánu. Aby bylo prokázáno, že je možné libovolně měnit i geometrické parametry. Jsou v tomto souboru obsažena tři měření s nástroji, které jsou vyráběny sériově, a mají tedy reálnou geometrii. Jedná se o dva nástroje od společnosti NACHREINER (E.3646.1.1200 a E.3617.1.0850) a jeden nástroj od společnosti PRAMET (303DA-10,2-40-A12). Zbylých jedenáct nástrojů pochází ze souboru nástrojů použitých pro hlavní experiment, viz Tabulka 10. Konkrétní hodnoty v jednotlivých bodech uvádí Tabulka 56.

Tabulka 56: Parametry validačního testu

Měření	průměr vrtáku [mm]	posuv na otáčku [mm/ot.]	řezná rychlost [m/min]	Úhel hrotu [°]	Úhel hřbetu [°]	Úhel stoupání šroubovice [°]	Označení nástroje
1	8,0	0,12	93,00	137,5	10,0	30,0	1-2
2	8,5	0,18	85,00	145,0	10,9	26,0	E.3617.1.0850
3	8,9	0,14	80,00	133,3	11,1	32,8	5-2
4	8,9	0,21	114,00	141,7	8,9	27,2	7-2
5	8,9	0,17	120,00	133,3	8,9	27,2	3-2
6	10,0	0,12	102,00	137,5	8,0	30,0	12-2
7	10,0	0,25	86,00	137,5	12,0	30,0	13-2
8	10,0	0,12	150,00	145,0	10,0	30,0	10-2
9	10,2	0,20	120,00	140,0	8,9	26,2	303DA-10,2-40-A12
10	12,0	0,19	115,00	141,8	8,4	29,9	E.3646.1.1200
11	11,1	0,23	85,00	141,7	11,1	32,8	23-2
12	11,1	0,15	105,00	141,7	8,9	32,8	21-2
13	11,1	0,14	125,00	133,3	11,1	27,2	18-2
14	12,0	0,14	85,00	137,5	10,0	30,0	25-2

Po sestavení výše uvedené tabulky je realizován experiment stejně jako v podkapitole 3.6. Jediný a hlavní rozdíl je v tom, že měření pro jednotlivé body není opakováno a jako měřená hodnota pro výpočet podle (32) je brána tato konkrétní hodnota.

Pro vyhodnocení naměřených dat a výpočtů podle jednotlivých modelů jsou opět sestaveny chybové tabulky na základě (32).

Tabulka 57: Dosažené chyby v bodech validačního testu pro F_f

Posuvová síla F_f								
Metoda výpočtu	Materiál							
	12050		14220		19313		19573	
	Průměrná chyba [%]	Maximální chyba \pm [%]	Průměrná chyba [%]	Maximální chyba \pm [%]	Průměrná chyba [%]	Maximální chyba \pm [%]	Průměrná chyba [%]	Maximální chyba \pm [%]
Nalezený statistický model	4,78	19,92 -4,01	0,95	25,22 -24,73	-0,27	20,74 -17,03	6,21	22,52 -1,02
Experimentálně zjištěné k_{c1} - model	-----	-----	8,11	34,25 -24,16	30,35	43,32 23,16	16,11	27,92 5,78
Experimentálně zjištěné k_{c1} - průměr (medián)	-24,24	3,51 -51,43	9,03	33,87 -29,06	31,29	43,47 18,96	17,4	28,63 9,17
Tabulkové k_{c1}	-8,23	15,95 -31,91	23,32	44,25 8,79	28,78	41,41 16	20,19	31,03 12,75
Exponenciální rovnice podle [4]	-131,46	-81,65 -190,68	-92,2	-40,56 -171,3	-32,69	-9,69 -55,55	-61,46	-35,48 -84,8
Exponenciální rovnice podle [12]	3,58	25,9 -24,9	17,87	41,46 -23,86	43,52	54,31 28,99	18,35	34,13 2,87

Tabulka 58: Dosažené chyby v bodech validačního testu pro M_c

Kroučící moment M_c								
Metoda výpočtu	Materiál							
	12050		14220		19313		19573	
	Průměrná chyba [%]	Maximální chyba \pm [%]	Průměrná chyba [%]	Maximální chyba \pm [%]	Průměrná chyba [%]	Maximální chyba \pm [%]	Průměrná chyba [%]	Maximální chyba \pm [%]
Nalezený statistický model	-4,81	11,3 -24,22	-0,61	8,42 -14,46	0,88	17,97 -9,18	5,32	21,66 -28,3
Experimentálně zjištěné k_{c1} - model	-----	-----	1,39	12,6 -11,61	21,91	32,89 12,27	7,66	24,47 -21,07
Experimentálně zjištěné k_{c1} - průměr (medián)	-7,28	4,12 -16,7	2,45	15,39 -12,26	22,89	34,68 15,06	9,2	26,69 -17,38
Tabulkové k_{c1}	6,55	16,48 -1,67	17,77	28,68 5,37	20,08	32,3 11,96	12,26	29,16 -13,43
Exponenciální rovnice podle [4]	-28,76	-14,67 -44,03	-22,8	-14,26 -38,81	7,74	23,13 0,11	-27,96	-8,09 -61,95
Exponenciální rovnice podle [12]	-8,96	2,77 -21,76	-3,92	3,41 -17,56	24,38	35,23 15,3	-5,84	10,69 -34,58
Exponenciální rovnice podle [36]	8,12	20,27 0,16	12,17	20,79 3,6	35,97	46,89 30,55	7,14	26,27 -10,36

Tabulka 57 uvádí chyby výpočtů pro jednotlivé metody u posuvové síly. Na jejím základě je možné tvrdit, že u všech materiálů je nejmenší chyby dosaženo při výpočtu pomocí nalezených statistických modelů. Pouze u materiálu 12050 je průměrná hodnota vyšší než u standardních výpočtů, rozptyl je ale u statistického modelu nižší, tudíž je možné přijmout tvrzení, že tento model je i přes vyšší průměrnou chybu přesnější. Tabulka 58 uvádí chyby výpočtu kroučících momentů. Vzhledem k tomu, že pro všechny materiály je nejnižší průměrné chyby dosaženo u nalezeného statistického modelu, může být přijato tvrzení, že jsou tyto modely nejpřesnější. Pouze u materiálu 19573 jsou s tímto modelem porovnatelné výpočty podle pramenu [12].

Na základě tohoto výpočtu je tedy ověřeno, že při validačním porovnání fungují nalezené statistické modely s vyšší přesností, než standardně užívané výpočty.

U výpočtů pomocí experimentálně zjištěného řezného odporu může být konstatováno, že v případě posuvové síly došlo k výraznému zpřesnění výpočtu u materiálu 14220 (z 23,32 % na 8,11 %) a materiálu 19573 (z 20,19 % na 16,11 %). U materiálu 12050 došlo k výraznému zhoršení přesnosti (z -8,23 % na -24,24 %), rovněž tak k mírnému zhoršení u materiálu 19313 (z 28,78 % na 30,35 %). V případě krouticího momentu došlo ke zhoršení přesnosti u materiálu 19313 (z 20,08 % na 21,91 %), rovněž tak u materiálu 12050 (z 6,55 % na -7,28 %) naopak u zbylých dvou materiálů bylo dosaženo zvýšení přesnosti výpočtu, konkrétně pak pro materiál pro materiál 14220 (z 17,77 % na 1,39 %) a 19573 (z 12,26% na 7,66 %).

Zde je možné konstatovat, že při porovnání nalezených modelů a standardních experimentálně zjištěných výpočtů je při validačním porovnání dosaženo vyšší přesnosti výpočtu pomocí nalezených modelů. Dále je možné tvrdit, že při aplikaci poznatků z experimentálního měření jednotkového měrného řezného odporu v některých případech dochází k zpřesnění výpočtu oproti výpočtu založenému na tabulkových hodnotách. Nesmí však být opomenut fakt, že tyto modely jsou platné pouze pro určené intervaly jednotlivých kontrolovaných faktorů.

4 Souhrn výsledků a přínosů experimentální činnosti

Na základě provedených experimentů a jejich vyhodnocení je možné posoudit jejich přínos pro obor a aplikování v technické praxi. Za tímto účelem je níže provedeno celkové shrnutí experimentálních činností a rozbor přínosů.

Pro vlastní provedení experimentů bylo nutné provést podrobný rozbor zkoumané oblasti, na jehož základě bylo možné nadefinovat faktory vstupující do experimentů. Nedílnou součástí této části byl i výběr metody zkoumání vlivu těchto faktorů na velikost a průběh posuvové síly a krouticího momentu.

První provedený experiment byl zaměřen na zjištění vlivu polohy vrtaného otvoru na velikost sledované veličiny při použití dynamometru KISTLER 9272. Po jeho realizaci a vyhodnocení naměřených dat bylo dojito k závěru, že poloha nemá statisticky významný vliv na velikost sledovaných veličin. Protože se vliv polohy neprojevil, nemusí být již ani při navrhování dalších experimentů i mimo tuto práci s tímto vlivem uvažováno, což je z pohledu vlastního návrhu a provedení experimentu významný přínos.

Při návrhu hlavního, druhého, experimentu bylo nutné nejprve sestavit jeho plán, aby bylo možné provést jeho pozdější korektní statistické zpracování. Vlastní plán byl sestaven za pomoci metody DoE a to konkrétně jako centrálně kompozitní. Podrobný popis sestavení plánu je uveden v podkapitole 3.4. Z plánu rovněž vyplynula potřeba speciálních nástrojů, které bylo nutné zajistit pro realizaci experimentu. Na základě statistického zpracování naměřených dat byly sestaveny modely pro výpočet posuvové síly a krouticího momentu pro jednotlivé varianty testovaného materiálu. Tyto modely byly podrobeny zevrubné statistické analýze, na jejímž základě je možné přijmout tvrzení, že vypočítací schopnost jednotlivých modelů je dostatečná a modely je možné považovat za korektní. Posledním úkolem této analýzy bylo zjistit, zda je možné provést sloučení modelů posuvové síly a krouticího momentu. Na základě výsledků této analýzy bylo možné tuto hypotézu zamítnout a přijmout tvrzení, že pro zachování přesnosti výpočtu je nutné ponechat odděleně jednotlivé modely v závislosti na materiálu.

Hlavními přínosy této části jsou po teoretické stránce následující:

- uvedení možného postupu sestavení plánu experimentu pro zjištění silového zatížení šroubovitého vrtáku v závislosti na geometrických parametrech nástroje a technologických parametrech procesu vrtání
- uvedení postupu statistického zpracování naměřených dat v oblasti vrtání
- potvrzení poznatků z teorie obrábění, např. nejvýznamnějšími kontrolovanými faktory jsou jmenovitý průměr nástroje a posuv na otáčku

Hlavními přínosy pro aplikační oblast jsou:

- nalezení čtyř modelů pro výpočet posuvové síly u typových materiálů
- nalezení čtyř modelů pro výpočet krouticího momentu u typových materiálů

Jako příklad jsou uvedeny modely pro materiál 12050

$$F_f = 74,869 \cdot \varepsilon_r - 238,594 \cdot \alpha_o + 93209,693 \cdot f_{ot} + 387,336 \cdot \omega + 9,448 \cdot v_c + 2,041 \cdot \alpha_o \cdot \varepsilon_r - \\ - 321,634 \cdot \alpha_o \cdot f_{ot} - 620,678 \cdot \varepsilon_r \cdot f_{ot} - 2,819 \cdot \varepsilon_r \cdot \omega - 2318,164 \cdot f_{ot} \cdot \omega + 493,0139 \cdot f_{ot} \cdot D - \\ - 2,789 \cdot 10^{-2} \cdot v_c^2 - 14,327 \cdot D + 16,107 \cdot \varepsilon_r \cdot f_{ot} \cdot \omega - 11490,816$$

$$M_c = 1,565 \cdot \varepsilon_r + 79,109 \cdot f_{ot} + 0,689 \cdot \omega - 4,927 \cdot 10^{-3} \cdot v_c + 7,242 \cdot f_{ot} \cdot D - 5,789 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon_r^2 - \\ - 713,366 \cdot f_{ot}^2 + 1658,793 \cdot f_{ot}^3 - 1,255 \cdot 10^{-2} \cdot \omega^2 + 0,311 \cdot D - 117,651$$

Na základě provedené rešerše byl proveden třetí experiment pro zjištění jednotkového měrného řezného odporu v závislosti na řezné rychlosti a obráběném materiálu. I v případě tohoto experimentu byla provedena statistická analýza naměřených dat. Po provedení základní analýzy bylo možné konstatovat, že pouze u materiálu 12050 nebylo možné najít model popisující závislost jednotkového měrného řezného odporu na řezné rychlosti.

Nalezené modely pro jednotlivé materiály jsou pro:

- materiál 19573

$$k_{c1} = -32130,22 + 1315,9237 \cdot v_c - 18,59662 \cdot v_c^2 + 0,1142014 \cdot v_c^3 - 0,000257 \cdot v_c^4$$

- materiál 19313

$$k_{c1} = 2059,2591 - 6,346858 \cdot e^{0,0233744 \cdot v_c}$$

- materiál 14220

$$k_{c1} = 2017,7411 \cdot e^{-0,001096 \cdot v_c}$$

Výše uvedené modely jsou použity při validačním porovnání statistických modelů a běžně využívanými výpočty známými z teorie obrábění. Hlavním přínosem třetího experimentu je nalezení a ověření experimentu pro zjišťování jednotkového měrného řezného odporu, který je realizovatelný při použití vybavení dostupného na Katedře technologie obrábění a Regionálním technologickém institutu.

Poslední, čtvrtý, experiment byl zaměřen na validaci nalezených modelů. Samotná validace pak probíhala ve dvou krocích, kdy nalezené statistické modely byly porovnány s několika vybranými experimentálně určenými modely, které vycházejí ze známé teorie obrábění. V prvním kroku bylo provedeno porovnání přímo v bodech plánu, kdy při tomto porovnání byla dosažena nejvyšší přesnost u nalezených statistických modelů. Z pohledu samotného ověření funkčnosti však toto porovnání není dostačující, neboť lze předpokládat, že pokud jdou nalezené modely sestaveny na základě bodů plánu, budou v nich dosahovat i nejvyšší průměrné přesnosti. Proto následoval druhý krok, v kterém již bylo provedeno porovnání mimo tyto body. Za tímto účelem byl sestaven soubor čtrnácti měření. Měření respektují hranice intervalů z hlavního experimentu, ale pro zachování objektivity jsou mezi nástroje z hlavního experimentu vřazeny i standardně používané nástroje. Vyhodnocení je opět provedeno pomocí průměrné chyby a maximálních odchylek. I přes tyto modifikace však dává výsledky nejbližše reálně naměřeným hodnotám. Rovněž je důležité připomenout, že u bodů plánu je vypočítaná hodnota porovnávána s průměrnou hodnotou z více měření, oproti tomu u čtvrtého experimentu je porovnání provedeno s jednou konkrétní naměřenou hodnotou.

Experimenty jako celek mohou být hodnoceny jako úspěšné, neboť jejich výsledky potvrzují poznatky teorie obrábění a zároveň dokázaly zpřesnit predikci sledovaných veličin a to nejen v případě statistických modelů, ale rovněž i v případě výpočtů za pomoci jednotkového měrného řezného odporu.

Závěr

Na základě provedené rešeršní činnosti je možné konstatovat, že nejméně popsanou oblastí z pohledu výpočtu silového zatížení šroubovitého vrtáku je oblast statistického modelování. Proto je v experimentální části řešena tato problematika. Rovněž pak z rozboru současného stavu vychází volba vlastních faktorů provedených testů v experimentální části. Nedílnou součástí rozboru je i zjištění, že nebyla nalezena uspokojivá metoda experimentálního zjišťování jednotkového měrného řezného odporu. Proto byl v experimentální části navržen experiment, který řeší tuto problematiku.

Při celkovém shrnutí poznatků získaných z experimentální činnosti je možné konstatovat, že nalezené statistické modely popisují sledované veličiny s dostatečnou přesností. Toto tvrzení je podloženo výsledky validačního experimentu, při kterém se neprokázalo, že by nalezené modely vykazovali horší dosahovanou přesnost než standardně používané výpočty známé z teorie obrábění. Výsledek validačního experimentu potvrdil zjištění z validačního porovnání přímo v bodech plánu.

U experimentálního zjišťování jednotkového měrného řezného odporu byla nalezena efektivní metoda jeho určování. Při zpracování naměřených dat bylo dojito k závěru, že model závislosti jednotkového měrného řezného odporu nebyl nalezen pouze u materiálu 12050. Ačkoliv se u materiálu 14220 jevil model jako nedostatečný, bylo validačními porovnáními prokázáno, že i přes tento nedostatek je s jeho pomocí dosahováno vyšší přesnosti výpočtu než za použití tabulkové nebo mediánové hodnoty.

Experiment pro zjištění vlivu polohy vrtaného otvoru prokázal, že z pohledu statistického modelování nemá poloha vliv na velikost krouticího momentu. Pro posuvovou sílu byl nalezen statistický model, ale jeho vypovídací hodnota nebyla dostatečná a při porovnání dosaženého rozdílu bylo dojito k závěru, že tento model vykazuje vyšší nepřesnost než pouhé průměrování naměřených hodnot, proto ani v případě posuvové síly nebyl nalezen vliv polohy na měřenou hodnotu. Na základě těchto zjištění pak nemusel být proveden přepočet naměřených hodnot v hlavním experimentu v závislosti na poloze vrtaného otvoru.

Závěrem je tedy možno konstatovat, že provedené experimenty splnili očekávání a cíle stanovené v kapitole 1.

Pro další pokračování práce na této problematice je možné:

- rozšířit působnost modelů i mimo hranice zvolených intervalů, popřípadě doplnit sadu modelů o další modely pokrývající oblast mimo intervaly kontrolovaných faktorů
- doplnit modely pro možnost výpočtu posuvové síly a krouticího momentu při změně mechanických vlastností obráběného materiálu, popřípadě rozšířit působnost modelů i na materiály podobných mechanických a chemických vlastností
- experimentálně ověřit závislost jednotkového měrného řezného odporu na mechanických vlastnostech materiálu a případně sestavit modely pro výpočet v závislosti na těchto vlastnostech
- vytvořit aplikaci pro výpočet posuvové síly a krouticího momentu na základě nalezených statistických modelů

5 Citovaná literatura

- [1] M&V, spol. s r. o. Vsetín. *Nástroje pro obrábění otvorů*. [Online]. M&V, 2017. [Cit. 2017-07-07]. Dostupné z: http://www.mav.cz/data/katalog/k_otvory.pdf
- [2] SOVA, F.: *Technologie obrábění a montáže*. Plzeň: ZČU v Plzni, 2001. ISBN 80-7082-823-4
- [3] SCHNIDT, E. a kol.: *Příručka řezných nástrojů*. Praha: SNTL, 1974. ISBN 04-228-74
- [4] VASILKO, K.: *Teória a prax trieskového obrábania*. Prešov: Fakulta výrobných technológií TU v Košiciach, so sídlom v Prešove, 2009. ISBN 978-80-553-0152-5
- [5] SKLENIČKA, J.: *Vliv geometrie břitu produktivních vrtacích nástrojů na velikost řezných sil*. Plzeň, 2009. Diplomová práce. ZČU v Plzni, Fakulta strojní, Katedra technologie obrábění.
- [6] BEŇO, J.: *Teória rezania kovov*. Košice: Vienala, vydavateľstvo a tlačiareň Košice, 1999. ISBN 80-7099-429-0
- [7] ROUD, P.: *Metody zefektivnění konstrukce řezných nástrojů*. Plzeň, 2013. Disertační práce. ZČU v Plzni, Fakulta strojní, Katedra technologie obrábění.
- [8] BÉKÉS, J.: *Inženiarska technologia obrábania kovov*. Bratislava: Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry Bratislava, 1981. ISBN 63-050-81
- [9] BRYCHTA, J., R. ČEP, M. SADÍLEK, L. PETŘKOVSKÁ a J. NOVÁKOVÁ: *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava: Ediční středisko VŠB-TU Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1505-3
- [10] SANDVIK Coromant. *Měrná řezná síla*. [Online]. 2017 [Cit. 2017-07-19]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz /knowledge/materials/workpiece materials/the specific cutting force/pages/default.aspx>
- [11] BATYSTOVÁ, I.: *Nože: Podklady pro cvičení z PNO*, Plzeň: ZČU v Plzni, 1992.
- [12] KOČMAN, K.: *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství Cerm, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2
- [13] AUDY, J.: *A study of computer-assisted analysis of effects of drill geometry and surface coating on forces and power in drilling*. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 204.1: 130-138. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.imatprotec.2007.10.079>

- [14] MAŠEK, A.: *Silové zatížení šroubovitého vrtáku ve vztahu k makrogeometrii nástroje*. Plzeň, 2013. Bakalářská práce. ZČU v Plzni, Fakulta strojní, Katedra technologie obrábění.
- [15] KOŽMÍN, P., J. SKLENIČKA a P. ROUD: *FEM method in chip shape and cutting force prediction when*. 3rd International Scientific Conference with Expert Participation – MANUFACTURING 2010, Poznaň, 2010.
- [16] ROUD, P., J. SKLENIČKA a P. KOŽMÍN: *Using FEM in prediction of chip shape*. Advances in manufacturing science and technology, 2011.
- [17] ROUD, P., M. ZETEK, I. ČESÁKOVÁ, J. SKLENIČKA a P. KOŽMÍN: *Using of FEM for chip formation and cutting force prediction when drilling tool steel AISI D3*. MM Science Journal, pp. 236-237, Březen 2011.
- [18] TEJKL, J.: *Obrábění těžkoobrobitelných materiálů*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [19] MEENA, A.; EL MANSORI, M.: *Specific cutting force, tool wear and chip morphology characteristics during dry drilling of austempered ductile iron (ADI)*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 69.9-12: 2833-2841. Dostupné z: <http://link.springer.com/article/10.1007/s00170-013-5220-6>
- [20] Kistler Eastern Europe s.r.o.: *4-Component Dynamometer for Cutting Force Measurement in Drilling*. [Online]. 2017. [Cit. 2017-07-25]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/?type=669&fid=60755>
- [21] GOMBÁR, M.: *Plánovanie experimentov (DoE) ako nástroj efektívneho výskumu technologických procesov*. Prešov, 2017. Podklady k přednáškám
- [22] TOŠENOVSKÝ, J.: *Plánování experimentů*, Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2012.
- [23] MICHÁLEK, J.: *Navrhování a vyhodnocování experimentů (DOE) - Učební texty k semináři*. [Online]. 3 prosinec 2010. [Cit. 2017-07-26]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_05_1012_2.pdf
- [24] BÍCOVÁ, K.: *Příspěvek k hodnocení ukazatelů výrobního procesu*. Plzeň, 2016. Disertační práce. ZČU v Plzni, Fakulta strojní, Katedra technologie obrábění.
- [25] KOŽÍŠEK, J. a B. STIEBEROVÁ: *Statistika v příkladech*. Praha: Verlag Dashöfer, 2012. ISBN 978-80-86897-48-6

- [26] FABIAN, F., V. HORÁLEK, V. CHMELÍK, J. CHODOUNSKÝ, J. KRÁL, J. KŘEPELA a J. MICHÁLEK: *Statistické metody řízení jakosti*, Praha: ČSJ, 2007. ISBN 978-80-02-01897-1.
- [27] MILDE, D.: *Metoda ANOVA*. [Online]. 2017. [Cit. 2017-07-26]. Dostupné z: <http://ach.upol.cz/user-files/intranet/09-anova-2011-1320420399.pdf>
- [28] MICHÁLEK, J.: *Statistické řízení procesů se SW podporou*. [Online]. 2017. [Cit. 2017-07-26]. Dostupné z: <http://library.utia.cas.cz/separaty/2009/SI/michalek-statistical%20process%20control%20with%20sw%20support.pdf>
- [29] ANDERSEN, B. a T. FAGERHAUG: *Analýza kořenových příčin - Zjednodušené nástroje a metody*. Praha: ČSJ, 2011. ISBN 978-80-02-02356-2.
- [30] GIBILISCO, S.: *Statistika bez předchozích znalostí*, Brno: Computer Press, a.s., 2009. ISBN 978-80-251-2465-9
- [31] HENDL, J.: *Přehled statistických metod: Analýza a metaanalýza dat*. Praha: Portál, 2015. ISBN 978-80-262-0981-2
- [32] Bohdan Bolzano s.r.o.: *Přehled vlastností oceli C45E (C45 R)*. [Online]. 2017. [Cit. 2017-07-26]. Dostupné z: <http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/oceli-k-zuslechtovani-podle-en-10083-1/prehled-vlastnosti-oceli-c45>
- [33] Bohdan Bolzano s.r.o.: *Přehled vlastností oceli 16MnCr5 (16MnCr5)*. [Online]. 2017. [Cit. 2017-07-26]. Dostupné z: <http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/oceli-k-cementovani-podle-en-10084/prehled-vlastnosti-oceli-16mncr5>
- [34] Bohdan Bolzano s.r.o.: *90MnCrV8*. [Online]. 2017. [Cit. 2017-07-26]. Dostupné z: <http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/nastrojove-oceli/nastrojove-oceli-pro-praci-za-studena/legovane-nastrojove-oceli-pro-praci-za-studena/materialove-listy/materialovy-list-oceli-90mncrv8>
- [35] Bohdan Bolzano s.r.o.: *Přehled vybraných legovaných nástrojových ocelí pro práci za studena a jejich charakteristika*. [Online]. 2017. [Cit. 2017-07-26]. Dostupné z: <http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/nastrojove-oceli/nastrojove-oceli-pro-praci-za-studena/legovane-nastrojove-oceli-pro-praci-za-studena/prehled-vybranych-legovanych-nastrojovych-oceli-pro-praci-za-studena-a-jejich-charakteristi>
- [36] TÖNSHOFF, H. K. a B. DENKENA: *Spanen – Grundlagen*. Berlin: Springer, 2014. ISBN 3-540-00588-9

Seznam publikovaných prací

Seznam vlastních prací vztahujících se k tématu disertace:

- [1] SKLENIČKA, J., ZETEK, M., ČESÁKOVÁ, I. Vliv geometrie šroubovitého vrtáku na velikost řezných sil. In *ERIN 2009*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2009. s. 1-8. ISBN: 978-80-248-1982-2
- [2] SKLENIČKA, J., ZETEK, M. Vliv vrstvy na zatížení vrtacích nástrojů. In *Vrstvy a povlaky 2009*. Trenčín: DIGITAL GRAPHIC, 2009. s. 95-99. ISBN: 978-80-969310-9-5
- [3] ZETEK, M., SKLENIČKA, J., KŘÍŽ, A. Vliv tenké vrstvy na proces vrtání. In *Vrstvy a povlaky 2009*. Trenčín: Digital Graphic, 2009. s. 131-134. ISBN: 978-80-969310-9-5
- [4] SKLENIČKA, J., ZETEK, M., ČESÁKOVÁ, I. *Volba tenké otěruvzdorné vrstvy pro vrtací nástroje*. Košice, 2009. ISSN:1337-7094
- [5] ZETEK, M., SKLENIČKA, J., ROUD, P. *Přínos tenkých vrstev při vrtání*. Košice, 2009. ISSN:1337-7094
- [6] ROUD, P., SKLENIČKA, J., KOŽMÍN, P. *FEM method in chip shape and cutting force prediction when drilling difficult to cut materials*. 2010., ISBN: 978-83-62-263-33-2,
- [7] ROUD, P., ZETEK, M., ČESÁKOVÁ, I., SKLENIČKA, J., KOŽMÍN, P. Using FEA to design twist drill geometry. *Strojírenská technologie*, 2010, roč. 14, č. Zvláštní, s. 229-232. ISSN: 1211-4162
- [8] SKLENIČKA, J., ZETEK, M., ČESÁKOVÁ, I. Vliv geometrických parametrů nástroje na velikost řezných sil při vrtání. *Strojírenská technologie*, 2010, roč. 14, č. zvláštní, s. 237-240. ISSN: 1211-4162
- [9] SKLENIČKA, J., ZETEK, M., ČESÁKOVÁ, I. Vliv geometrických parametrů nástroje na velikost řezných sil při vrtání. In *3. mezinárodní konference ICTKI2010 : sborník příspěvků*. Ústí nad Labem: FVTM UJP, 2010. s. 1-4. ISBN: 978-80-7414-204-8
- [10] ROUD, P., ZETEK, M., SKLENIČKA, J., ČESÁKOVÁ, I., KOŽMÍN, P. Using FEA to design twist drill geometry. In *Sborník konference ICTKI 2010*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, 2010. s. 1-4. ISBN: 978-80-7414-204-8
- [11] ROUD, P., ZETEK, M., ČESÁKOVÁ, I., SKLENIČKA, J., KOŽMÍN, P. USING OF FEM FOR CHIP FORMATION AND CUTTING FORCE PREDICTION WHEN DRILLING TOOL STEEL. *MM Science Journal*, 2011, roč. Neuveden, č. Březen, s. 236-239. ISSN: 1803-1269
- [12] SKLENIČKA, J., KUTLWAŠER, J. *Redukce šumu při experimentálním měření řezných sil*. Plzeň, 2011., ISBN: 978-80-7043-934-0,
- [13] HNÁTÍK, J., KUTLWAŠER, J., SKLENIČKA, J. Měření řezných sil při obrábění metodou iMachining. *Strojírenská technologie*, 2014, roč. XIX, č. 2, s. 78-82. ISSN: 1211-4162
- [14] SKLENIČKA, J., BÍCOVÁ, K. Návrh výpočtového modelu pro stanovení řezných sil při vrtání. In *MANUFACTURING TECHNOLOGY - PILSEN 2017: Conference proceeding*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017. s. 1-5. ISBN: 978-80-261-0636-4

Seznam vlastních prací nevztahujících se k tématu disertace:

- [1] ČESÁKOVÁ, I., ZETEK, M., ŘEHOŘ, J., SKLENIČKA, J. Vliv tenké otěruvzdorné vrstvy na řezivost cermetového nástroje. In *Vrstvy a povlaky 2009*. Trenčín: DIGITAL GRAPHIC, 2009. s. 9-14. ISBN: 978-80-969310-9-5
- [2] ČESÁKOVÁ, I., ZETEK, M., SKLENIČKA, J., ŘEHOŘ, J., RAJŠPÍS, V. *Vliv vrstvy na trvanlivost a silové zatížení cermetového nástroje*. Košice, 2009. ISSN:1337-7094
- [3] ČESÁKOVÁ, I., ZETEK, M., SKLENIČKA, J. *Vliv tenké vrstvy na kvalitu obrobeného povrchu a silové zatížení cermetového nástroje*. Ústí nad Labem, 2010., ISBN: 978-80-7414-204-8,
- [4] SKLENIČKA, J., ZETEK, M., ČESÁKOVÁ, I. *Porovnání metod experimentálního měření koeficientu tření*. Trenčín, 2010., ISBN: 978-80-970514-2-6,
- [5] ZETEK, M., SKLENIČKA, J., ČESÁKOVÁ, I. *Vliv povrchu řezného nástroje a vrstvy na řezný proces*. 2010., ISBN: 978-80-970514-2-6,
- [6] ČESÁKOVÁ, I., ZETEK, M., SKLENIČKA, J. Vliv tenké vrstvy na kvalitu obrobeného povrchu a silové zatížení cermetového nástroje. *Strojírenská technologie*, 2010, roč. 14, č. zvláštní, s. 29-32. ISSN: 1211-4162
- [7] SKLENIČKA, J., ZETEK, M., ČESÁKOVÁ, I. *Diagnostika řezného procesu při vývoji prototypů*. Plzeň, 2010., ISBN: 978-80-7043-866-4,
- [8] SKLENIČKA, J., ZETEK, M., ČESÁKOVÁ, I. *Measurement of friction coefficient using dynamometer Kistler 9272*. Prešov, 2010., ISBN: 978-80-553-0439-7,
- [9] SKLENIČKA, J., ZETEK, M., ČESÁKOVÁ, I. *Diagnostika řezného procesu při vývoji prototypů*. Plzeň, 2010., ISBN: 978-80-7043-866-4,
- [10] ZETEK, M., ČESÁKOVÁ, I., SKLENIČKA, J. *Konstrukce speciální frézy pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů*. Plzeň, 2011., ISBN: 978-80-7043-934-0,
- [11] SKLENIČKA, J., URBAN, M. *Design of a special milling tool for experimental measurement of cutting forces during cutting materials with difficult machinability*. Prešov, 2011., ISBN: 978-80-89347-05-6,
- [12] URBAN, M., ZETEK, M., ZETKOVÁ, I., SKLENIČKA, J. Konstrukce speciální frézy pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů. In *Vrstvy a povlaky 2011: Zborník prednášok*. Trenčín: Miloš Vavřík - Kníhviazačstvo, Trenčín, 2011. s. 169-174. ISBN: 978-80-970824-0-6
- [13] ZETEK, M., ČESÁKOVÁ, I., SKLENIČKA, J. OBRÁBĚNÍ LASEREM KALENÉHO POVRCHU. In *Transfer inovácií*. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2011. s. 36-40., ISSN: 1337-7094
- [14] ČESÁKOVÁ, I., ZETEK, M., SKLENIČKA, J., ROUD, P. APLIKACE CERMETOVÝCH VBD PŘI OBRÁBĚNÍ ZÁPUSTKOVÉ OCELI D3. In *Education research innovation*. 2011. ISBN: 978-80-89347-05-6
- [15] ČESÁKOVÁ, I., ZETEK, M., SKLENIČKA, J., ROUD, P. Frézování zápustkové oceli AISI D3 cermetovými VBD s mikroúpravami břítu. In *Frézování zápustkové oceli AISI D3 cermetovými VBD s mikroúpravami břítu*. 2011. ISBN: 978-80-7454-026-4

- [16] ZETEK, M., ČESÁKOVÁ, I., SKLENIČKA, J., KUTLWAŠER, J. Integrita povrchu řezného nástroje. In *SEMDOK 2012*. Žilina: Žilinská univerzita, 2012. s. 226-230. ISBN: 978-80-554-0477-6
- [17] SKLENIČKA, J., KUTLWAŠER, J. Experimentální metoda měření tvrdosti laserem kaleného povrchu. In *Zborník prednášok*. Trenčín: Miloš Vavřík-Kníhviazačstvo,, 2012. s. 109-114. ISBN: 978-80-970824-1-3
- [18] SKLENIČKA, J., KUTLWAŠER, J., ZETEK, M., SAMIECOVÁ, E. Observation of laser beam hardened layer hardness using cutting force measurement. In *Proceedings of International Conference on Innovative Technologies*. Rijeka: Faculty of Engineering University of Rijeka, 2012. s. 491-494. ISBN: 978-953-6326-77-8
- [19] ŘEHOŘ, J., KOUŘIL, K., KROFT, L., SKLENIČKA, J. Trendy v konstrukci výstružníků. *Strojírenská technologie*, 2014, roč. 19, č. 3,4, s. 227-232. ISSN: 1211-4162
- [20] ŘEHOŘ, J., KOUŘIL, K., SKLENIČKA, J., KROFT, L. Trendy v konstrukci výstružníků. In *5. Mezinárodní konference ICTKI 2014: Sborník příspěvků*. Ústí nad Labem: Unverzita J. E. Purkyně v Ústí n. Labem (UJEP), 2014. s. 306-311. ISBN: 978-80-7414-679-4
- [21] MELICHAR, M., KUBÁTOVÁ, D., KUTLWAŠER, J., SKLENIČKA, J. Zpracování dat z automatizovaného měřicího pracoviště. In *Recenzovaný sborník příspěvků interdisciplinární mezinárodní vědecké konference doktorandů a odborných asistentů*. Hradec Králové: MAGNANIMITAS, Hradec Králové, 2014. s. 1575-1584. ISBN: 978-80-87952-04-7
- [22] BÍCOVÁ, K., SKLENIČKA, J. The model of activities management and planning with respect to quality and efectiveness. In *MMK 2014: Mezinárodní Masaryková konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2014*. Hradec Králové: MAGNANIMITAS, Hradec Králové, 2014. s. 3084-3092. ISBN: 978-80-87952-07-8
- [23] FULEMOVÁ, J., HNÁTÍK, J., KOŽMÍN, P., SKLENIČKA, J. INFLUENCE OF COOLING METHODS ON TOOL LIFE DURING MACHINING WITH iMACHINING STRATEGY. In *Industrial Engineering*. University of Technology Tallin, 2015. s. 1-6. ISBN: 978-9949-23-804-0, ISSN: 2346-612X
- [24] BÍCOVÁ, K., SKLENIČKA, J. Inovace řízení a plánování činností s ohledem na požadavky ISO 9001. In *Strojírenská technologie – Plzeň 2015: Sborník příspěvků*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015. s. 41-46. ISBN: 978-80-261-0304-2
- [25] LOBOVSKÝ, L., MANDYS, T., SKLENIČKA, J., BUBLÍK, O., VIMMR, J. Validation tests for gravity casting simulations. In *Computational mechanics - EXTENDED ABSTRACTS*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Univerzitní 8, 306 14 Plzeň, 2016. s. 73-74. ISBN: 978-80-261-0647-0
- [26] HNÁTÍK, J., KUTLWAŠER, J., SKLENIČKA, J. iMachining cutting force measurement. In *Proceedings of the 26th DAAAM International Symposium*. Vienna: DAAAM International, 2016. s. 955-959. ISBN: 978-3-902734-07-5, ISSN: 1726-9679

- [27] BÍCOVÁ, K., KUTLWAŠER, J., SKLENIČKA, J. Issue of high precision manufacturing analysis in automotive industry. In *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*. Vienna: Danube Adria Association for Automation and Manufacturing, DAAAM, 2016. s. 353-357. ISBN: 978-3-902734-08-2 , ISSN: 1726-9679
- [28] MONKA, P., MONKOVÁ, K., FULEMOVÁ, J., SKLENIČKA, J., MATĚJKA, J. Zvyšování kvality a produktivity obrábění nástřiků odolných opotřebení. In *MANUFACTURING TECHNOLOGY - PILSEN 2017: Conference proceeding*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017. s. 1-5. ISBN: 978-80-261-0636-4

Autor disertační práce je mimo výše uvedené články rovněž autorem:

- ověřených technologií 90x
- funkčních vzorků 87x
- posteru 1x
- souhrnný výzkumných zpráv 4x

Ukázka významných aplikovaných výsledků:

Souhrnné výzkumné zprávy

- [1] HNÁTÍK, J., SKLENIČKA, J., KROFT, L. *Power calculation for iMachining*. SolidCAM, 2016.
- [2] SKLENIČKA, J., HNÁTÍK, J., TENK, J., KUTLWAŠER, J. *Porcupine cutter test cutting*. Hofmeister, s.r.o., 2014.
- [3] HNÁTÍK, J., KUTLWAŠER, J., TENK, J., SKLENIČKA, J. *The 2013 overall research report of SolidCAM project in accordance to contract from 11.22.2012*. SolidCAM, 2013.

Ověřené technologie

- [1] HNÁTÍK, J., SKLENIČKA, J., DUCHEK, V. *Technologie obrobení elektrody pro svařování radiátorových těles*. 2016.
- [2] SKLENIČKA, J., HNÁTÍK, J., MATĚJKA, J., KUTLWAŠER, J. *Technologie obrobení tenkostěnných rámečků ze slitiny hliníku*. 2013.
- [3] SKLENIČKA, J., HNÁTÍK, J., MATĚJKA, J., KUTLWAŠER, J. *Technologie vrtání sklo-epoxidových pryskyřic na ocelovém podkladě*. 2013.

Funkční vzorky

- [1] SKLENIČKA, J., MATĚJKA, J., HNÁTÍK, J. *Funkční vzorek střížnice pro prostřížení pláště katalyzátoru*. 2015.
- [2] MATĚJKA, J., HNÁTÍK, J., SKLENIČKA, J., BÍCOVÁ, K. *Přípravek pro dovařování stínícího deflektorového plechu - geometrická úprava*. 2015.
- [3] MATĚJKA, J., HNÁTÍK, J., SKLENIČKA, J., KROFT, L. *Optimalizace geometrie stříhacího kotoučového nože*. 2015.

PŘÍLOHA č. 1

Měřené hodnoty tvrdosti HV10

Mat. vz.	Č.vzorku	Zk. Vpich HV10	1.vpich HV10	2.vpich HV10	3.vpich HV10	Φ hodnta HV10
12 050	1.1	226	212	214	219	225
12 050	1.1	240	239	227	237	
12 050	1-2+	221	221	219	220	220
12 050	1-2-	227	215	222	225	
12 050	1-3+	222	236	227	220	223
12 050	1-3-	229	220	216	217	
12 050	1-4+	227	220	224	225	224
12 050	1-4-	222	224	225	225	
12 050	1.5	224	222	226	215	219
12 050	1.5	218	216	218	215	
12 050	1-6+	222	228	220	221	218
12 050	1-6-	209	214	213	213	
14 220	2-1+	175	172	178	171	175
14 220	2-1-	178	178	177	175	
14 220	2-2+	176	173	169	171	174
14 220	2-2-	172	177	177	174	
14 220	2-3+	171	176	173	178	175
14 220	2-3-	176	175	177	171	
14 220	2.4	199	183	179	170	175
14 220	2-4+	178	177	171	172	
14 220	2-5+	181	181	183	179	175
14 220	2-5-	171	169	167	172	
14 220	2.6	186	185	183	178	180
14 220	2-6+	180	178	177	179	
19 313	3-1+	216	205	204	210	203
19 313	3-1-	198	194	199	205	
19 313	3-2+	200	208	205	203	204
19 313	3-2-	201	199	203	203	
19 313	3-3+	192	188	203	191	200
19 313	3-3-	212	203	207	206	
19 313	3-4+	207	203	199	199	206
19 313	3-4-	212	211	209	210	
19 313	3.5	199	209	200	198	204
19 313	3.5	203	205	205	204	
19 313	3.6	206	207	203	217	207
19 313	3.6	192	193	191	200	
19 573	4-1+	236	227	233	228	233
19 573	4-1-	236	241	232	237	
19 573	4-2+	232	228	231	228	233
19 573	4-2-	234	234	239	240	
19 573	4-3+	232	233	240	237	238
19 573	4-3-	243	242	237	239	
19 573	4-4+	238	238	243	243	239
19 573	4-4-	235	235	234	238	
19 573	4.5	236	232	236	233	235
19 573	4-5+	238	238	237	233	
19 573	4.6	230	242	236	233	238
19 573	4-6+	242	237	238	239	

PŘÍLOHA č. 2

DMU EVO 40 linear - podrobný popis
Dynamometr Kistler 9272 - podrobný popis

Lineární frézovací centrum DMU 40 eVo linear



Velikost pracovního prostoru:

Osa X: 400mm

Osa Y: 400mm

Osa Z: 375mm

Max. hm. obrobku: 250kg

Max. otáčky: 24 000 ot/min

► Statický dynamometr 4 složkový



	Parametry			
	Fx	Fy	Fz	Mz
Max. zatížení	5 kN	5 kN	20 kN	200 Nm
Citlivost	-7,8 pC/N	-7,8 pC/N	-3,5 pC/N	-160 pC/Nm
Max. kombinovaný moment	400 Nm			
Vlastní frekvence	3,1 kHz	6,3 kHz	4,2 kHz	

PŘÍLOHA č. 3

Plán experimentu a v přirozeném a kódovaném měřítku

Centrální kompozitní plán v přirozeném měřítku

Měření	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
1	8,9	0,13	95,50	133,3	8,9	27,2
2	8,9	0,13	95,50	133,3	11,1	32,8
3	8,9	0,13	95,50	141,7	8,9	32,8
4	8,9	0,13	95,50	141,7	11,1	27,2
5	8,9	0,13	134,50	133,3	8,9	32,8
6	8,9	0,13	134,50	133,3	11,1	27,2
7	8,9	0,13	134,50	141,7	8,9	27,2
8	8,9	0,13	134,50	141,7	11,1	32,8
9	8,9	0,22	95,50	133,3	8,9	32,8
10	8,9	0,22	95,50	133,3	11,1	27,2
11	8,9	0,22	95,50	141,7	8,9	27,2
12	8,9	0,22	95,50	141,7	11,1	32,8
13	8,9	0,22	134,50	133,3	8,9	27,2
14	8,9	0,22	134,50	133,3	11,1	32,8
15	8,9	0,22	134,50	141,7	8,9	32,8
16	8,9	0,22	134,50	141,7	11,1	27,2
17	11,1	0,13	95,50	133,3	8,9	32,8
18	11,1	0,13	95,50	133,3	11,1	27,2
19	11,1	0,13	95,50	141,7	8,9	27,2
20	11,1	0,13	95,50	141,7	11,1	32,8
21	11,1	0,13	134,50	133,3	8,9	27,2
22	11,1	0,13	134,50	133,3	11,1	32,8
23	11,1	0,13	134,50	141,7	8,9	32,8

Měření	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
24	11,1	0,13	134,50	141,7	11,1	27,2
25	11,1	0,22	95,50	133,3	8,9	27,2
26	11,1	0,22	95,50	133,3	11,1	32,8
27	11,1	0,22	95,50	141,7	8,9	32,8
28	11,1	0,22	95,50	141,7	11,1	27,2
29	11,1	0,22	134,50	133,3	8,9	32,8
30	11,1	0,22	134,50	133,3	11,1	27,2
31	11,1	0,22	134,50	141,7	8,9	27,2
32	11,1	0,22	134,50	141,7	11,1	32,8
33	8,0	0,18	115,00	137,5	10,0	30,0
34	12,0	0,18	115,00	137,5	10,0	30,0
35	10,0	0,09	115,00	137,5	10,0	30,0
36	10,0	0,26	115,00	137,5	10,0	30,0
37	10,0	0,18	80,21	137,5	10,0	30,0
38	10,0	0,18	149,79	137,5	10,0	30,0
39	10,0	0,18	115,00	130,0	10,0	30,0
40	10,0	0,18	115,00	145,0	10,0	30,0
41	10,0	0,18	115,00	137,5	8,0	30,0
42	10,0	0,18	115,00	137,5	12,0	30,0
43	10,0	0,18	115,00	137,5	10,0	25,0
44	10,0	0,18	115,00	137,5	10,0	35,0
45 (C)	10,0	0,18	115,00	137,5	10,0	30,0
46 (C)	10,0	0,18	115,00	137,5	10,0	30,0

Centrální kompozitní plán v kódovaném měřítku (DoE kódování)

Měření	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆
1	-1,00000	-1,00000	-1,00000	-1,00000	-1,00000	-1,00000
2	-1,00000	-1,00000	-1,00000	-1,00000	1,00000	1,00000
3	-1,00000	-1,00000	-1,00000	1,00000	-1,00000	1,00000
4	-1,00000	-1,00000	-1,00000	1,00000	1,00000	-1,00000
5	-1,00000	-1,00000	1,00000	-1,00000	-1,00000	1,00000
6	-1,00000	-1,00000	1,00000	-1,00000	1,00000	-1,00000
7	-1,00000	-1,00000	1,00000	1,00000	-1,00000	-1,00000
8	-1,00000	-1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
9	-1,00000	1,00000	-1,00000	-1,00000	-1,00000	1,00000
10	-1,00000	1,00000	-1,00000	-1,00000	1,00000	-1,00000
11	-1,00000	1,00000	-1,00000	1,00000	-1,00000	-1,00000
12	-1,00000	1,00000	-1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
13	-1,00000	1,00000	1,00000	-1,00000	-1,00000	-1,00000
14	-1,00000	1,00000	1,00000	-1,00000	1,00000	1,00000
15	-1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	-1,00000	1,00000
16	-1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	-1,00000
17	1,00000	-1,00000	-1,00000	-1,00000	-1,00000	1,00000
18	1,00000	-1,00000	-1,00000	-1,00000	1,00000	-1,00000
19	1,00000	-1,00000	-1,00000	1,00000	-1,00000	-1,00000
20	1,00000	-1,00000	-1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
21	1,00000	-1,00000	1,00000	-1,00000	-1,00000	-1,00000
22	1,00000	-1,00000	1,00000	-1,00000	1,00000	1,00000
23	1,00000	-1,00000	1,00000	1,00000	-1,00000	1,00000

Měření	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆
24	1,00000	-1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	-1,00000
25	1,00000	1,00000	-1,00000	-1,00000	-1,00000	-1,00000
26	1,00000	1,00000	-1,00000	-1,00000	1,00000	1,00000
27	1,00000	1,00000	-1,00000	1,00000	-1,00000	1,00000
28	1,00000	1,00000	-1,00000	1,00000	1,00000	-1,00000
29	1,00000	1,00000	1,00000	-1,00000	-1,00000	1,00000
30	1,00000	1,00000	1,00000	-1,00000	1,00000	-1,00000
31	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	-1,00000	-1,00000
32	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
33	-1,78419	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
34	1,78419	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
35	0,00000	-1,78419	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
36	0,00000	1,78419	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
37	0,00000	0,00000	-1,78419	0,00000	0,00000	0,00000
38	0,00000	0,00000	1,78419	0,00000	0,00000	0,00000
39	0,00000	0,00000	0,00000	-1,78419	0,00000	0,00000
40	0,00000	0,00000	0,00000	1,78419	0,00000	0,00000
41	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	-1,78419	0,00000
42	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,78419	0,00000
43	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	-1,78419
44	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,78419
45 (C)	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
46 (C)	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000

PŘÍLOHA č. 4

Hodnoty kontrolovaných geometrických faktorů u reálných nástrojů

Číslo nástroje	D [mm]			ϵ_r [°]			α_o [°]			ω_r [°]		
	Plán	Naměřený	Rozdíl	Plán	Naměřený	Rozdíl	Plán	Naměřený	Rozdíl	Plán	Naměřený	Rozdíl
1-1	8,0	7,984	-0,016	137,5	137,57	0,07	10,0	9,86	-0,14	30,0	29,91	-0,09
1-2		7,982	-0,018		137,77	0,27		9,97	-0,03		29,89	-0,11
2-1	8,9	8,899	-0,001	133,3	133,20	-0,10	8,9	8,91	0,01	32,8	32,73	-0,07
2-2		8,901	0,001		133,23	-0,07		8,85	-0,05		32,73	-0,07
3-1	8,9	8,896	-0,004	133,3	133,33	0,03	8,9	8,79	-0,11	27,2	27,11	-0,09
3-2		8,897	-0,003		133,22	-0,08		8,78	-0,12		27,13	-0,07
4-1	8,9	8,898	-0,002	133,3	133,30	0,00	11,1	10,93	-0,17	27,2	27,14	-0,06
4-2		8,902	0,002		133,34	0,04		11,08	-0,02		27,11	-0,09
5-1	8,9	8,897	-0,003	133,3	133,35	0,05	11,1	11,12	0,02	32,8	32,72	-0,08
5-2		8,898	-0,002		133,37	0,07		11,10	0,00		32,70	-0,10
6-1	8,9	8,898	-0,002	141,7	141,82	0,12	8,9	8,86	-0,04	32,8	32,71	-0,09
6-2		8,899	-0,001		141,81	0,11		8,98	0,08		32,71	-0,09
7-1	8,9	8,903	0,003	141,7	141,70	0,00	8,9	8,72	-0,18	27,2	27,11	-0,09
7-2		8,901	0,001		141,85	0,15		8,72	-0,18		27,13	-0,07
8-1	8,9	8,901	0,001	141,7	141,82	0,12	11,1	11,10	0,00	27,2	27,14	-0,06
8-2		8,904	0,004		141,87	0,17		11,07	-0,03		27,12	-0,08
9-1	8,9	8,900	0,000	141,7	141,63	-0,07	11,1	11,07	-0,03	32,8	32,72	-0,08
9-2		8,902	0,002		141,51	-0,19		11,21	0,11		32,74	-0,06
10-1	10,0	9,986	0,014	145,0	144,94	-0,05	10,0	10,05	0,05	30,0	29,87	-0,13
10-2		9,988	-0,012		144,96	-0,03		10,10	0,10		29,88	-0,12
11-1	10,0	9,984	-0,016	130,0	129,99	-0,02	10,0	10,10	0,10	30,0	29,88	-0,12
11-2		9,985	-0,015		130,08	0,07		9,99	-0,01		29,89	-0,11
12-1	10,0	9,981	-0,019	137,5	137,49	-0,01	8,0	8,02	-0,02	30,0	29,90	-0,10
12-2		9,983	-0,017		137,36	-0,14		8,11	0,07		29,92	-0,08
13-1	10,0	9,990	-0,010	137,5	137,44	-0,06	12,0	12,12	0,16	30,0	29,90	-0,10
13-2		9,989	-0,011		137,50	0,00		12,14	0,18		29,88	-0,12
14-1	10,0	9,986	-0,014	137,5	137,61	0,11	10,0	9,82	-0,18	25,0	24,90	-0,10
14-2		9,985	-0,015		137,50	0,00		10,06	0,06		24,89	-0,11
15-1	10,0	9,985	-0,015	137,5	137,58	0,08	10,0	10,03	0,03	35,0	34,92	-0,08
15-2		9,986	-0,014		137,64	0,14		9,97	-0,03		34,92	-0,08

Číslo nástroje	D [mm]			ϵ_r [°]			α_o [°]			ω_r [°]		
	Plán	Naměřený	Rozdíl	Plán	Naměřený	Rozdíl	Plán	Naměřený	Rozdíl	Plán	Naměřený	Rozdíl
16-1	10,0	9,982	-0,018	137,5	137,50	0,00	10,0	9,89	-0,11	30,0	29,89	-0,11
16-2		9,986	-0,014		137,57	0,07		10,08	0,08		29,89	-0,11
17-1	11,1	11,098	-0,002	133,3	133,39	0,09	11,1	11,07	-0,03	32,8	32,71	-0,09
17-2		11,098	-0,002		133,37	0,07		11,18	0,08		32,70	-0,10
18-1	11,1	11,102	0,002	133,3	133,14	-0,16	11,1	11,12	0,02	27,2	27,14	-0,06
18-2		11,099	-0,001		133,17	-0,13		11,08	-0,02		27,14	-0,06
19-1	11,1	11,102	0,002	133,3	133,34	0,04	8,9	8,94	0,04	32,8	32,78	-0,02
19-2		11,103	0,003		133,38	0,08		8,79	-0,11		32,76	-0,04
20-1	11,1	11,098	-0,002	133,3	133,38	0,08	8,9	8,98	0,08	27,2	27,17	-0,03
20-2		11,099	-0,001		133,30	0,00		9,08	0,18		27,14	-0,06
21-1	11,1	11,102	0,002	141,7	141,56	-0,14	8,9	8,75	-0,15	32,8	32,77	-0,03
21-2		11,103	0,003		141,71	0,01		8,84	-0,06		32,74	-0,06
22-1	11,1	11,101	0,001	141,7	141,68	-0,02	8,9	8,77	-0,13	27,2	27,17	-0,03
22-2		11,104	0,004		141,61	-0,09		8,88	-0,02		27,12	-0,08
23-1	11,1	11,097	-0,003	141,7	141,63	-0,07	11,1	11,10	0,00	32,8	32,74	-0,06
23-2		11,097	-0,003		141,54	-0,16		11,04	-0,06		32,74	-0,06
24-1	11,1	11,101	0,001	141,7	141,64	-0,06	11,1	11,18	0,08	27,2	27,14	-0,06
24-2		11,097	-0,003		141,62	-0,08		11,09	-0,01		27,15	-0,05
25-1	12,0	11,982	-0,018	137,5	137,43	-0,07	10,0	10,01	0,01	30,0	29,87	-0,13
25-2		11,981	-0,019		137,42	-0,08		10,03	0,03		29,86	-0,14

PŘÍLOHA č. 5

**Naměřené hodnoty posuvové síly a krouticího momentu pro materiály
12050, 14220, 19313 a 19573**

Materiál 12050

Měření	F ₁₁ [N]	F ₁₂ [N]	F ₁₃ [N]	F ₁₄ [N]	F ₁₅ [N]	F ₁₆ [N]	M _{c1} [Nm]	M _{c2} [Nm]	M _{c3} [Nm]	M _{c4} [Nm]	M _{c5} [Nm]	M _{c6} [Nm]
1	577	560	562	558	560	559	3,3936	3,6914	3,4229	3,5962	3,6552	3,6353
2	514	511	485	483	498	500	3,1152	3,2642	3,4058	3,5205	3,5693	3,5645
3	433	467	446	441	437	439	3,4204	3,0322	3,3301	3,313	3,3301	3,4227
4	539	509	511	506	507	510	3,0957	3,4766	3,5083	3,562	3,5962	3,5718
5	617	623	627	631	635	632	3,1934	3,5034	3,54	3,5962	3,6108	3,8733
6	683	686	672	675	669	666	3,4375	3,7329	3,8599	4,0586	3,9307	3,9673
7	628	621	615	613	611	611	3,418	3,7146	3,6841	3,6279	3,6792	3,7109
8	544	530	524	522	528	527	3,0127	3,4546	3,5352	3,6523	3,6523	3,6523
9	1182	1109	1096	1131	1125	1108	4,9658	6,7139	4,9902	5,3467	4,79	6,1377
10	1133	1128	1139	1152	1158	1153	5,8594	5,21	6,958	5,3809	5,3955	6,2891
11	1055	1039	1037	1038	1038	1041	5,3174	5,8407	4,8779	5,6104	5,1953	4,7705
12	916	879	875	876	881	863	4,5947	4,9365	5,0244	5,0391	4,9316	5,0195
13	1371	1334	1312	1331	1326	1332	6,3525	6,167	5,8301	6,6113	6,3965	6,2256
14	1198	1069	1113	1109	1105	1087	5,6494	5,1465	5,2783	5,415	5,4736	5,8856
15	1347	1038	1054	1020	1030	1054	6,1865	5,0977	6,123	5,3662	4,6875	5,166
16	1049	1046	1088	1090	1094	1099	5,2051	5,1318	5,332	5,1367	5,5566	5,3369
17	623	604	604	611	602	606	4,8291	4,8096	4,751	4,79	4,8193	4,8242
18	702	670	663	661	657	669	5,2295	5,0439	5,0439	4,9951	5,1562	5,0439
19	603	595	603	611	622	630	4,7656	4,6826	4,6826	4,5996	4,6875	4,7754
20	558	546	544	546	543	544	4,5801	4,375	4,502	4,5215	4,5264	4,5654
21	834	821	807	803	797	804	5,2832	5,3467	5,0537	5,3149	5,2637	5,2686
22	715	715	715	719	708	708	4,8291	4,9268	5,0439	4,9609	4,9268	5,0098
23	659	645	635	640	644	652	4,7217	4,7217	4,8828	4,9219	4,8535	4,8877
24	774	770	764	767	751	753	5,2686	5,1025	5,249	5,1318	5,2588	5,2734
25	1391	1435	1450	1457	1455	1448	8,96	8,2154	8,7354	9,082	8,9165	8,4717
26	1235	1208	1203	1203	1196	1198	9,9805	8,125	6,9385	7,2803	7,3389	8,833
27	1154	1107	1110	1112	1106	1122	6,416	7,7979	7,6367	7,5977	7,7936	7,6611
28	1190	1183	1191	1194	1201	1192	8,2422	8,7793	8,4277	8,6621	8,5059	8,6165
29	1423	1353	1377	1419	1427	1431	8,3691	8,1641	8,0859	8,5158	8,4473	7,4365
30	1462	1463	1484	1549	1572	1427	8,5965	8,6816	8,7549	8,8965	9,1016	8,584
31	1345	1327	1333	1348	1369	1358	8,6523	8,0664	8,2568	8,5889	8,374	8,3447
32	1201	1217	1202	1217	1247	1248	7,9559	7,7783	7,7832	8,1104	8,1885	8,1494
33	805	786	803	794	791	791	3,5547	3,5791	3,5986	3,5107	3,584	3,5693
34	1065	1050	1045	1036	1043	1044	7,8076	7,7246	7,5537	7,5	7,5244	7,6416
35	425	423	425	429	433	432	3,2129	3,2568	3,2886	3,313	3,3325	3,3862
36	1412	1483	1442	1425	1476	1485	9,6191	4,4971	8,4961	9,0527	9,1016	8,6816
37	815	800	796	793	786	787	5,9424	5,9033	5,7764	5,8594	5,8496	5,957
38	996	1013	1030	1038	1060	1054	5,6396	5,8594	6,096	6,1816	6,5479	6,6064
39	1020	1017	1014	1021	1023	1019	5,9277	5,5762	5,6006	5,8887	5,918	5,5371
40	840	836	837	836	842	839	5,5225	5,4248	5,3662	5,5762	5,4492	5,6152
41	979	965	955	951	948	941	5,3613	5,6787	5,2979	5,4248	5,6055	5,4736
42	916	917	917	919	922	925	5,4004	5,6006	5,7568	5,8067	5,9277	5,6982
43	1027	1016	1025	1020	1021	1010	6,1279	6,084	5,6348	5,6836	5,9473	5,7227
44	862	842	832	832	832	832	5,3076	5,1221	5,166	5,2344	5,293	5,2295
45 (C)	924	919	918	922	921	931	5,8594	5,835	5,542	5,5029	5,9424	5,6982
46 (C)	975	952	933	922	920	917	5,6934	5,6201	5,4883	5,5957	5,9229	5,5908

Materiál 14220

Měření	F _{r1} [N]	F _{r2} [N]	F _{r3} [N]	F _{r4} [N]	F _{r5} [N]	F _{r6} [N]	M _{c1} [Nm]	M _{c2} [Nm]	M _{c3} [Nm]	M _{c4} [Nm]	M _{c5} [Nm]	M _{c6} [Nm]
1	983	930	943	925	949	928	3,3301	3,877	3,2617	3,6182	3,1689	3,3105
2	658	577	556	554	569	546	3,1494	3,4473	3,7402	3,0859	3,335	3,0664
3	522	507	513	504	512	515	2,8027	3,1494	3,1787	3,269	2,9858	3,0957
4	557	518	520	496	485	505	2,7783	3,0054	3,2031	3,1494	3,1714	3,3175
5	966	950	949	938	998	989	3,4229	3,6572	3,916	3,8379	3,6572	3,5791
6	668	804	826	915	913	848	3,0957	3,5156	3,7744	3,3545	3,3936	3,457
7	751	775	784	759	747	778	3,2959	3,418	3,3203	3,3057	3,252	3,1934
8	591	543	523	586	581	565	2,915	3,2715	3,186	3,3984	3,3545	3,1152
9	1800	1763	1745	1742	1749	1759	5,5078	5,8398	6,0498	5,0928	5,9375	5,354
10	1373	1357	1342	1395	1385	1375	5,6104	5,6201	5,5322	5,2881	5,1318	5,3467
11	1315	1272	1280	1294	1304	1313	4,6436	5,1709	4,8096	5,1025	5,835	5,1367
12	1004	1000	1092	1026	971	1043	4,9219	4,9902	4,9067	4,5557	4,585	4,6143
13	1516	1507	1509	1452	1463	1464	5,8495	5,5957	5,5829	5,5469	5,4346	5,4858
14	1093	1038	1124	1103	1161	1179	5,3223	5,9326	4,9414	5,3662	5,1465	6,2109
15	1045	1090	1047	1086	1054	1068	5,5615	4,502	5,4444	5,3589	4,585	5,6587
16	1129	1118	1166	1171	1136	1117	5,0732	4,6875	4,707	4,6582	4,7998	5,3857
17	941	734	975	980	967	972	4,7217	4,7559	4,7021	4,9609	4,9854	4,707
18	1242	1233	1190	1199	1100	1187	4,7705	4,8193	4,8877	5,5518	5,1512	5,3125
19	703	700	731	705	719	697	4,3994	4,9707	4,126	4,3701	4,1211	4,541
20	616	614	580	568	586	579	4,6631	4,7656	4,3408	4,5654	4,5264	4,7119
21	1213	1167	1156	1186	1167	1150	5,4102	5,5518	5,7617	5,7275	5,6592	5,3076
22	1089	1083	1017	1063	973	985	5,0879	5,4053	5,1465	4,9512	5,166	5,3076
23	666	639	679	652	751	775	4,7266	4,6289	4,7412	4,7363	5,332	5,21
24	764	729	746	695	752	749	4,7021	4,5312	4,668	4,7021	4,6777	4,9756
25	1907	1972	1903	1980	1985	1984	8,6719	8,9941	8,5742	8,4473	8,3356	8,9551
26	1662	1643	1650	1576	1551	1572	8,1836	7,8223	8,7402	8,7109	9,9121	8,1738
27	1448	1430	1425	1331	1429	1435	7,1533	7,2573	7,3437	7,0947	7,1874	7,583
28	1525	1518	1523	1587	1541	1516	7,6807	7,6416	7,4707	7,9492	7,9102	7,9687
29	1974	1910	1877	1969	1850	1857	8,3008	8,0566	7,832	8,2617	8,0469	8,2129
30	1916	1732	1902	1660	1932	1753	8,457	8,3594	8,3203	8,4473	8,3789	8,3887
31	1497	1477	1446	1458	1479	1483	8,0957	7,3047	7,9883	7,5879	7,5977	7,9297
32	1341	1308	1303	1191	1320	1331	7,1484	7,2021	6,9727	7,0068	6,9654	6,9727
33	886	896	871	895	877	880	3,6963	3,7012	3,8745	3,8647	3,7427	3,889
34	1620	1419	1437	1457	1490	1451	7,5635	7,7197	7,3486	7,8076	7,8076	7,5879
35	467	450	431	443	428	424	2,6855	2,9297	2,9443	3,0371	2,8662	2,9443
36	1577	1610	1543	1600	1580	1568	7,6562	7,7539	7,7148	7,6855	8,2306	7,5
37	1124	1157	1118	1141	1122	1115	5,2539	5,1514	5,4443	5,293	5,2686	5,4639
38	1116	1128	1139	1096	1137	1125	5,1807	5,6641	5,5469	5,459	5,4297	5,5859
39	1452	1368	1442	1380	1444	1488	5,708	6,3379	5,8594	6,2793	6,0205	5,6934
40	1015	1065	1071	1104	1082	1101	4,8486	4,6777	4,917	5,0293	5,1074	5,2931
41	1280	1293	1304	1308	1246	1262	5,7666	5,6885	5,6396	5,8984	5,874	5,5762
42	1192	1063	1157	1179	1162	1172	5,3271	5,1221	5,5322	5,127	5,8105	5,8008
43	1288	1300	1314	1249	1259	1276	5,7861	5,7031	5,4004	5,1807	5,4785	5,3369
44	1136	1109	1113	1101	1107	1100	5,1074	5,0732	5,3126	5,0732	5,1074	5,1904
45 (C)	1099	1135	1144	1044	1124	1139	5,0684	5,498	5,3174	5,1074	5,3564	5,1172
46 (C)	1128	1147	1091	1120	1090	1100	5,3271	5,4004	5,166	5,3613	5,3906	5,2734

Materiál 19313

Měření	F ₁₁ [N]	F ₁₂ [N]	F ₁₃ [N]	F ₁₄ [N]	F ₁₅ [N]	F ₁₆ [N]	M _{c1} [Nm]	M _{c2} [Nm]	M _{c3} [Nm]	M _{c4} [Nm]	M _{c5} [Nm]	M _{c6} [Nm]
1	1335	1281	1247	1250	1217	1222	5,1123	5,2051	5,1709	5,0293	4,9951	5,1416
2	972	956	901	983	881	868	4,0137	3,8232	3,9404	4,2187	4,0723	4,1553
3	999	1016	1027	975	1029	1035	3,8672	3,877	4,0381	4,0674	4,0137	4,1064
4	881	854	858	875	860	847	4,0039	4,0479	4,1455	4,1943	4,3506	4,2822
5	1215	1161	1169	1135	1183	1194	4,1553	4,292	3,999	4,1504	4,2432	4,2773
6	1165	1090	1132	1106	1100	1089	4,4434	4,2627	4,3799	4,5361	4,4141	4,4482
7	948	958	968	959	954	945	5,1318	4,9707	4,8437	5,022	4,8242	5,1514
8	808	801	798	806	806	810	3,7598	3,8818	3,9502	4,0332	4,0918	3,916
9	1901	1860	1845	1865	1821	1831	7,0312	6,9434	6,7676	6,5918	7,1191	7,0801
10	1855	1779	1797	1863	1763	1801	7,2363	7,002	7,4512	7,0996	7,1973	6,875
11	1789	1724	1708	1761	1715	1732	6,7017	7,3242	7,2559	6,8359	7,0117	7,2852
12	1527	1522	1453	1489	1468	1504	5,9717	6,3623	5,8398	6,2646	5,7227	6,0937
13	1873	1960	1848	1867	1857	1843	7,3878	7,1729	7,4512	7,4316	7,4512	7,8125
14	1556	1473	1531	1450	1462	1494	6,4844	6,6113	6,4648	5,918	6,604	5,9473
15	1423	1443	1450	1452	1414	1458	6,8701	6,4335	7,0801	6,6797	6,7432	6,6406
16	1551	1541	1579	1585	1559	1581	5,9229	6,001	6,3379	6,2744	6,2695	6,167
17	1405	1375	1379	1378	1368	1327	6,2818	6,2158	6,377	6,1426	6,8359	6,5137
18	1464	1448	1471	1441	1479	1452	7,3291	7,3633	7,2949	7,4561	7,5684	7,4805
19	1144	1122	1106	1109	1098	1117	6,3477	6,1914	6,4062	6,377	6,2695	6,4795
20	1017	1022	1021	1014	1012	996	6,0791	6,084	6,4014	6,4014	6,2744	6,2402
21	1450	1452	1441	1433	1387	1399	7,1094	7,2461	6,8652	7,041	6,9238	6,8066
22	1126	1142	1140	1130	1136	1148	5,9356	6,0107	6,0791	6,333	6,054	6,2842
23	1057	1072	1081	1091	1084	1087	6,0645	6,0107	6,3135	6,1377	6,4307	6,4307
24	1143	1140	1131	1129	1130	1143	6,3477	6,1377	6,3916	6,3379	6,3783	6,5918
25	2387	2399	2399	2365	2390	2285	13,3398	11,748	12,7148	12,8418	11,9238	13,1836
26	2094	2055	2001	2021	2016	2021	10,3809	11,3965	9,8145	10,3906	9,4824	10,6445
27	1923	1928	1896	1938	1970	1926	10,2539	9,6777	9,7363	9,8828	10,6836	9,8437
28	2111	2136	2187	2070	2075	2048	9,7461	9,3164	9,5898	9,8194	10,1562	10,3613
29	2087	2070	2111	2058	2106	2114	9,7559	9,8535	9,7559	11,2109	9,6094	9,9414
30	2343	2310	2277	2351	2316	2268	10,6348	11,0059	11,3184	10,8496	10,8984	11,3965
31	2011	1965	2016	1999	1894	1975	10,1074	11,7871	11,3184	10,1172	11,3086	9,6582
32	1665	1683	1670	1693	1677	1666	9,3457	8,6719	9,2676	9,375	9,7754	9,541
33	1241	1262	1245	1269	1200	1192	4,3652	4,6094	4,8828	4,585	5,1758	4,4141
34	2111	2109	2111	2033	2126	2041	10,2637	10,2051	9,6777	9,7949	9,668	10,0195
35	740	749	759	756	758	764	3,7842	4,1475	3,8574	3,9795	3,844	3,9697
36	2077	2158	2106	2021	2249	2089	9,6875	9,9609	10,7605	11,0254	9,0625	11,4551
37	1640	1617	1631	1625	1637	1623	7,7734	8,2324	7,4512	7,2461	7,4512	7,7246
38	1541	1592	1624	1549	1593	1531	6,8896	6,858	7,2168	7,0361	7,0557	6,9141
39	1755	1734	1755	1711	1687	1723	8,5352	8,0176	7,7051	7,3437	7,4414	7,6953
40	1510	1502	1492	1502	1435	1437	7,041	6,8457	7,002	6,6992	6,8457	7,0312
41	1702	1741	1721	1713	1780	1665	7,4316	7,2559	8,1445	8,1152	8,1641	7,7832
42	1580	1555	1571	1545	1583	1576	7,1484	7,334	7,1582	7,334	7,7734	7,6074
43	1685	1674	1705	1676	1692	1702	7,9639	7,8711	7,1387	7,0117	7,4316	6,9629
44	1489	1482	1476	1485	1484	1490	6,7456	6,5576	6,585	6,6211	6,7334	6,6016
45 (C)	1529	1527	1524	1532	1524	1526	7,5732	7,168	6,8676	7,0508	7,1289	6,9385
46 (C)	1528	1532	1525	1530	1495	1523	6,9385	7,0898	6,7871	6,8213	6,8457	7,085

Materiál 19573

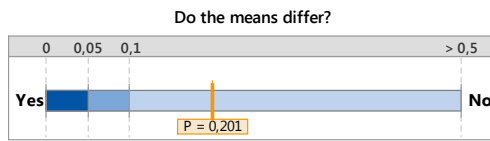
Měření	F _{f1} [N]	F _{f2} [N]	F _{f3} [N]	F _{f4} [N]	F _{f5} [N]	F _{f6} [N]	M _{c1} [Nm]	M _{c2} [Nm]	M _{c3} [Nm]	M _{c4} [Nm]	M _{c5} [Nm]	M _{c6} [Nm]
1	1015	1007	1008	1014	1006	1000	4,2529	4,1699	4,2871	4,2139	4,1406	3,9404
2	873	843	850	864	842	879	3,6035	3,8159	4,0649	4,231	3,6865	3,8086
3	817	798	808	812	813	844	3,5156	3,5156	3,3667	3,5547	3,7793	3,8477
4	816	803	808	816	809	822	3,3838	3,7891	3,8013	3,877	3,9307	4,0503
5	921	920	908	947	973	983	3,8916	3,5986	3,7402	3,8379	3,8672	3,999
6	873	860	861	874	873	902	3,6572	3,9673	4,1626	4,198	3,9307	3,8818
7	906	894	872	878	898	896	4,1846	4,043	3,9209	3,7891	3,9648	3,9062
8	742	749	770	779	777	779	3,2666	3,7183	3,8257	3,9233	3,584	3,5205
9	1749	1763	1467	1466	1483	1465	6,0742	5,376	5,332	6,0645	5,4838	5,6396
10	1406	1430	1401	1396	1454	1421	5,5273	5,5566	5,4346	6,2012	5,1074	4,9756
11	1394	1420	1365	1413	1398	1403	5,7373	5,5127	5,6982	6,2695	6,0742	5,7617
12	1217	1186	1130	1125	1219	1170	4,834	4,8389	4,8584	4,8828	5,0488	4,9219
13	1442	1406	1428	1424	1445	1400	5,6152	5,7715	5,0391	8,291	6,1182	4,7559
14	1266	1203	1220	1195	1193	1197	5,0635	5,127	5,1318	5,6543	5,1855	5,2783
15	1182	1152	1176	1162	1134	1191	4,9023	4,8926	4,8193	4,6924	5,1904	4,8047
16	1149	1166	1179	1194	1172	1166	5,1963	5,0439	5,166	5,0195	5,1221	4,9585
17	1029	1051	1052	1054	1066	1059	4,9414	5,0781	5,0732	5,2783	5,3271	5,2832
18	1103	1128	1117	1146	1146	1127	6,2793	6,2598	6,3623	6,7871	6,5771	6,3672
19	1022	1010	1026	1061	1085	1081	5,4199	5,1709	5,3418	5,5615	5,6689	5,4541
20	961	969	966	962	968	977	5,8008	5,8154	5,7178	5,6689	5,7422	5,8301
21	1077	1082	1103	1121	1096	1103	5,625	5,752	5,6201	5,6292	5,5225	5,6292
22	1030	1031	1030	1016	1025	1047	5,4004	5,4785	5,3271	5,1318	5,3906	5,542
23	965	985	977	1026	1067	1064	5,1172	5,3613	5,625	5,7764	6,3232	6,1572
24	976	988	1008	998	1025	1001	5,4199	5,2148	5,4053	5,4053	5,3711	5,4053
25	1857	1850	1811	1826	1811	1838	9,082	8,4863	9,209	9,248	9,3555	8,8281
26	1708	1615	1599	1591	1593	1596	8,125	8,5254	8,7109	8,5059	7,959	8,0957
27	1677	1563	1487	1541	1503	1506	8,5645	7,8516	7,9102	7,9395	8,2129	8,2715
28	1550	1546	1522	1520	1568	1551	9,0186	7,9883	8,3105	8,4277	8,8406	8,7012
29	1596	1638	1623	1578	1631	1616	7,9102	7,9492	7,8223	8,0664	8,1152	8,1055
30	1606	1597	1587	1546	1590	1584	8,2617	8,2959	8,3008	8,623	8,8672	8,8184
31	1474	1481	1467	1460	1442	1455	8,2227	8,2422	7,7051	7,998	8,1494	8,3789
32	1434	1415	1410	1368	1422	1401	7,5781	7,6025	7,9639	7,9541	8,1592	8,3105
33	990	1015	1019	1025	1012	1001	3,3789	3,9575	4,0186	4,2529	3,8379	3,6475
34	1464	1429	1370	1369	1374	1424	8,0176	7,9102	7,627	7,8809	7,9004	7,9395
35	828	840	836	839	841	852	3,54	3,5791	3,6572	3,7598	3,8574	3,8965
36	1650	1666	1663	1697	1700	1716	7,5977	7,4707	6,377	7,8027	7,5098	9,2578
37	1256	1269	1269	1273	1260	1262	6,3672	6,4209	6,6333	6,2988	6,2256	6,3037
38	1164	1165	1167	1170	1193	1198	5,5029	5,5859	5,835	5,7959	5,9229	5,8294
39	1262	1251	1234	1244	1278	1266	6,7383	5,6445	6,0059	6,1719	5,9961	5,7129
40	1086	1082	1083	1093	1111	1108	5,5957	5,4736	5,4248	5,564	5,7324	5,7764
41	1217	1230	1230	1218	1217	1222	6,5137	6,4014	6,1426	6,1523	6,3037	6,0352
42	1119	1131	1126	1139	1146	1157	5,6543	5,5762	5,9473	5,8154	6,0156	6,0547
43	1254	1230	1246	1245	1249	1239	6,3965	6,0791	5,6055	5,8008	5,8301	5,9863
44	1179	1147	1092	1083	1092	1133	5,5127	5,2588	5,2441	5,459	5,4883	5,3516
45 (C)	1181	1196	1170	1192	1205	1198	5,752	5,542	5,4687	5,6689	5,6445	5,4248
46 (C)	1252	1197	1199	1196	1173	1195	5,4541	5,8203	5,7715	5,625	5,4395	5,6543

PŘÍLOHA č. 6

Analýza centrálních bodů t-testem

Material 12050 F_f

2-Sample t Test for the Mean of pokus_45 and pokus_46 Summary Report



The mean of pokus_45 is not significantly different from the mean of pokus_46 ($p > 0,05$).

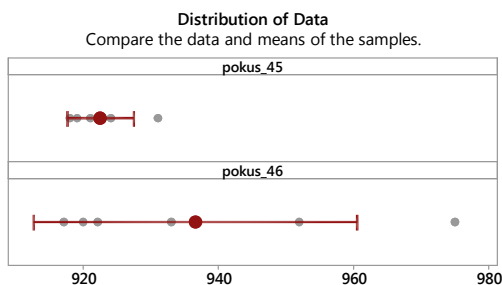
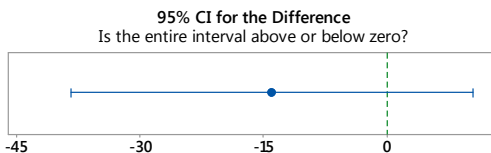
Statistics	Individual Samples	
	pokus_45	pokus_46
Sample size	6	6
Mean	922,5	936,5
95% CI	(917,6; 927,4)	(912,58; 960,42)
Standard deviation	4,6797	22,793

Statistics	Difference Between Samples	
		*Difference
Difference		-14
95% CI		(-38,418; 10,418)

*Difference = pokus_45 - pokus_46

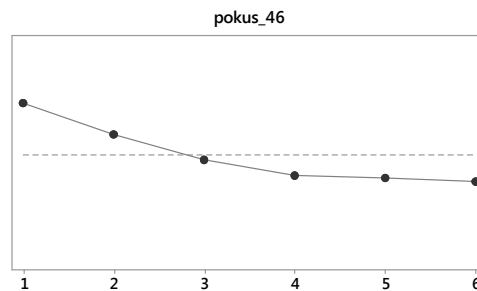
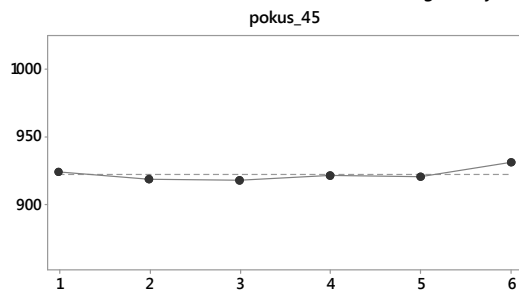
Comments

- Test: There is not enough evidence to conclude that the means differ at the 0,05 level of significance.
- CI: Quantifies the uncertainty associated with estimating the difference in means from sample data. You can be 95% confident that the true difference is between -38,418 and 10,418.
- Distribution of Data: Compare the location and means of samples. Look for unusual data before interpreting the results of the test.

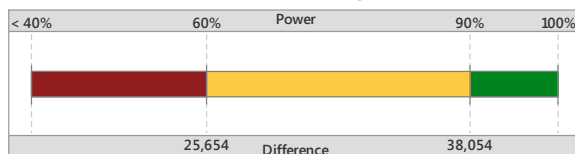


2-Sample t Test for the Mean of pokus_45 and pokus_46 Diagnostic Report

Data in Worksheet Order
Investigate any outliers (marked in red).



What is the chance of detecting a difference?



For $\alpha = 0,05$ and sample sizes = 6:
If the true means differed by 25,654, you would have a 60% chance of detecting the difference. If they differed by 38,054, you would have a 90% chance.

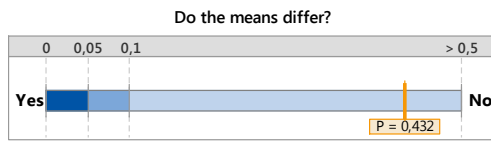
What difference can you detect with your sample sizes of 6?

Difference	Power
25,654	60%
28,894	70%
32,713	80%
38,054	90%

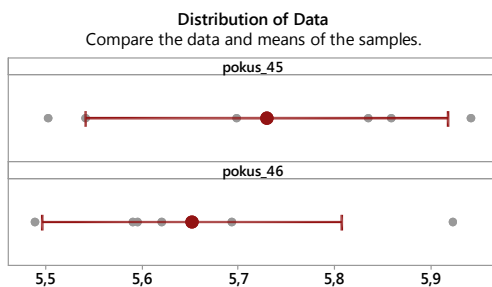
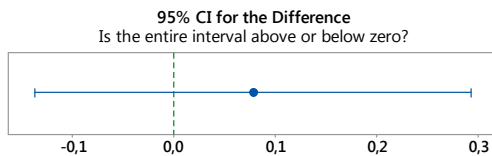
Observed difference = -14

Power is a function of the sample sizes and the standard deviations. To detect smaller differences, consider increasing the sample sizes.

2-Sample t Test for the Mean of pokus_45 and pokus_46 Summary Report



The mean of pokus_45 is not significantly different from the mean of pokus_46 ($p > 0,05$).



Statistics	pokus_45	pokus_46
Sample size	6	6
Mean	5,7300	5,6519
95% CI	(5,542; 5,918)	(5,4963; 5,8074)
Standard deviation	0,17934	0,14821

Statistics	*Difference
Difference	0,078117
95% CI	(-0,13675; 0,29298)

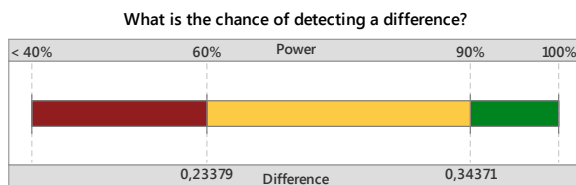
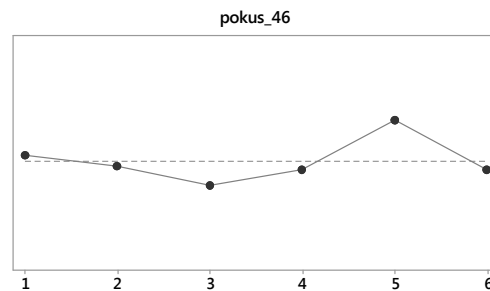
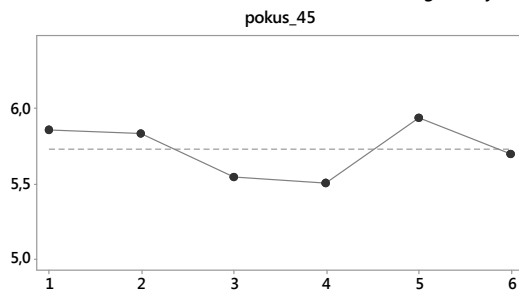
*Difference = pokus_45 - pokus_46

Comments

- Test: There is not enough evidence to conclude that the means differ at the 0,05 level of significance.
- CI: Quantifies the uncertainty associated with estimating the difference in means from sample data. You can be 95% confident that the true difference is between -0,13675 and 0,29298.
- Distribution of Data: Compare the location and means of samples. Look for unusual data before interpreting the results of the test.

2-Sample t Test for the Mean of pokus_45 and pokus_46 Diagnostic Report

Data in Worksheet Order
Investigate any outliers (marked in red).



For $\alpha = 0,05$ and sample sizes = 6:
If the true means differed by 0,23379, you would have a 60% chance of detecting the difference. If they differed by 0,34371, you would have a 90% chance.

What difference can you detect with your sample sizes of 6?

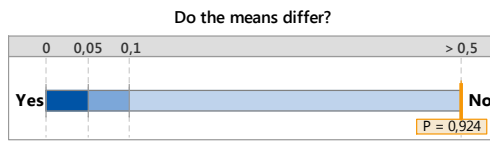
Difference	Power
0,23379	60%
0,26269	70%
0,29658	80%
0,34371	90%

Observed difference = 0,078117

Power is a function of the sample sizes and the standard deviations. To detect smaller differences, consider increasing the sample sizes.

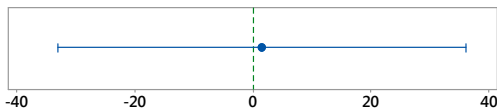
Material 14 220 F_f

2-Sample t Test for the Mean of 45 (C) and 46 (C) Summary Report

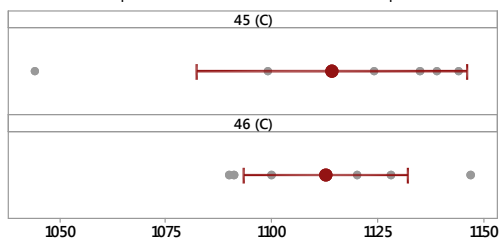


The mean of 45 (C) is not significantly different from the mean of 46 (C) ($p > 0,05$).

95% CI for the Difference
Is the entire interval above or below zero?



Distribution of Data
Compare the data and means of the samples.



Statistics	45 (C)	46 (C)
Sample size	7	7
Mean	1114,2	1112,7
95% CI	(1082; 1146)	(1093,4; 1132,0)
Standard deviation	34,619	20,862

Difference Between Samples

Statistics	*Difference
Difference	1,5
95% CI	(-33,059; 36,059)

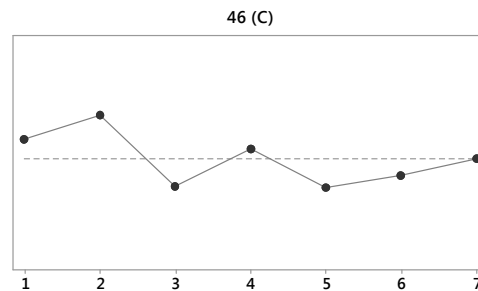
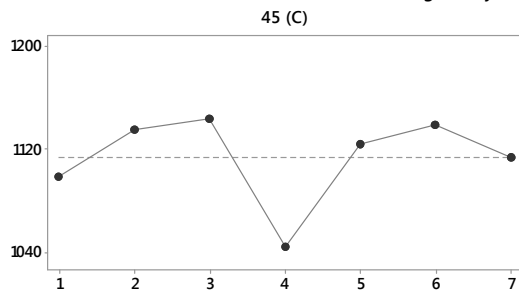
*Difference = 45 (C) - 46 (C)

Comments

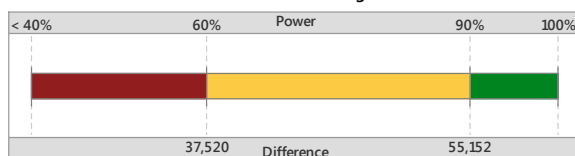
- Test: There is not enough evidence to conclude that the means differ at the 0,05 level of significance.
- CI: Quantifies the uncertainty associated with estimating the difference in means from sample data. You can be 95% confident that the true difference is between -33,059 and 36,059.
- Distribution of Data: Compare the location and means of samples. Look for unusual data before interpreting the results of the test.

2-Sample t Test for the Mean of 45 (C) and 46 (C) Diagnostic Report

Data in Worksheet Order
Investigate any outliers (marked in red).



What is the chance of detecting a difference?



For $\alpha = 0,05$ and sample sizes = 7:
If the true means differed by 37,520, you would have a 60% chance of detecting the difference. If they differed by 55,152, you would have a 90% chance.

What difference can you detect with your sample sizes of 7?

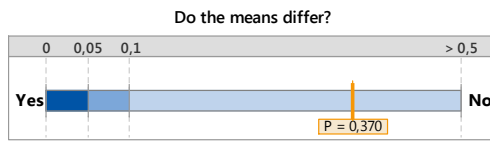
Difference	Power
37,520	60%
42,156	70%
47,593	80%
55,152	90%

Observed difference = 1,5

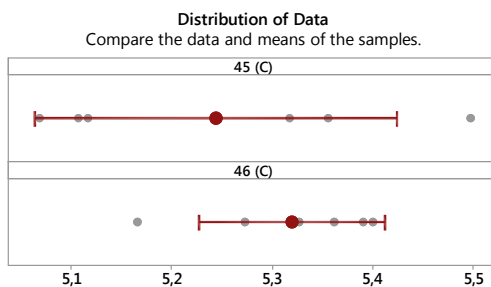
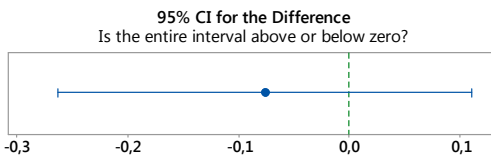
Power is a function of the sample sizes and the standard deviations. To detect smaller differences, consider increasing the sample sizes.

Material 14 220 M_c

2-Sample t Test for the Mean of 45 (C) and 46 (C) Summary Report



The mean of 45 (C) is not significantly different from the mean of 46 (C) ($p > 0,05$).



		Individual Samples	
Statistics		45 (C)	46 (C)
Sample size		6	6
Mean		5,2441	5,3198
95% CI		(5,064; 5,425)	(5,2270; 5,4126)
Standard deviation		0,17211	0,088422

		Difference Between Samples
Statistics		*Difference
Difference		-0,075667
95% CI		(-0,26246; 0,11112)

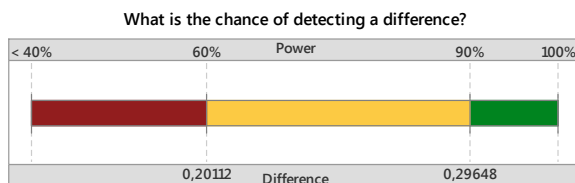
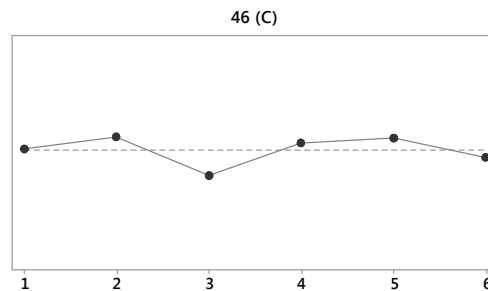
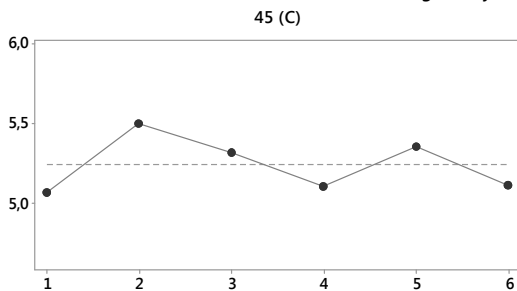
*Difference = 45 (C) - 46 (C)

Comments

- Test: There is not enough evidence to conclude that the means differ at the 0,05 level of significance.
- CI: Quantifies the uncertainty associated with estimating the difference in means from sample data. You can be 95% confident that the true difference is between -0,26246 and 0,11112.
- Distribution of Data: Compare the location and means of samples. Look for unusual data before interpreting the results of the test.

2-Sample t Test for the Mean of 45 (C) and 46 (C) Diagnostic Report

Data in Worksheet Order
Investigate any outliers (marked in red).



For $\alpha = 0,05$ and sample sizes = 6:
If the true means differed by 0,20112, you would have a 60% chance of detecting the difference. If they differed by 0,29648, you would have a 90% chance.

What difference can you detect with your sample sizes of 6?

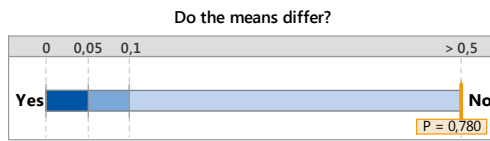
Difference	Power
0,20112	60%
0,22615	70%
0,25554	80%
0,29648	90%

Observed difference = -0,075667

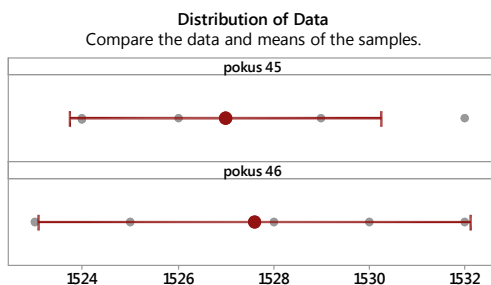
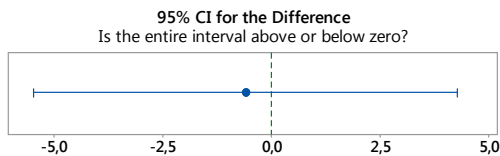
Power is a function of the sample sizes and the standard deviations. To detect smaller differences, consider increasing the sample sizes.

Material 19 313 F_f

2-Sample t Test for the Mean of pokus 45 and pokus 46 Summary Report



The mean of pokus 45 is not significantly different from the mean of pokus 46 ($p > 0,05$).



Statistics	Individual Samples	
	pokus 45	pokus 46
Sample size	6	5
Mean	1527	1527,6
95% CI	(1524; 1530)	(1523,1; 1532,1)
Standard deviation	3,0984	3,6469

Statistics	*Difference
Difference	-0,6
95% CI	(-5,4805; 4,2805)

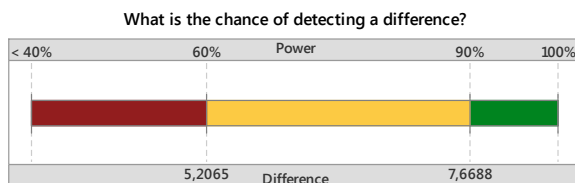
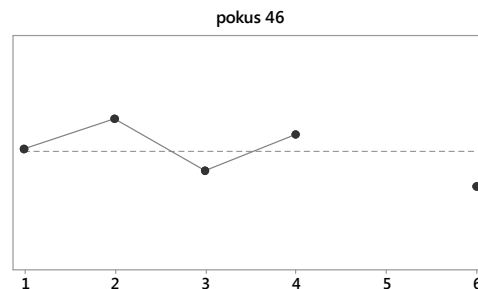
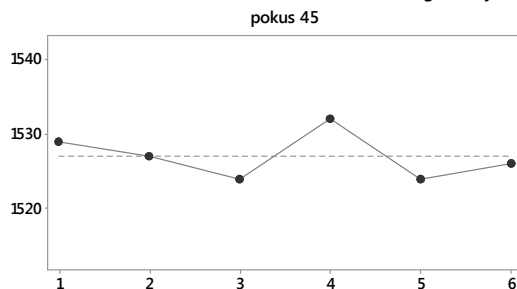
*Difference = pokus 45 - pokus 46

Comments

- Test: There is not enough evidence to conclude that the means differ at the 0,05 level of significance.
- CI: Quantifies the uncertainty associated with estimating the difference in means from sample data. You can be 95% confident that the true difference is between -5,4805 and 4,2805.
- Distribution of Data: Compare the location and means of samples. Look for unusual data before interpreting the results of the test.

2-Sample t Test for the Mean of pokus 45 and pokus 46 Diagnostic Report

Data in Worksheet Order
Investigate any outliers (marked in red).



For $\alpha = 0,05$ and sample sizes = 6; 5:
If the true means differed by 5,2065, you would have a 60% chance of detecting the difference. If they differed by 7,6688, you would have a 90% chance.

What difference can you detect with your sample sizes of 6 and 5?

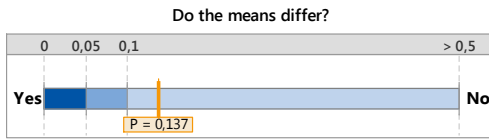
Difference	Power
5,2065	60%
5,8530	70%
6,6120	80%
7,6688	90%

Observed difference = -0,6

Power is a function of the sample sizes and the standard deviations. To detect smaller differences, consider increasing the sample sizes.

Material 19 313 M_c

**2-Sample t Test for the Mean of pokus 45 and pokus 46
Summary Report**



The mean of pokus 45 is not significantly different from the mean of pokus 46 ($p > 0,05$).

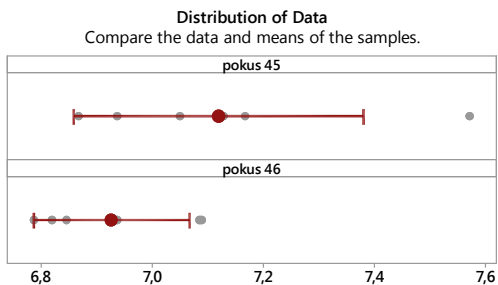
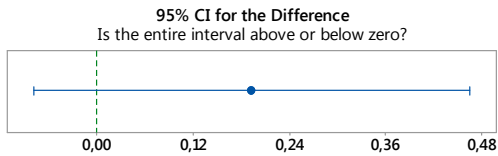
		Individual Samples	
Statistics		pokus 45	pokus 46
Sample size		6	6
Mean		7,1212	6,9279
95% CI		(6,860; 7,382)	(6,7879; 7,0679)
Standard deviation		0,24868	0,13338

		Difference Between Samples
Statistics		*Difference
Difference		0,19327
95% CI		(-0,079145; 0,46568)

*Difference = pokus 45 - pokus 46

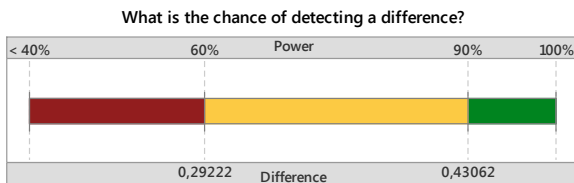
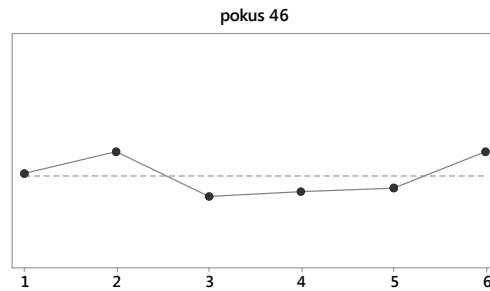
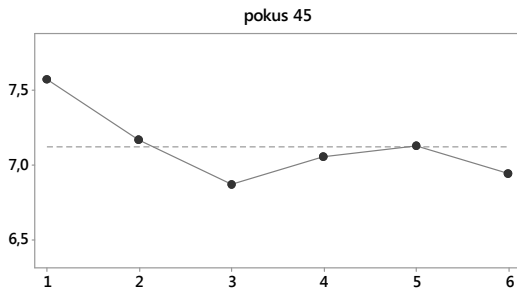
Comments

- Test: There is not enough evidence to conclude that the means differ at the 0,05 level of significance.
- CI: Quantifies the uncertainty associated with estimating the difference in means from sample data. You can be 95% confident that the true difference is between -0,079145 and 0,46568.
- Distribution of Data: Compare the location and means of samples. Look for unusual data before interpreting the results of the test.



**2-Sample t Test for the Mean of pokus 45 and pokus 46
Diagnostic Report**

Data in Worksheet Order
Investigate any outliers (marked in red).



For $\alpha = 0,05$ and sample sizes = 6:
If the true means differed by 0,29222, you would have a 60% chance of detecting the difference. If they differed by 0,43062, you would have a 90% chance.

What difference can you detect with your sample sizes of 6?

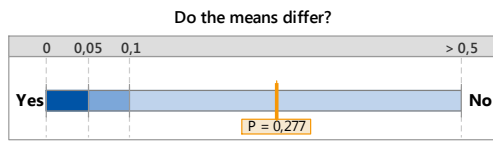
Difference	Power
0,29222	60%
0,32854	70%
0,37120	80%
0,43062	90%

Observed difference = 0,19327

Power is a function of the sample sizes and the standard deviations. To detect smaller differences, consider increasing the sample sizes.

Material 19573 F_f

**2-Sample t Test for the Mean of pokus 45 and pokus 46
Summary Report**



The mean of pokus 45 is not significantly different from the mean of pokus 46 ($p > 0,05$).

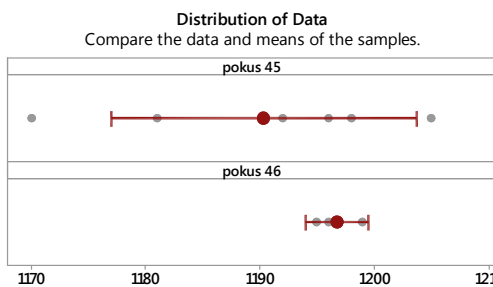
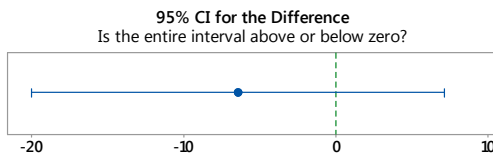
Statistics	Individual Samples	
	pokus 45	pokus 46
Sample size	6	4
Mean	1190,3	1196,8
95% CI	(1177; 1204)	(1194,0; 1199,5)
Standard deviation	12,723	1,7078

Statistics	*Difference
	Difference
95% CI	(-19,948; 7,1142)

*Difference = pokus 45 - pokus 46

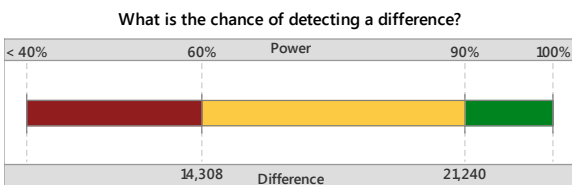
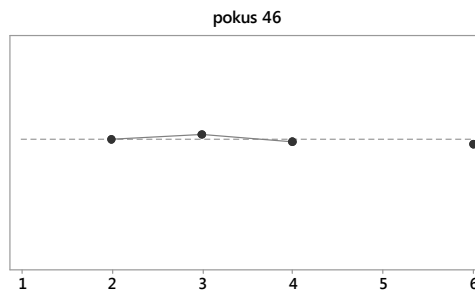
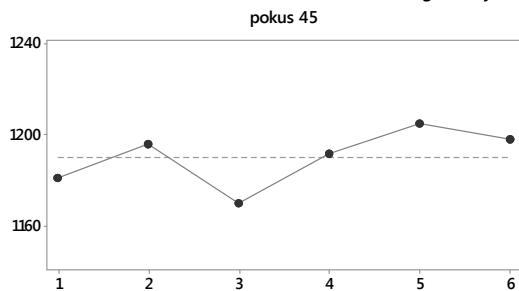
Comments

- Test: There is not enough evidence to conclude that the means differ at the 0,05 level of significance.
- CI: Quantifies the uncertainty associated with estimating the difference in means from sample data. You can be 95% confident that the true difference is between -19,948 and 7,1142.
- Distribution of Data: Compare the location and means of samples. Look for unusual data before interpreting the results of the test.



**2-Sample t Test for the Mean of pokus 45 and pokus 46
Diagnostic Report**

Data in Worksheet Order
Investigate any outliers (marked in red).



For $\alpha = 0,05$ and sample sizes = 6; 4:
If the true means differed by 14,308, you would have a 60% chance of detecting the difference. If they differed by 21,240, you would have a 90% chance.

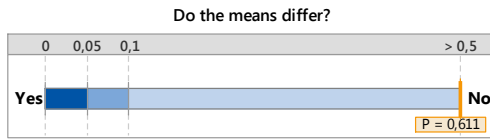
What difference can you detect with your sample sizes of 6 and 4?

Difference	Power
14,308	60%
16,118	70%
18,253	80%
21,240	90%

Observed difference = -6,4167

Power is a function of the sample sizes and the standard deviations. To detect smaller differences, consider increasing the sample sizes.

2-Sample t Test for the Mean of pokus 45 and pokus 46 Summary Report



The mean of pokus 45 is not significantly different from the mean of pokus 46 ($p > 0,05$).

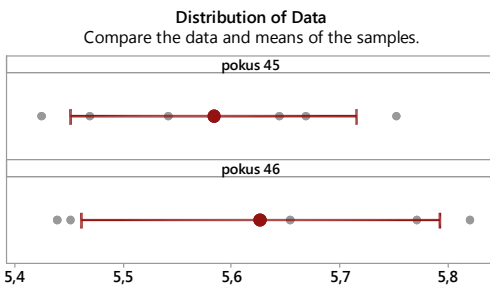
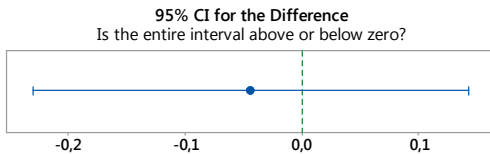
Statistics	pokus 45	pokus 46
Sample size	6	6
Mean	5,5835	5,6269
95% CI	(5,451; 5,716)	(5,4610; 5,7929)
Standard deviation	0,12609	0,15817

Statistics	*Difference
Difference	-0,043467
95% CI	(-0,23028; 0,14334)

*Difference = pokus 45 - pokus 46

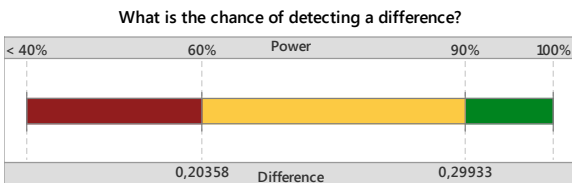
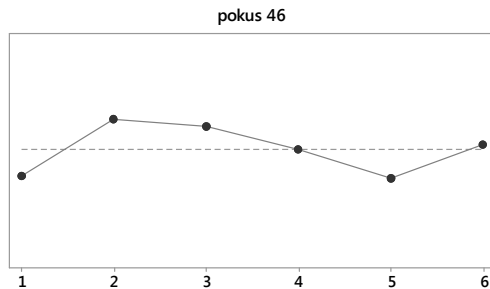
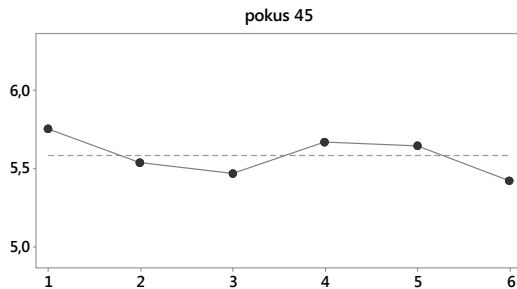
Comments

- Test: There is not enough evidence to conclude that the means differ at the 0,05 level of significance.
- CI: Quantifies the uncertainty associated with estimating the difference in means from sample data. You can be 95% confident that the true difference is between -0,23028 and 0,14334.
- Distribution of Data: Compare the location and means of samples. Look for unusual data before interpreting the results of the test.



2-Sample t Test for the Mean of pokus 45 and pokus 46 Diagnostic Report

Data in Worksheet Order
Investigate any outliers (marked in red).



For $\alpha = 0,05$ and sample sizes = 6:
If the true means differed by 0,20358, you would have a 60% chance of detecting the difference. If they differed by 0,29933, you would have a 90% chance.

What difference can you detect with your sample sizes of 6?

Difference	Power
0,20358	60%
0,22875	70%
0,25827	80%
0,29933	90%

Observed difference = -0,043467

Power is a function of the sample sizes and the standard deviations. To detect smaller differences, consider increasing the sample sizes.

PŘÍLOHA č. 7

**Úplné tabulky odhadu parametrů predikčních modelu posuvové síly F_f
a krouticího momentu M_c**

Parameter Estimates F, 12050							
Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t	Lower 95%	Upper 95%	VIF
Intercept	920,85233	4,430376	207,85	<,0001	911,82795	929,87671	.
x2	291,49378	3,020818	96,49	<,0001	285,34057	297,64698	1
x1	79,14587	3,020818	26,2	<,0001	72,992664	85,299076	1
x3	59,165235	3,020818	19,59	<,0001	53,012029	65,318441	1
x4	-56,02979	3,020818	-18,55	<,0001	-62,18299	-49,87658	1
x6	-51,35963	3,020818	-17	<,0001	-57,51283	-45,20642	1
x5	-16,06986	3,020818	-5,32	<,0001	-22,22307	-9,916654	1
x2*x1	24,404188	3,307704	7,38	<,0001	17,666614	31,141761	1
x3*x3	-10,38511	4,156279	-2,5	0,0178	-18,85118	-1,919048	1
x2*x4	-25,98019	3,307704	-7,85	<,0001	-32,71776	-19,24261	1
x2*x6	-13,03119	3,307704	-3,94	0,0004	-19,76876	-6,293614	1
x2*x5	-15,92088	3,307704	-4,81	<,0001	-22,65845	-9,183302	1
x4*x5	9,4291875	3,307704	2,85	0,0076	2,6916144	16,166761	1
x2*x4*x6	8,5239375	3,307704	2,58	0,0148	1,7863644	15,261511	1
Parameter Estimates F, 14220							
Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t	Lower 95%	Upper 95%	VIF
Intercept	1185,312	13,06687	90,71	<,0001	1158,5872	1212,0367	.
x2	329,1925	8,909546	36,95	<,0001	310,97043	347,41457	1
x4	-103,9687	21,8714	-4,75	<,0001	-148,7008	-59,23672	6,026177
x1	135,37406	8,909546	15,19	<,0001	117,15199	153,59612	1
x6	-59,18216	8,909546	-6,64	<,0001	-77,40422	-40,96009	1
x5	-56,41032	8,909546	-6,33	<,0001	-74,63238	-38,18825	1
x2*x2	-60,66077	12,25845	-4,95	<,0001	-85,73212	-35,58941	1
x2*x1	39,5	9,755681	4,05	0,0004	19,547391	59,452609	1
x4*x1	-36,5	9,755681	-3,74	0,0008	-56,45261	-16,54739	1
x4*x5	31,1875	9,755681	3,2	0,0033	11,234891	51,140109	1
x1*x5	41,875	9,755681	4,29	0,0002	21,922391	61,827609	1
x6*x5	-25,875	9,755681	-2,65	0,0128	-45,82761	-5,922391	1
x2*x3	-39,3125	9,755681	-4,03	0,0004	-59,26511	-19,35989	1
x2*x2*x4	-61,84375	23,94851	-2,58	0,0151	-110,824	-12,86354	6,026177
x2*x4*x5	25,1875	9,755681	2,58	0,0151	5,2348915	45,140109	1
x4*x1*x5	-29,75	9,755681	-3,05	0,0049	-49,70261	-9,797391	1
x4*x6*x5	33,375	9,755681	3,42	0,0019	13,422391	53,327609	1

Parameter Estimates F _r 19313							
Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t	Lower 95%	Upper 95%	VIF
Intercept	1606,0027	18,44567	87,07	<,0001	1568,4301	1643,5753	.
x2	373,88172	10,31592	36,24	<,0001	352,86887	394,89456	1
x1	245,25611	25,32381	9,68	<,0001	193,67321	296,83902	6,026177
x4	-109,892	10,31592	-10,65	<,0001	-130,9048	-88,87913	1
x6	-75,81492	10,31592	-7,35	<,0001	-96,82776	-54,80207	1
x5	-52,14938	10,31592	-5,06	<,0001	-73,16222	-31,13653	1
x3	-32,22579	10,31592	-3,12	0,0038	-53,23863	-11,21294	1
x2*x2	-147,5209	30,01796	-4,91	<,0001	-208,6655	-86,37628	4,472869
x2*x1	50,939594	11,29562	4,51	<,0001	27,931168	73,948019	1
x2*x6	-29,13334	11,29562	-2,58	0,0147	-52,14177	-6,124918	1
x6*x5	-31,85628	11,29562	-2,82	0,0082	-54,86471	-8,847856	1
x2*x3	-23,34584	11,29562	-2,07	0,0469	-46,35427	-0,337418	1
x2*x2*x1	-92,56645	27,7288	-3,34	0,0021	-149,0482	-36,08474	6,026177
x2*x2*x2*x2	29,516172	10,12926	2,91	0,0065	8,8835349	50,14881	4,472869

Parameter Estimates F _r 19573							
Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t	Lower 95%	Upper 95%	VIF
Intercept	1184,4813	5,884469	201,29	<,0001	1172,4798	1196,4827	.
x2	240,35804	4,012281	59,91	<,0001	232,17493	248,54114	1
x1	110,32023	4,012281	27,5	<,0001	102,13713	118,50333	1
x4	-58,46843	4,012281	-14,57	<,0001	-66,65153	-50,28533	1
x5	-36,50921	4,012281	-9,1	<,0001	-44,69231	-28,32611	1
x6	-33,41699	4,012281	-8,33	<,0001	-41,60009	-25,23389	1
x3	-31,30367	4,012281	-7,8	<,0001	-39,48677	-23,12057	1
x2*x2	17,26397	5,520411	3,13	0,0038	6,0050172	28,522922	1
x2*x1	24,79375	4,393325	5,64	<,0001	15,833504	33,753996	1
x2*x4	-18,775	4,393325	-4,27	0,0002	-27,73525	-9,814754	1
x2*x5	-12,1125	4,393325	-2,76	0,0097	-21,07275	-3,152254	1
x1*x5	13,69375	4,393325	3,12	0,0039	4,7335043	22,653996	1
x2*x3	-27,40625	4,393325	-6,24	<,0001	-36,3665	-18,446	1
x6*x3	10,55625	4,393325	2,4	0,0224	1,5960043	19,516496	1
x1*x4*x6	10,45	4,393325	2,38	0,0237	1,4897543	19,410246	1

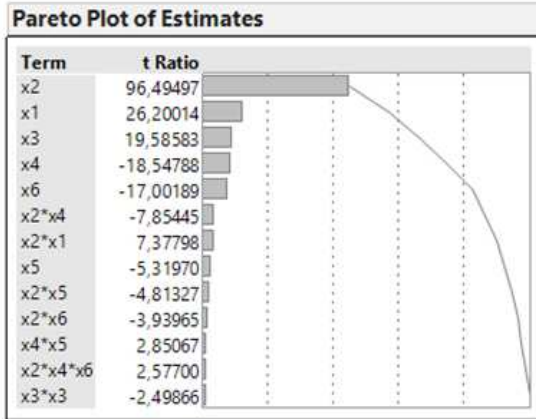
Parameter Estimates M _c 12050							
Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t	Lower 95%	Upper 95%	VIF
Intercept	5,7907067	0,062984	91,94	<,0001	5,6629701	5,9184434	.
x2	1,2009613	0,066043	18,18	<,0001	1,0670204	1,3349022	3,812914
x1	1,0524507	0,033822	31,12	<,0001	0,9838569	1,1210445	1
x6	-0,176571	0,033822	-5,22	<,0001	-0,245165	-0,107977	1
x4	-0,113194	0,033822	-3,35	0,0019	-0,181788	-0,0446	1
x3	0,0960695	0,033822	2,84	0,0074	0,0274758	0,1646633	1
x2*x1	0,3584688	0,037034	9,68	<,0001	0,2833607	0,4335768	1
x6*x6	-0,098365	0,046535	-2,11	0,0415	-0,192742	-0,003988	1
x4*x4	-0,102135	0,046535	-2,19	0,0347	-0,196511	-0,007758	1
x2*x2*x2	0,12382	0,041639	2,97	0,0052	0,0393723	0,2082676	3,812914

Parameter Estimates M _c 14220							
Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t	Lower 95%	Upper 95%	VIF
Intercept	5,376327	0,02891	185,97	<,0001	5,31775	5,4349039	.
x2	1,2652853	0,031655	39,97	<,0001	1,2011453	1,3294252	1
x1	1,0643813	0,031655	33,62	<,0001	1,0002414	1,1285213	1
x4	-0,292001	0,031655	-9,22	<,0001	-0,35614	-0,227861	1
x6	-0,069672	0,031655	-2,2	0,0341	-0,133812	-0,005532	1
x2*x1	0,2803647	0,034662	8,09	<,0001	0,2101334	0,350596	1
x2*x4	-0,090597	0,034662	-2,61	0,0129	-0,160828	-0,020366	1
x1*x4	-0,086275	0,034662	-2,49	0,0174	-0,156506	-0,016043	1
x2*x3	-0,09029	0,034662	-2,6	0,0132	-0,160522	-0,020059	1
Parameter Estimates M _c 19313							
Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t	Lower 95%	Upper 95%	VIF
Intercept	7,089813	0,054498	130,09	<,0001	6,9793888	7,2002373	.
x2	1,6193774	0,059674	27,14	<,0001	1,4984663	1,7402886	1
x1	1,4681161	0,059674	24,6	<,0001	1,347205	1,5890272	1
x6	-0,32239	0,059674	-5,4	<,0001	-0,443302	-0,201479	1
x4	-0,255986	0,059674	-4,29	0,0001	-0,376897	-0,135075	1
x5	-0,189505	0,059674	-3,18	0,003	-0,310416	-0,068594	1
x2*x1	0,3871937	0,065341	5,93	<,0001	0,2547998	0,5195877	1
x6*x4	0,1499063	0,065341	2,29	0,0276	0,0175123	0,2823002	1
x4*x3	0,1349125	0,065341	2,06	0,046	0,0025185	0,2673065	1
Parameter Estimates M _c 19573							
Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t	Lower 95%	Upper 95%	VIF
Intercept	5,7859065	0,026804	215,86	<,0001	5,7314908	5,8403222	.
x1	1,1879387	0,02935	40,48	<,0001	1,1283552	1,2475222	1
x2	1,0453922	0,02935	35,62	<,0001	0,9858086	1,1049757	1
x6	-0,158077	0,02935	-5,39	<,0001	-0,217661	-0,098494	1
x3	-0,119199	0,02935	-4,06	0,0003	-0,178783	-0,059616	1
x4	-0,1075	0,02935	-3,66	0,0008	-0,167083	-0,047916	1
x1*x2	0,3165437	0,032137	9,85	<,0001	0,2513016	0,3817859	1
x2*x3	-0,066556	0,032137	-2,07	0,0458	-0,131798	-0,001314	1
x1*x5	0,0803438	0,032137	2,5	0,0173	0,0151016	0,1455859	1
x1*x6*x4	0,1240562	0,032137	3,86	0,0005	0,0588141	0,1892984	1
x2*x6*x4	-0,078375	0,032137	-2,44	0,02	-0,143617	-0,013133	1

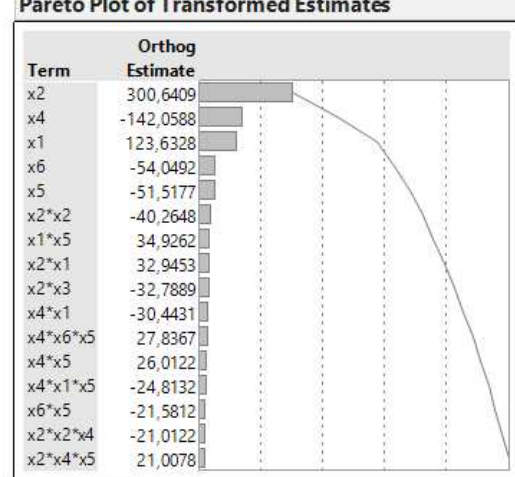
PŘÍLOHA č. 8

Paretovy diagramy vlivu členů modelu na F_f

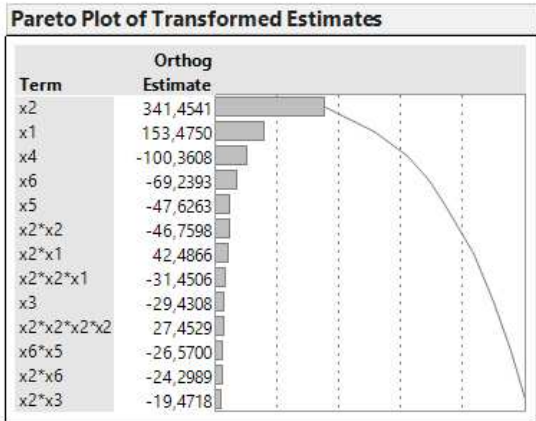
F_r 12050



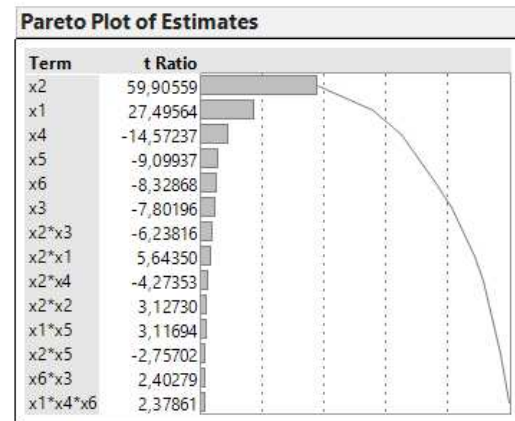
F_r 14220



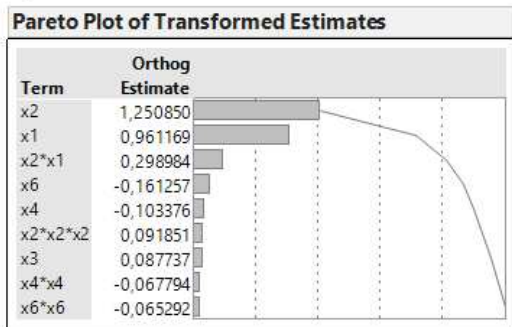
F_r 19313



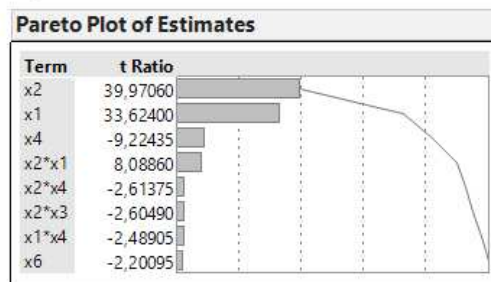
F_r 19573



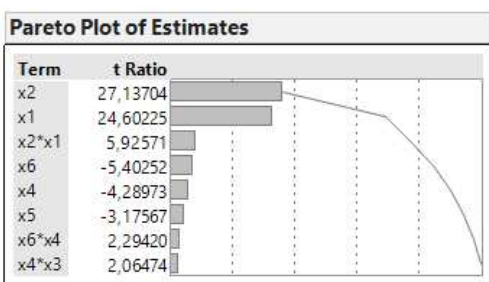
M_c 12050



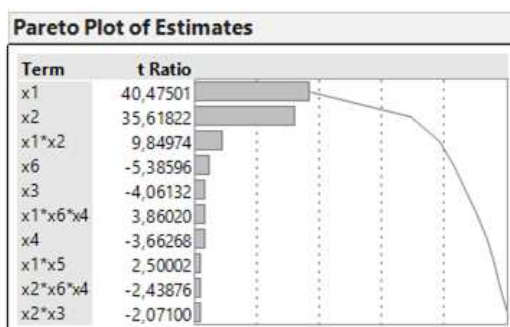
M_c 14220



M_c 19313



M_c 19573

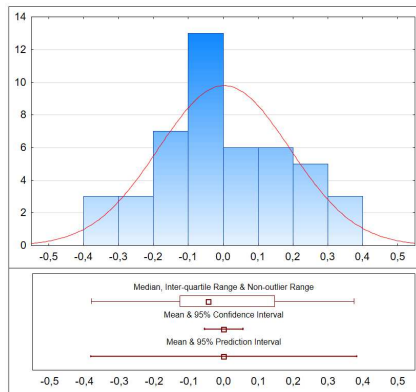


PŘÍLOHA č. 9

Shapiro-Wilkův test pro rezidua posuvové síly a krouticího momentu

Materiál 12050 – posuvová síla F_f

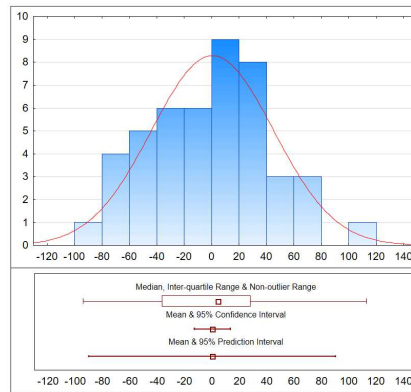
Graphical Summary for Reziđuá Ff



Shapiro-Wilk p: 0,447
 Mean: 1,74e-011
 Std.Dev.: 0,187
 Variance: 0,0351
 Std.Err.Mean: 0,0276
 Skewness: 0,170
 Valid N: 46,00
 Minimum: -0,381
 Lower Quartile: -0,126
 Median: -0,0457
 Upper Quartile: 0,146
 Maximum: 0,374
 95% Confidence for Std Dev
 Lower: 0,155
 Upper: 0,236
 95% Confidence for Mean
 Lower: -0,0556
 Upper: 0,0556
 95% Prediction for Observation
 Lower: -0,381
 Upper: 0,381

Materiál 14220 – posuvová síla F_f

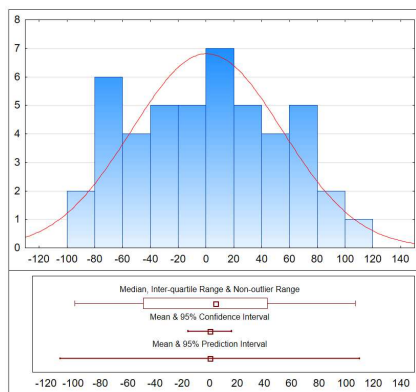
Graphical Summary for 14220_Ff_reziđuá



Shapiro-Wilk p: 0,930
 Mean: 4,98e-010
 Std.Dev.: 44,30
 Variance: 1963
 Std.Err.Mean: 6,532
 Skewness: 0,0993
 Valid N: 46,00
 Minimum: -94,31
 Lower Quartile: -36,55
 Median: 4,293
 Upper Quartile: 27,63
 Maximum: 113
 95% Confidence for Std Dev
 Lower: 36,75
 Upper: 55,80
 95% Confidence for Mean
 Lower: -13,16
 Upper: 13,16
 95% Prediction for Observation
 Lower: -90,19
 Upper: 90,19

Materiál 19313 – posuvová síla F_f

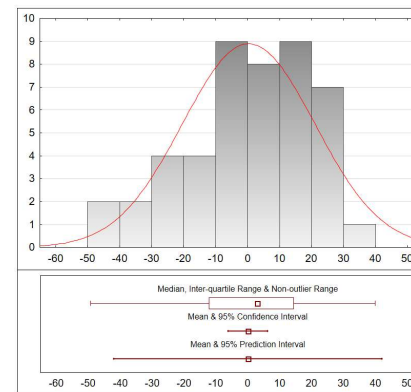
Graphical Summary for 19 313 Ff Reziđuá



Shapiro-Wilk p: 0,497
 Mean: -4,67e-010
 Std.Dev.: 53,88
 Variance: 2903
 Std.Err.Mean: 7,945
 Skewness: 0,0337
 Valid N: 46,00
 Minimum: -98,70
 Lower Quartile: -48,62
 Median: 4,347
 Upper Quartile: 41,93
 Maximum: 106
 95% Confidence for Std Dev
 Lower: 44,69
 Upper: 67,87
 95% Confidence for Mean
 Lower: -16,00
 Upper: 16,00
 95% Prediction for Observation
 Lower: -110
 Upper: 110

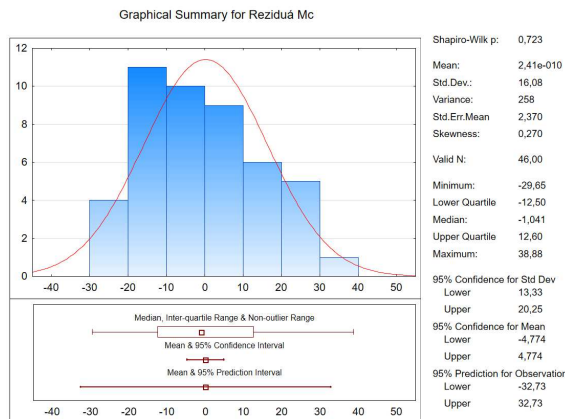
Materiál 19573 – posuvová síla F_f

Graphical Summary for Reziđuá-19 357 Ff

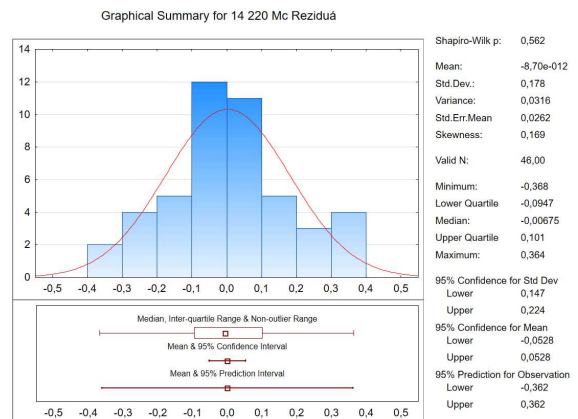


Shapiro-Wilk p: 0,454
 Mean: 2,57e-010
 Std.Dev.: 20,63
 Variance: 425
 Std.Err.Mean: 3,041
 Skewness: -0,418
 Valid N: 46,00
 Minimum: -49,20
 Lower Quartile: -12,18
 Median: 3,024
 Upper Quartile: 14,37
 Maximum: 39,87
 95% Confidence for Std Dev
 Lower: 17,11
 Upper: 25,98
 95% Confidence for Mean
 Lower: -6,126
 Upper: 6,126
 95% Prediction for Observation
 Lower: -41,99
 Upper: 41,99

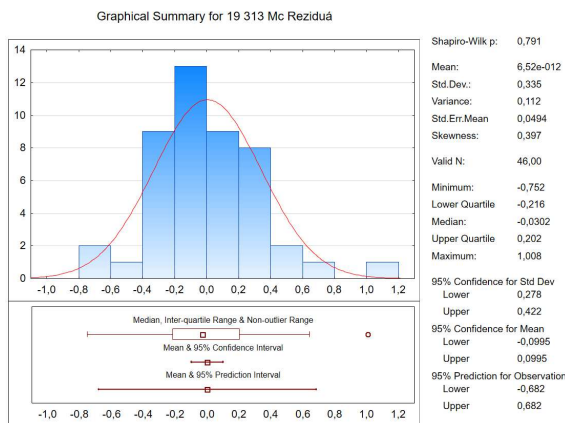
Materiál 12050 – krouťací moment M_c



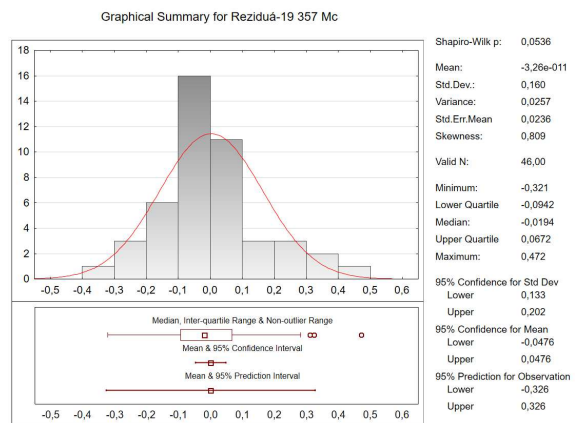
Materiál 14220 – krouťací moment M_c



Materiál 19313 – krouťací moment M_c



Materiál 19573 – krouťací moment M_c



PŘÍLOHA č. 10

Predikční statistické modely pro posuvovou sílu F_f a krouticí moment M_c

Posuvová síla pro materiál 12050

$$F_{f,12050} = 74,869\varepsilon_r - 238,594\alpha_0 + 93209693.f_{ot} + 387,336\omega + 9,448v_c + 2,041\alpha_0.\varepsilon_r - 321,634\alpha_0.f_{ot} - \\ - 620,678\varepsilon_r.f_{ot} - 2,819\varepsilon_r.\omega - 231,8164.f_{ot}.\omega + 493,0139.f_{ot}.D - 2,789.10^{-2}.v_c^2 - 14,327.D + \\ + 16,107.\varepsilon_r.f_{ot}.\omega - 11490816$$

Posuvová síla pro materiál 14220

$$F_{f,14220} = 4434,989.\alpha_0 + 164,675.\varepsilon_r - 168382,686.f_{ot} + 3610,386.\omega + 7,84.v_c - 33,311.\alpha_0.\varepsilon_r - \\ - 16658,399.\alpha_0.f_{ot} + 1333,490.\varepsilon_r.f_{ot} - 363,152.\alpha_0.\omega - 25,8.\varepsilon_r.\omega - 44,8.f_{ot}.v_c - \\ - 7271,458.\varepsilon_r.f_{ot}^2 + 839,532.\alpha_0.D + 50,639.\varepsilon_r.D + 797,979.f_{ot}.D + 969869,535.f_{ot}^2 - \\ - 7325,586.D - 5,854.\alpha_0.\varepsilon_r.D + 121,152.\alpha_0.\varepsilon_r.f_{ot} + 2,58.\alpha_0.\varepsilon_r.\omega - 22303,6$$

Posuvová síla pro materiál 119313

$$F_{f,119313} = 262,879.\alpha_0 - 26,165.\varepsilon_r - 266242,012.f_{ot} + 116,816.\omega + 3,003.v_c - 41556,207.f_{ot}^2.D - \\ - 10,343.\alpha_0.\omega - 231,217.f_{ot}.\omega - 26,605.f_{ot}.v_c + 15573,755.f_{ot}.D + 1665339,058.f_{ot}^2 - \\ - 5038578,363.f_{ot}^3 + 7197969,09.f_{ot}^4 - 1229,788198.D + 17191,676$$

Posuvová síla pro materiál 19573

$$F_{f,19573} = 245,81.\varepsilon_r - 103,539.\alpha_0 + 17046,288.f_{ot} + 1076,588.\omega - 1,939.v_c - 244,697.\alpha_0.f_{ot} - \\ - 99,338.\varepsilon_r.f_{ot} - 8,078.\varepsilon_r.\omega - 31,232.f_{ot}.v_c + 0,193.\omega.v_c + 11,317.\alpha_0.D - 24,235.\varepsilon_r.D + \\ + 500,884.f_{ot}.D - 111,076.\omega.D + 8525,417.f_{ot}^2 + 3231,735.D + 0,808.\varepsilon_r.\omega.D - 31797$$

Krouticí moment pro materiál 12050

$$M_{c,12050} = 1,565.\varepsilon_r + 79,109.f_{ot} + 0,689.\omega - 4,927.10^{-3}.v_c + 7,242.f_{ot}.D - 5,789.10^{-3}.\varepsilon_r^2 - \\ - 713,366.f_{ot}^2 + 1658,793.f_{ot}^3 - 1,255.10^{-2}.\omega^2 + 0,311.D - 117,651$$

Krouticí moment pro materiál 14220

$$M_{c,14220} = 0,201.\varepsilon_r + 49,222.f_{ot} - 2,488.10^{-2}.\omega + 1,8.10^{-2}.v_c - 0,479.\varepsilon_r.f_{ot} - \\ - 0,103.f_{ot}.v_c - 1,867.10^{-2}.\varepsilon_r.D + 5,664.f_{ot}.D + 2,544.D - -28,285$$

Krouticí moment pro materiál 19313

$$M_{c,19313} = 1,275.10^{-2}.\varepsilon_r.\omega - 0,633.\varepsilon_r - 41,568.f_{ot} - 1,868.\omega - 0,227.v_c + 0,1722.\alpha_0 + \\ + 1,647.10^{-3}.\varepsilon_r.v_c + 7,822.f.D + 3,422.10^{-2}.D + 93,205$$

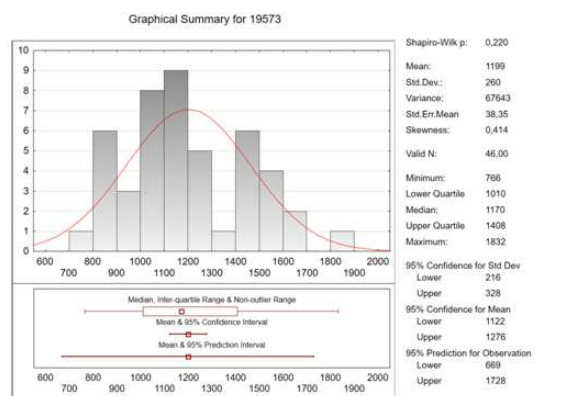
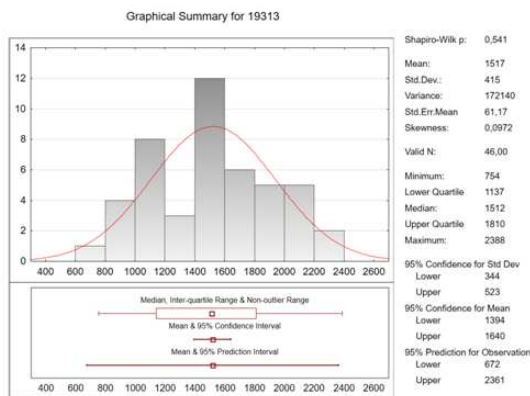
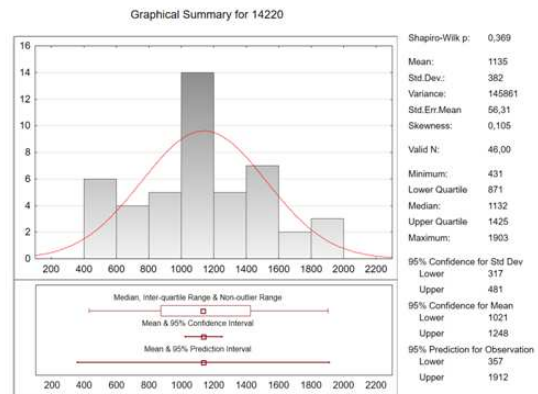
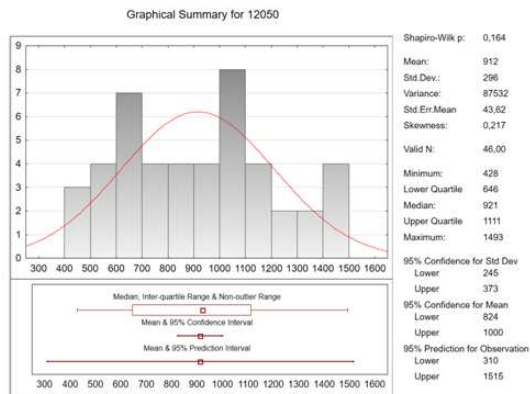
Krouticí moment pro materiál 19573

$$M_{c,19573} = 2,0739.\varepsilon_r - 0,664.\alpha_0 - 642,911.f_{ot} + 9,566.\omega + 7,161.10^{-3}.v_c + 4,443.\varepsilon_r.f_{ot} - \\ - 6,998.10^{-2}.\varepsilon_r.\omega + 20,364.f_{ot}.\omega - 7,585.10^{-2}.f_{ot}.v_c + 6,639.10^{-2}.\alpha_0.D - 0,288.\varepsilon_r.D + \\ + 6,395.f_{ot}.D - 1,319.\omega.D + 38,856.D + 9,589.10^{-3}.\varepsilon_r.\omega.D - 0,148.\varepsilon_r.f_{ot}.\omega - 275,535$$

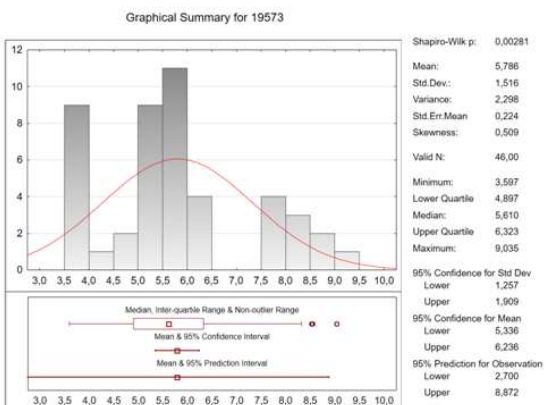
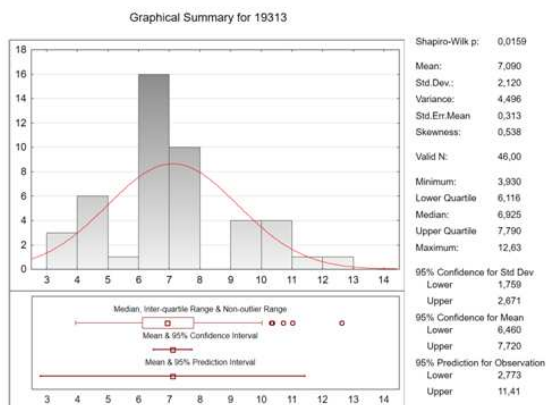
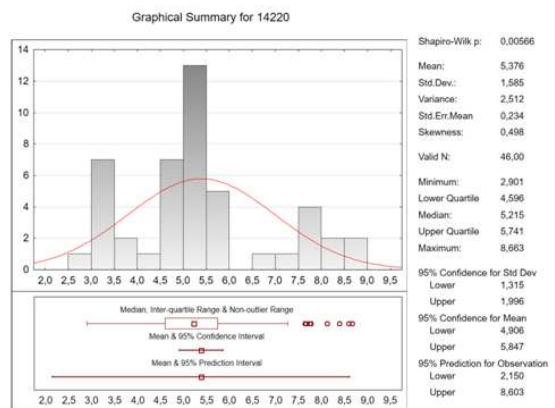
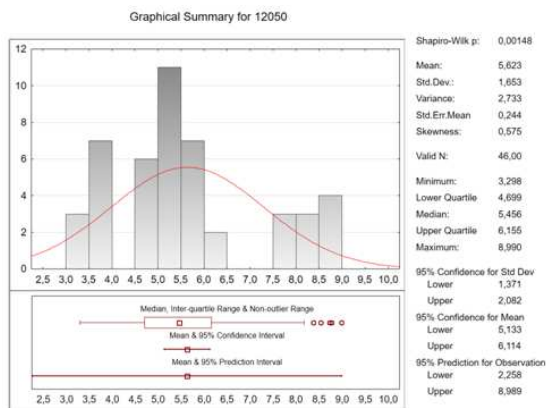
PŘÍLOHA č. 11

Shapiro-Wilkův test pro posuvovou sílu a krouticí moment celých bloků

Posuvová síla F_f



Krouticí moment M_c



PŘÍLOHA č. 12

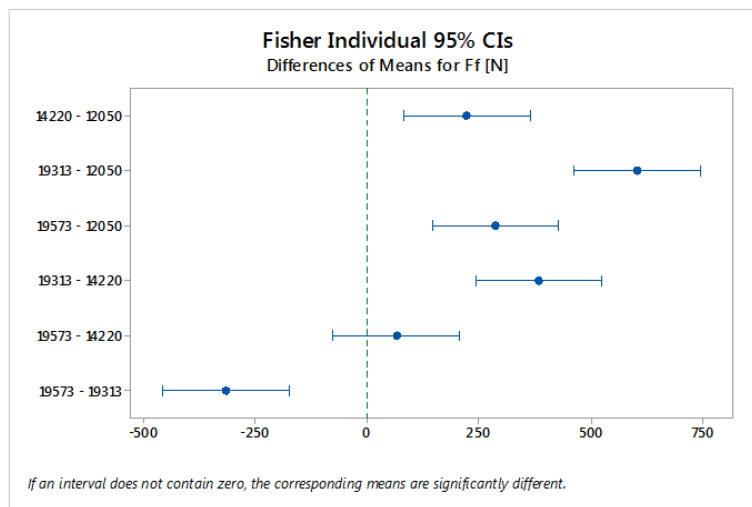
Podrobnosti Scheffeho testu a Fisherova přesného testu rozdílu středních hodnot a Vícenásobné Kruskal-Wallisovy analýzy rozptylu

Scheffeho test rozptylů

materiál	Scheffe Test; Variable: Ff [N] (Komparacie) Marked differences are significant at $p < ,05000$			
	{1} M=912,19	{2} M=1134,7	{3} M=1516,8	{4} M=1198,9
12050 {1}		0,024363	0,000000	0,001538
14220 {2}	0,024363		0,000008	0,849213
19313 {3}	0,000000	0,000008		0,000315
19573 {4}	0,001538	0,849213	0,000315	

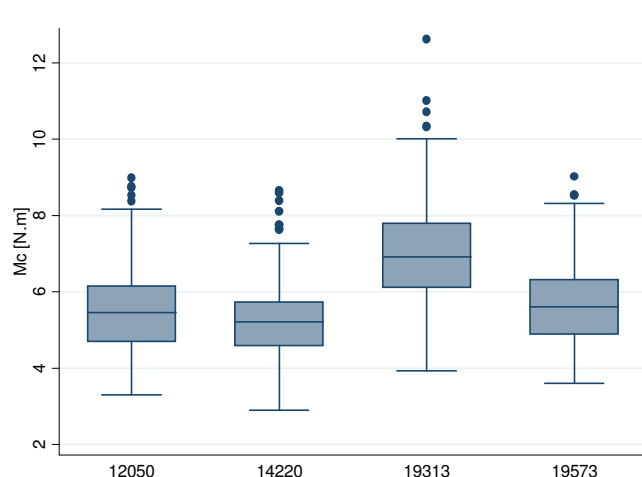
Fisherův přesný test rozdílu středních hodnot

Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95% CI	T-Value	Adjusted P-Value
14220 - 12050	222,5	71,7	(81,0; 364,0)	3,10	0,002
19313 - 12050	604,6	71,7	(463,1; 746,1)	8,43	0,000
19573 - 12050	286,7	71,7	(145,2; 428,2)	4,00	0,000
19313 - 14220	382,1	71,7	(240,6; 523,6)	5,33	0,000
19573 - 14220	64,2	71,7	(-77,3; 205,7)	0,89	0,372
19573 - 19313	-317,9	71,7	(-459,4; -176,4)	-4,43	0,000



Vícenásobná Kruskal-Wallisova analýza rozptylu

Depend.: Mc [N.m]	Multiple Comparisons z' values: Mc [N.m] Kruskal-Wallis test: $H(3, N=184) = 21,10950$ $p = ,0001$			
	12 050 R:83,043	14 220 R:73,957	19 313 R:121,93	19 573 R:91,065
12 050		0,818235	3,501969	0,722318
14 220	0,818235		4,320204	1,540553
19 313	3,501969	4,320204		2,779651
19 573	0,722318	1,540553	2,779651	



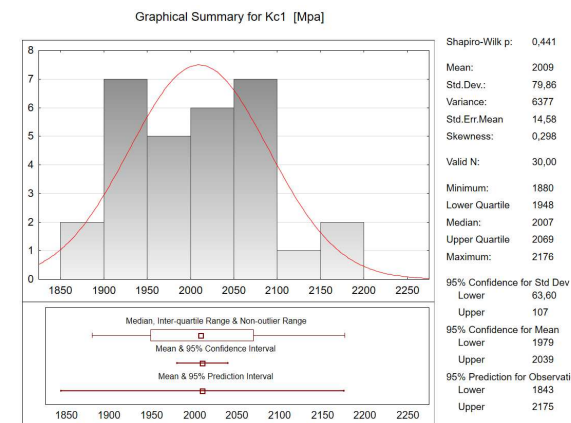
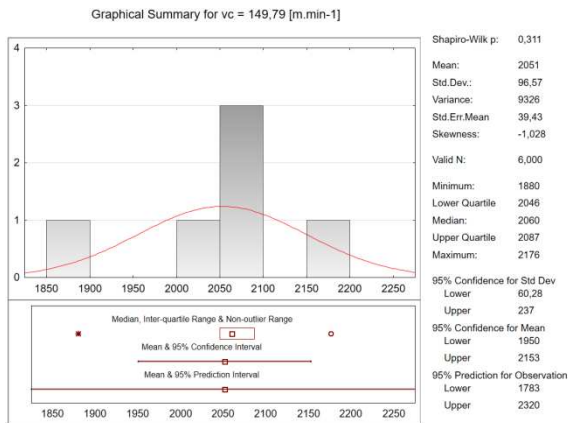
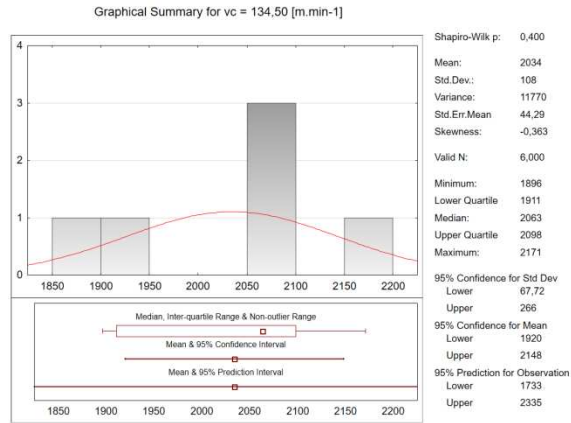
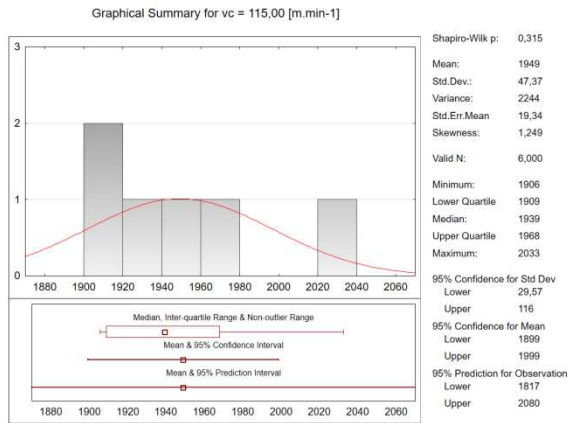
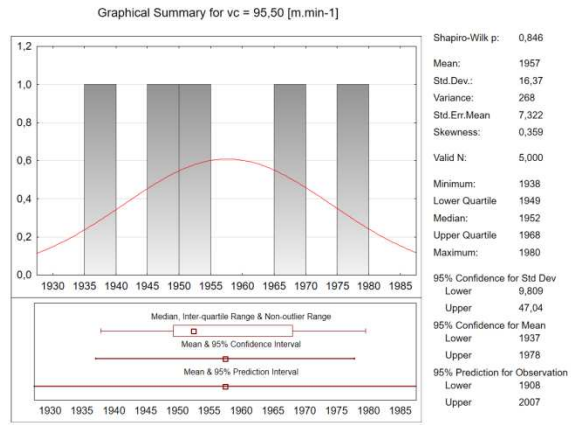
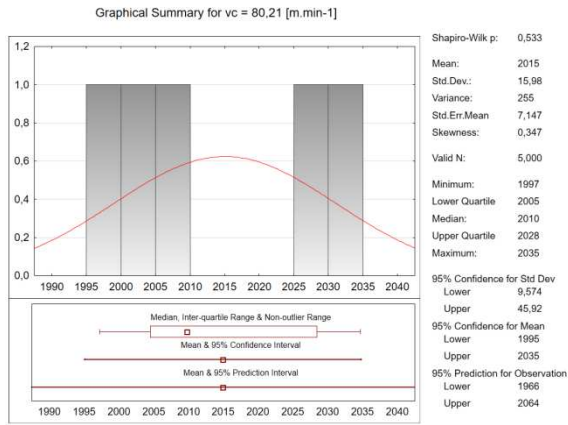
PŘÍLOHA č. 13

Naměřené hodnoty měrného řezného odporu

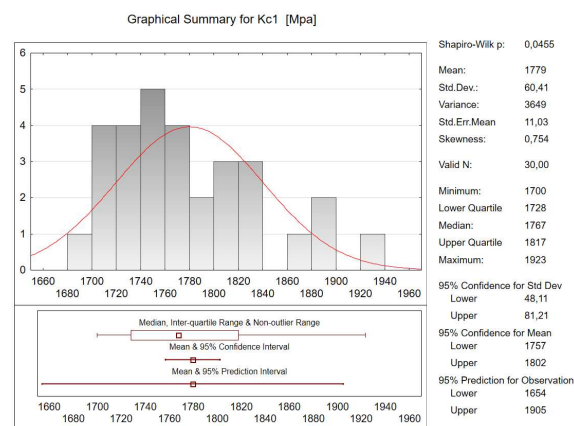
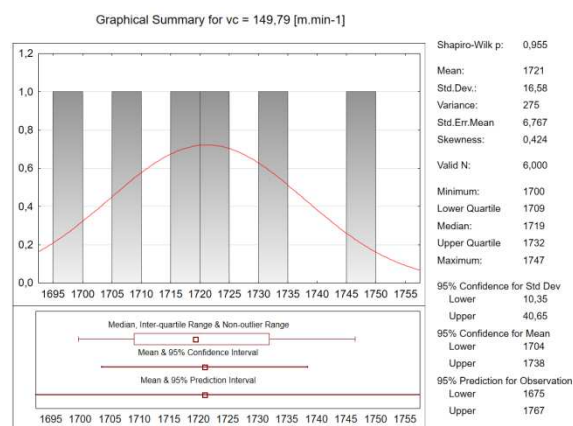
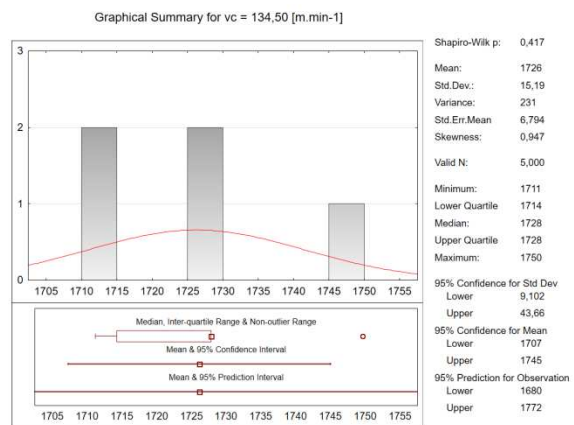
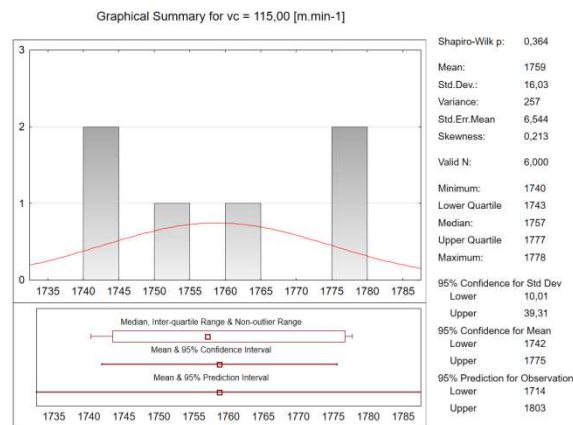
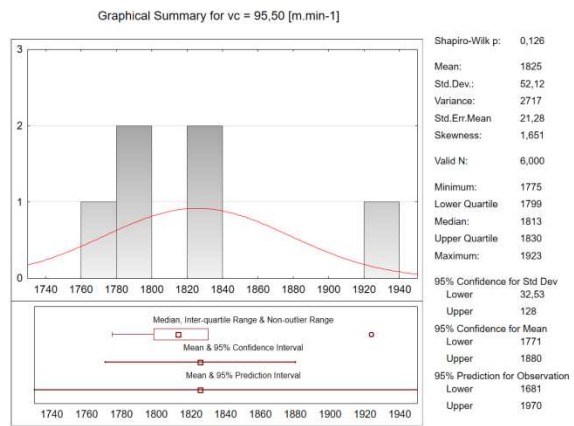
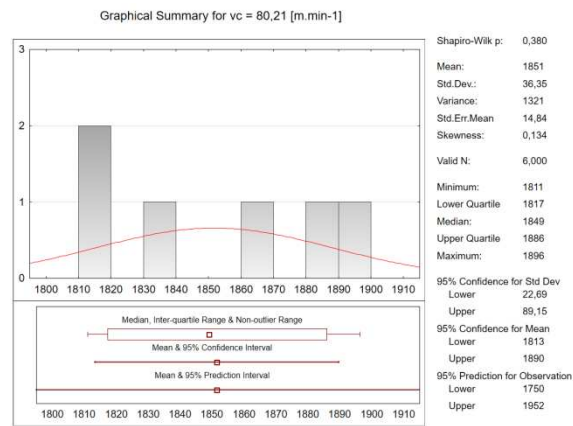
PŘÍLOHA č. 14

Shapiro-Wilkův test jednotkový měrný řezný odpor

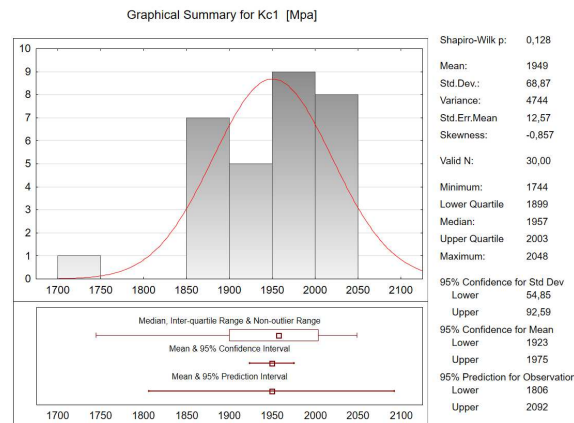
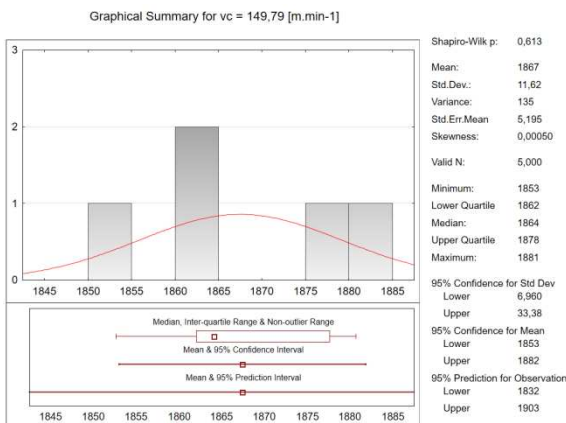
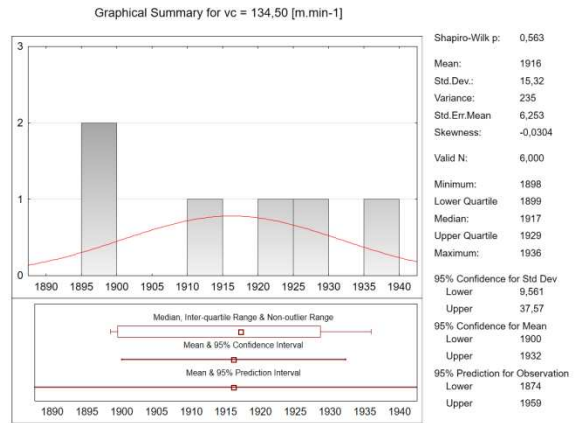
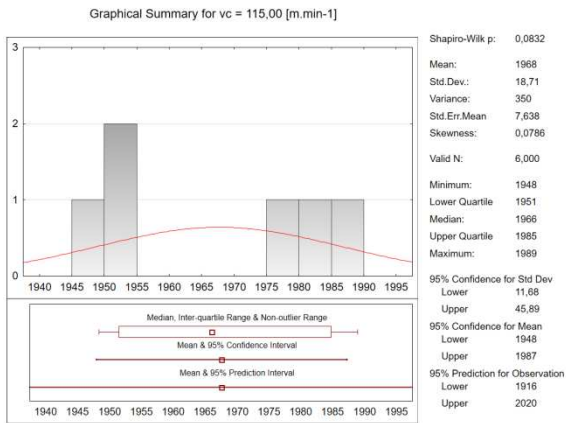
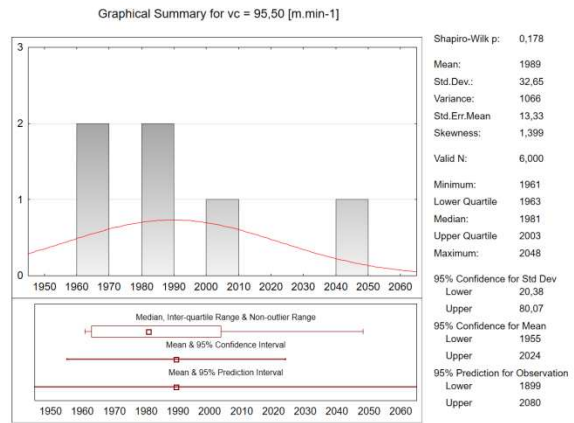
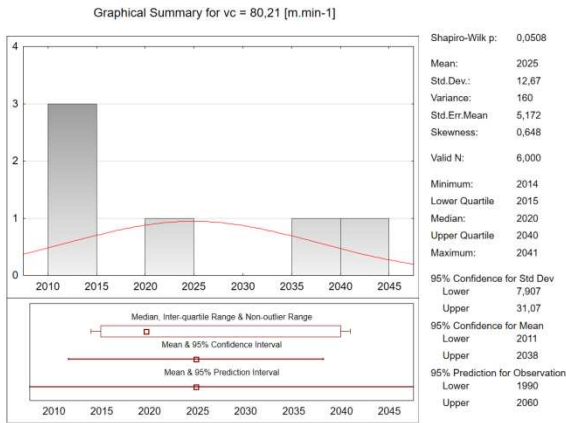
Materiál 12050



Materiál 14220



Materiál 19313



Material 19573

