

# Použití statistických metod pro analýzu řezných podmínek

Ing. Alexey Molotovnik

Vedoucí práce: doc. Ing. Rudolf Dvořák, CSc.

## **Abstrakt**

*Provedení technických experimentů vyžaduje následující důkladnou statistickou analýzu výstupních dat. V některých případech dostačujícími jsou základní metody analýzy jako analýza rozptylů, ale v dalších případech je potřeba provést další testy pro ověření statistických hypotéz. V rámci výzkumného projektu po analýze systému čištění průmyslových kalů byly analyzovány řezné podmínky pro obrábění bubnů odstředivky. Základní statistická analýza se ukázala jako nedostačující a proto byly použity další metody porovnání kontrastů několika souborů hodnot.*

## **Klíčová slova**

*Statistická analýza, DOE, ANOVA*

## **1. Úvod**

Vzorek BUBEN – KUŽEL, dále jen buben I, byl vyroben z Cr-Ni-Mo-N austeniticko-feritické korozivzdorné oceli na odlitky (1.4470; GX2CrNiMoN22-5-3) ve výrobních prostorech První brněnské strojírný Velká Bíteš, a. s. Povrch bubnu I byl opracován finální technologií soustružení. Byly obrobena dva druhů bubnů o průměrech 205 a 235mm, počet otáček za minutu při obrábění byl zvolen na 70, resp. 90.

Cílem experimentu bylo posoudit vliv jednotlivých faktorů, kterými byla řezná rychlost a posuv řezného nástroje na následující parametry: zbytkové napětí ( $\sigma_A$  a  $\sigma_T$ ), míru plastické deformace ( $W_A$  a  $W_T$ ), magnetoelastické parametry ( $mp_A$  a  $mp_T$ ), remanenci ( $Br_A$  a  $Br_T$ ), permeabilitu ( $m_A$  a  $m_T$ ), koercitivní sílu ( $Hc_A$  a  $Hc_T$ ) a drsnost povrchu ( $Ra$ ,  $Ry$ ,  $Rsm$ ). Faktory byly nastaveny na následující úrovně:

- řezná rychlost – 45, 65 m/min.;
- posuv řezného nástroje – 0,1; 0,2; 0,3 mm/ot.

Byl použit úplný faktorový plán experimentu s jednou replikací (opakováním), tedy bylo provedeno celkem 12 jednotlivých běhů experimentu. Návrh i analýza byly provedeny v softwaru Design-Expert 6.

Pro studium vlivu faktorů na určité parametry byly použity lineární modely, to stačí pro tak zvaný screening, t.j. analýzu existence závislostí. Pro dva faktory lineární model může mít jednu s následujících forem:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (1)$$

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ijk} \quad (2)$$

$$y_{ik} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ik} \quad (3)$$

$$y_{jk} = \mu + \beta_j + \varepsilon_{jk} \quad (4)$$

kde  $\tau_i$  – vliv řezné rychlosti na sledovaný parametr  $y_i$ ,  $\beta_j$  – vliv posuvu řezného nástroje na  $y_i$   $i = 45, 65$  (úrovně faktoru *Řezná rychlost*);  $j = 0,1; 0,2; 0,3$  (úrovně faktoru *Posuv*);  $k = 1, 2, \dots, 12$  (pořadové číslo vzorku); přičemž  $\varepsilon_{ijk}$  jsou náhodné chyby nezávislé navzájem a s rozdělením  $N(0, \sigma^2)$ . Člen  $(\tau\beta)_{ij}$  v modelu odpovídá možné interakci mezi faktory.

Pro ověření existence závislosti je vhodné otestovat následující hypotézy:  $H_0 : \tau_i = 0, i = 1, 2, 3$  (čili není patrný vliv faktoru A), resp.  $H_0 : \beta_j = 0, j = 1, 2$  (není patrný vliv faktoru B), resp.  $H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0, i = 1, 2, 3; j = 1, 2$  (není patrný vliv interakce) [1].

### 1.1. Zbytková napětí

Difrakční tenzometrická měření byla prováděna za účelem posouzení vlivu *posuvu řezného nástroje* a vlivu řezné rychlosti na stav zbytkové napjatosti. Rentgenografická tenzometrická analýza byla provedena na površích všech dvanácti stop označených 1 – 12. Na každé stopě byla zvolena 3 místa po  $120^\circ$ , viz obr 1. Analyzované body byly měřeny jak ve směru posuvu nástroje  $\delta_A$ , tak i ve směru kolmém tj.  $\delta_T$ .

Tabulka 1 – Naměřené hodnoty zbytkových napětí.

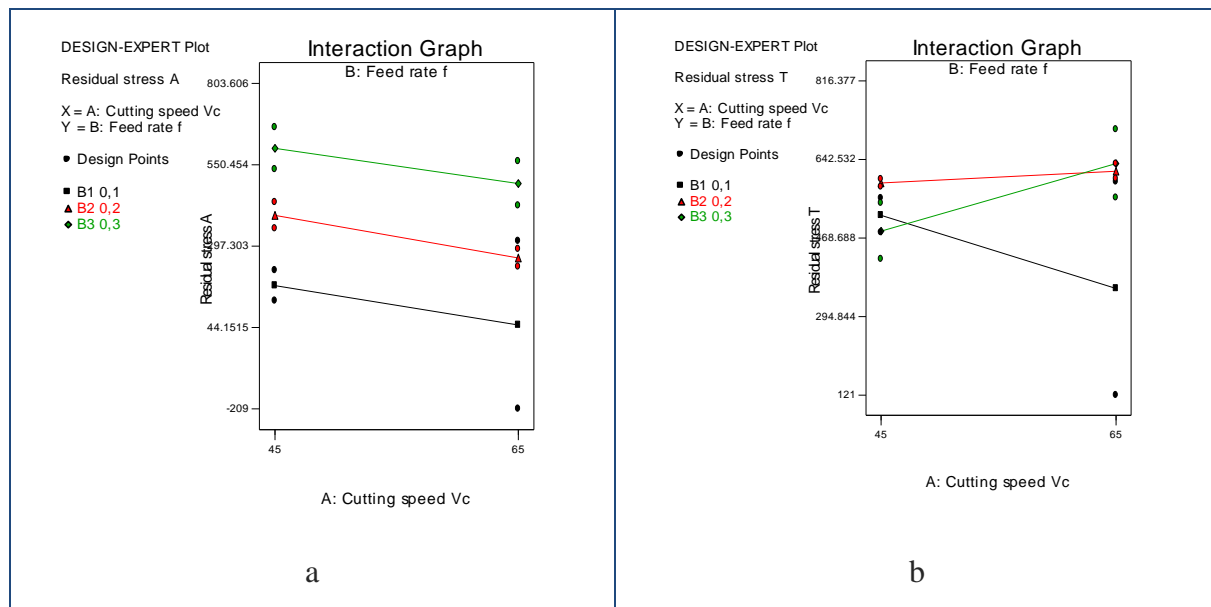
Stopa	Řezná rychlost $V_c$ m/min.	Posuv $f$ mm/ot	$\langle \sigma_A \rangle$ , MPa	$\langle W_A \rangle$ , deg	$\langle \sigma_T \rangle$ , MPa	$\langle W_T \rangle$ , deg
1	45	0,3	667	3,13	546	3,18
2	45	0,1	222	3,27	481	3,06
3	45	0,1	127	3,09	557	3,08
4	65	0,2	288	3,26	600	3,06
5	65	0,1	-209	3,26	121	3,09
6	45	0,2	352	3,28	599	3,18
7	65	0,2	233	3,31	633	3,22
8	45	0,2	434	3,23	582	3,16
9	65	0,3	561	3,31	558	3,27
10	65	0,1	313	3,03	593	3,02
11	45	0,3	536	3,54	422	3,46
12	65	0,3	423	3,43	709	3,25

Vlastní měření bylo prováděno pomocí  $\psi$  goniometru *Xstress 3000 G2* firmy *Stresstech Oy* se zařízením rentgenky s chromovou anodou a cylindrickým kolimátorem o průměru 3 mm. Plocha ozářené oblasti činila cca 9 mm<sup>2</sup>. Byla analyzována difrakční linie  $\{211\}$   $\alpha$ -Fe. Hodnoty zbytkových napětí byly vypočteny z mřížkových deformací stanovených z experimentálních závislostí  $2\theta(\sin^2\psi)$  za předpokladu dvojsoého stavu zbytkové napjatosti ( $\theta$  je difrakční úhel,  $\psi$  –

úhel mezi povrchem vzorku a difraktujícími mřížkovými rovinami). Závislosti  $2\theta^{211}$  ( $\sin^2\psi$ ) byly měřeny ve dvou azimutech  $\sigma_A$  a  $\sigma_T$  (obr. 1). Difrakční úhel  $2\theta^{211}$  byl stanoven autokorelační metodou z difraktovaného dubletu  $\text{CrK}\alpha$  na mřížkových rovinách  $\{211\}$   $\alpha$ -Fe. Při výpočtu napětí byl použit makroskopický Youngův modul pružnosti 2,1 GPa a Poissonovo číslo 0,3. Experimentální chyba uvedená u jednotlivých naměřených hodnot je směrodatnou odchylkou dle algoritmu výpočtu zbytkových napětí metodou „ $\sin^2\psi$ ” [2].

Veličiny  $W_A$ ,  $W_T$  jsou průměrnou integrální šířkou difrakční linie  $\{211\}$   $\alpha$ -Fe z měření  $\sigma_A$  a  $\sigma_T$ , a reprezentují míru plastické deformace analyzovaných vzorků v daných směrech.

Viz o procesu měření [3].



Obrázek 1. Interaction graph of residuals stress in axial direction and tangential directions

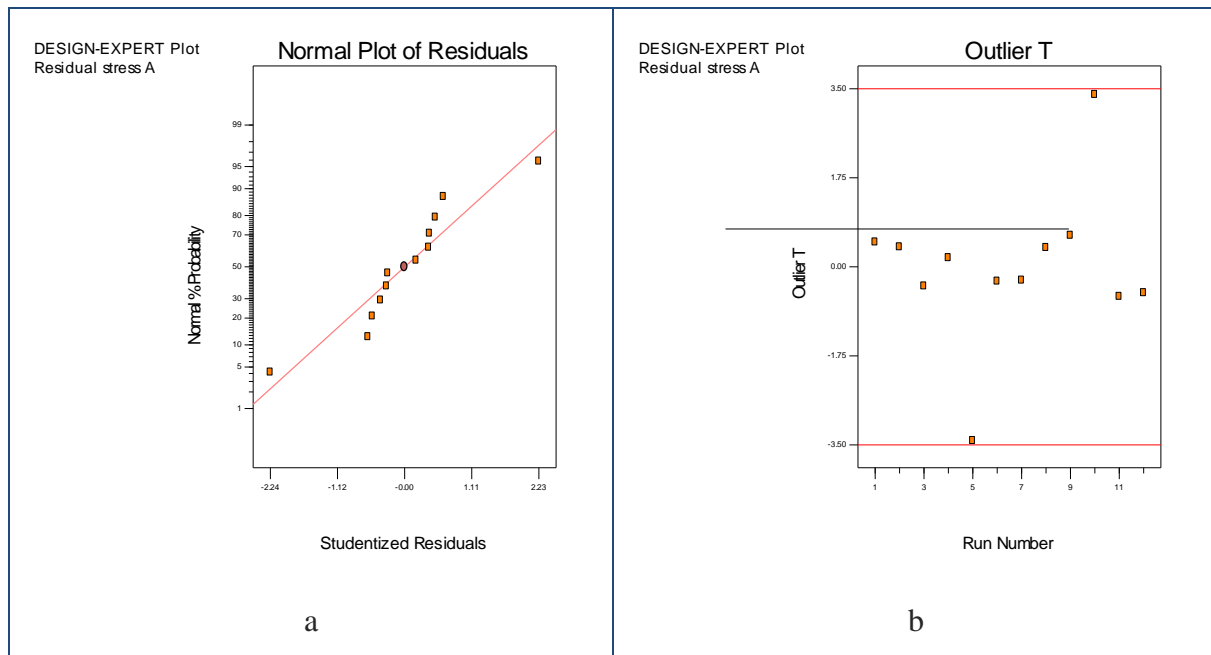
Graf interakcí efektů A a B (Obrázek 1a) ukazuje na možný vliv faktoru B na výstupní hodnoty zbytkových napětí v axiálním směru. Při nastavení faktoru A na 65 m/min a faktoru B na 0,1 mm/ot. je pozorovaná velká variabilita hodnot. Samozřejmě je potřeba tento předpoklad ověřit statisticky, proto byla použita metoda ANOVA. Výsledky této analýzy obsahuje Tabulka , ze které lze přečíst, že plný faktorový model není vhodný pro vstupní soubor dat. ANOVA pro model hlavních efektů ukázala, že model je statisticky významný a p-hodnota faktoru B, která se rovná 0.0085 ukazuje na významnost toho faktoru.

Metoda ANOVA má určité předpoklady, proto je potřeba ověřit její výsledky. Obrázek 2 obsahuje dva testy, ve kterých se ověřuje normalita rozdělení rezidua a odlehlé hodnoty. V obou grafech je vidět dvě zvláštní hodnoty, jsou to stejné body, které byly pozorovány na Obrázek 1. Odlehlé hodnoty se nachází v kontrolních mezích, ale jsou jim velice blízko, proto bylo rozhodnuto použít neparametrický test hypotézy. Jako alternativa ANOVA je doporučen Kruskal-Wallis test [4]. Tabulka 1 obsahuje výsledky testu pro posuv na zub, ze kterých vyplývá, že faktor posuv na zub ovlivňuje hodnoty zbytkových napětí v axiálním směru.

Zvláštní variabilita v bodech 5 a 10, kdy faktory A a B byly nastaveny na hodnoty 65 m/min a 0,1 mm/ot. je způsobena změnou v řezných podmínkách, kdy právě při nejvyšším poměru  $f/v_c$  rychlost ( $f = 0,1$  mm/ot. k  $v_c = 65$  m/min) dochází k redistribuci řezných sil a tím i ke změně charakteru zbytkových napětí [3].

Tabulka 2- ANOVA pro zbytková napětí v axiálním směru, plný faktorový model.

Analysis of variance table [Partial sum of squares]						
	Sum of		Mean	F		
Source	Squares	DF	Square	Value	Prob > F	
Model	420425,4	5	84085,08	3,081328	0.1016	not significant
A	44286,75	1	44286,75	1,622904	0.2498	
B	375872,7	2	187936,3	6,886995	0.0279	
AB	266	2	133	0,004874	0.9951	
Pure Error	163731,5	6	27288,58			
Cor Total	584156,9	11				



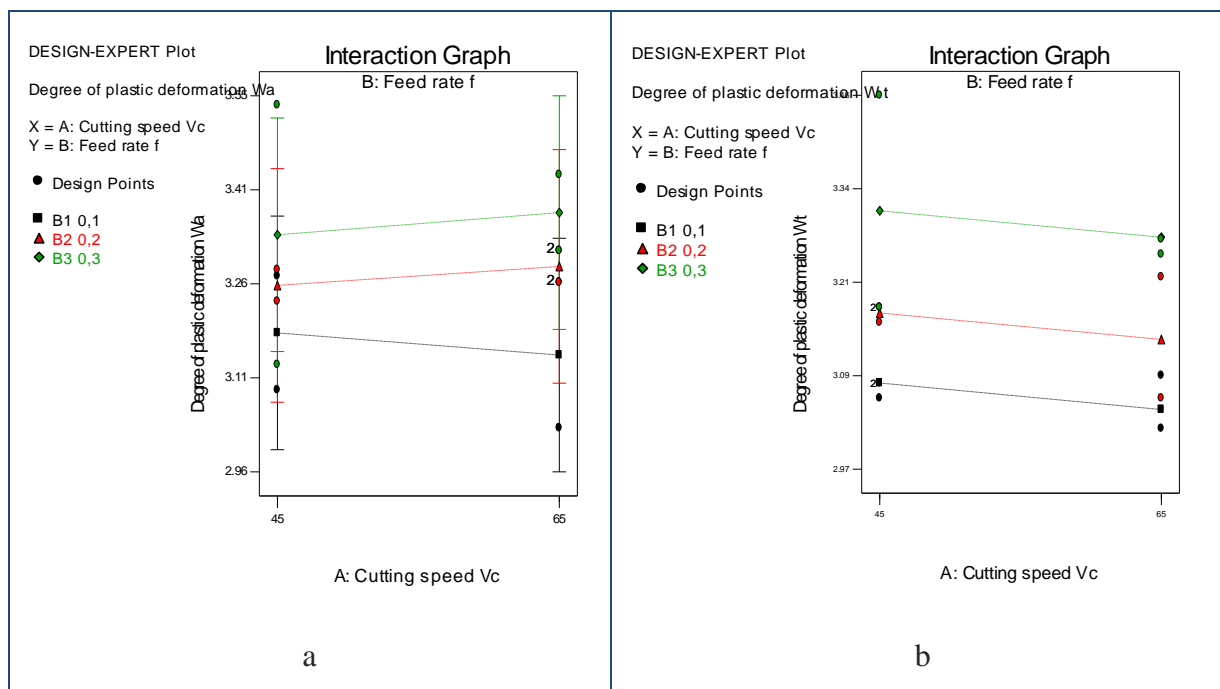
Obrázek 2. Graf normálního rozdělení zřidua (a) a graf odlehlých hodnot (b).

Tabulka 1 - Kruskal-Wallis Test hodnot zbytkového napětí v axiálním směru proti posuvu na zub

Kruskal-Wallis Test on Residual stress A versus Feed rate f				
Feed rate f	N	Median	Ave Rank	Z
0,1	4	174,5	3,0	-2,38
0,2	4	320,0	6,3	-0,17
0,3	4	548,5	10,3	2,55
Overall	12		6,5	
H = 8,12 DF = 2 P = 0,017				

Obrázek 1b obsahuje graf hlavních efektů hodnot zbytkového napětí v tangenciálním směru. Z grafu je vidět, že žádný z faktorů neovlivňuje výstupní hodnoty. Analýza ANOVA pro plný faktorový model a pro model hlavních efektů tento předpoklad potvrdila.

Při zkoumání míry plastické deformace ve směru axiálním byl vybrán plný faktorový model, ale ANOVA prokázala nepřítomnost významné závislosti podle p-hodnoty, která byla rovná 0,6625. Modely (2), (3) a (4) byly testovány také a byly zamítnuty na hladině významnosti 0,05. Ačkoli střední hodnoty šířky difrakční linie se zvyšují, když se zvyšuje posuv na zub (obr. 3a) další faktor rezná rychlost nemůže být považován za statisticky významný. Důvodem je především velká variabilita, kdy faktory A a B byly stanoveny na 0,3 mm/ot a 65 m/min.



Obrázek 3. Graf interakcí faktorů pro hodnoty šířky difrakční linie v axiálním a tangenciálním směrech.

Analýza ANOVA prokázala statistickou významnost modelu hlavních efektů a významnost faktoru B Posuv na zub, což znamená závislost míry plastické deformace na posuvu na zub nástroje. Z následující analýzy lineárního modelu vyplývá, že rezidua mají normální rozdělení, ale přesto byla zaznamenána jedna odlehlá hodnota, která se blíží kritické mezi. Kruskal-Wallis Test byl

proveden, aby potvrdil nebo zamítl výsledky ANOVA. Tabulka obsahuje výsledky Kruskal-Wallis Testu ze kterých vyplývá, že posuv na zub nástroje ovlivňuje šířky difrakční linie v axiálním směru.

Tabulka 3 - Kruskal-Wallis Test hodnot šířky difrakční linie v tangenciálním směru proti posuvu na zub

Kruskal-Wallis Test on $W_T$ versus Feed rate f				
Feed rate f	N	Median	Ave Rank	Z
0,1	4	3,070	3,1	-2,29
0,2	4	3,170	6,3	-0,17
0,3	4	3,260	10,1	2,46
Overall	12		6,5	
H = 7,57 DF = 2 P = 0,023				
H = 7,62 DF = 2 P = 0,022 (adjusted for ties)				

## 1.2. Drsnost povrchu

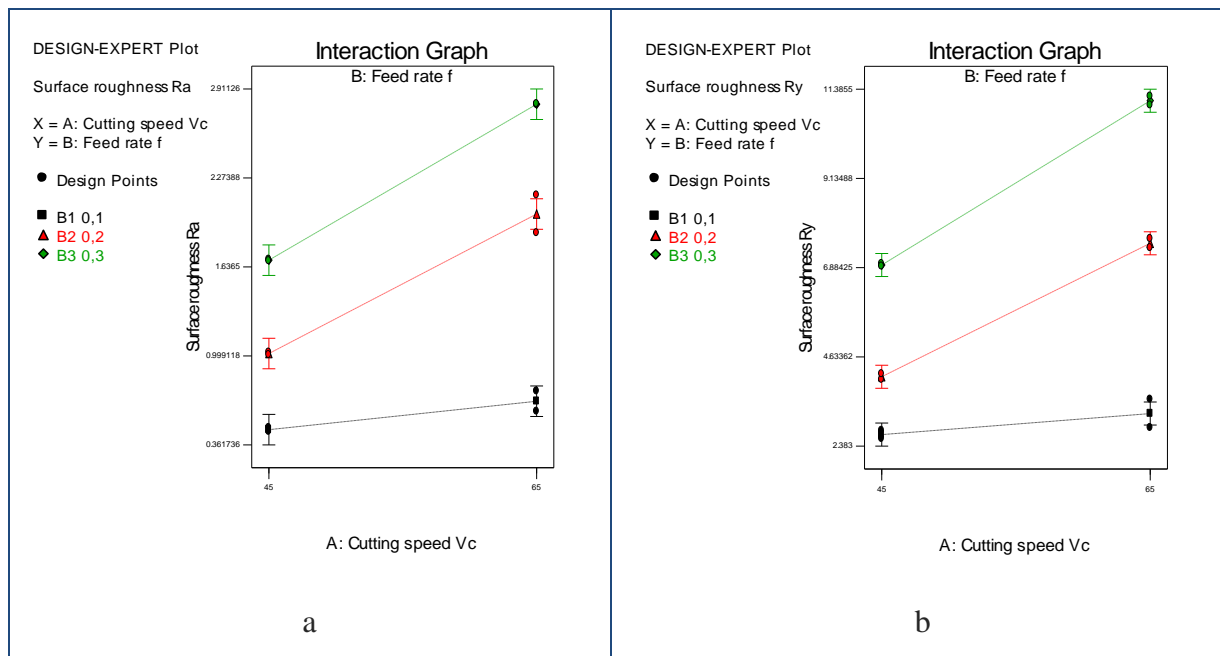
Drsnost povrchu byla měřena měřicí kartou Mahr, pomocí posuvové jednotky PGK a snímače MFW-250 # 1805 [4,7%]. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 4. Tři parametry drsnosti byly zkoumány: Ra, Ry, RSm.

Tabulka 4 – Naměřené hodnoty drsnosti povrchu.

Run	Factor A <i>m/min</i>	Factor B <i>v<sub>c</sub> mm/rev</i>	Surface roughness Ra	Surface roughness Ry	Surface roughness RSm
1	45	0,3	1,68	6,919	311,798
2	45	0,1	0,485	2,776	140,705
3	45	0,1	0,457	2,571	170,46
4	65	0,2	1,88	7,614	210,752
5	65	0,1	0,747	3,561	112,197
6	45	0,2	1,025	4,062	210,525
7	65	0,2	2,151	7,384	211,083
8	45	0,2	1,007	4,203	215,052
9	65	0,3	2,805	11,206	316,069
10	65	0,1	0,602	2,848	104,472
11	45	0,3	1,69	6,983	316,078
12	65	0,3	2,799	10,984	316,388

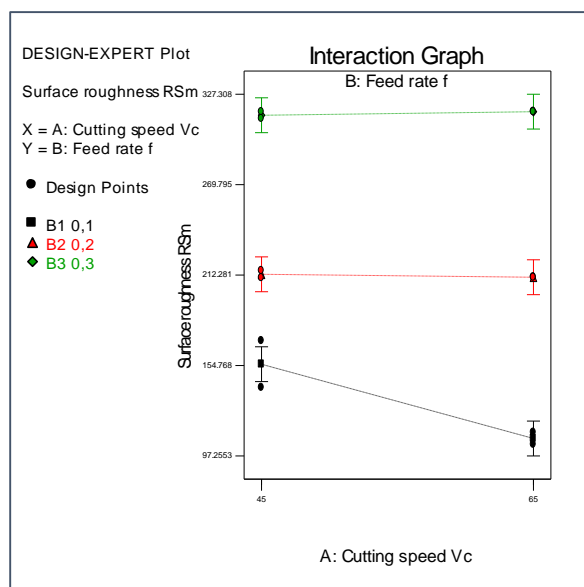
Pro parametr drsnosti povrchu Ra byl prvním vybraným plný faktorový model, který byl statisticky významný v ANOVA analýze. Ale rezidua měla nenormální rozdělení a dvě odlehle hodnoty byly pozorovány. Nicméně je zřejmé, vztahy mezi parametry Ra a faktory (obr. 4a). Drsnost Ra se stoupá, zvyšuje-li se rezná rychlost nebo posuv. Jak je vidět na obrázku 4a Závislost faktoru je větší, když je faktor B nastaven na úrovni 0,2 nebo 0.3mm/ot., znamená to, že existuje interakce mezi reznými rychlostmi a posuvem. Tabulka ANOVA potvrzuje předpoklad interakce, ale výsledky nelze přijmout, neboť rezidua nemají normální rozdělení. V takovém případě je vhodné použít neparametrické modely (např. Kruskal-Wallis test nebo Friedmanův test), ale tyto testy nepodporují analýzu interakcí. Proto byla použita Tukeyova metoda pro porovnání kontrastů.

Výsledky analýzy Tukeyovou metodou jsou zobrazeny v tabulce 5. Kontrast se považuje za významný pokud interval neobsahuje nulu.



Obrázek 4. Graf interakcí faktorů pro hodnoty drsnosti povrchu Ra a Ry

Případ Ry je velmi podobný drsnosti Ra. Tady je zřejmá spojitost mezi Ry a faktory. Další analýza byla provedena stejným způsobem jako Ra a výsledky jsou stejné: posuv ovlivňuje Ry a řezná rychlost ovlivňuje Ry, když je posuv nastavena na 0,2 mm/ot nebo 0,3 mm/ot. Grafické zobrazení závislosti je na obrázku 4b.



Obrázek 5. Graf interakcí faktorů pro hodnoty drsnosti povrchu RSM

Obr. 5 obsahuje jednotlivé hodnoty parametru drsnosti povrchu RSM. Jak je vidět, není tak silný vliv faktoru A, ale je na úrovni 0,1 mm/ot faktoru B. Stejným způsobem byl Tukey metoda na vícevrstvých srovnání slouží k parametru RSM. Výsledky analýzy hlavních efektů ukazuje vlivy faktorů řezné rychlosti a posuvu. Ale analýza interakce vlivů nevykazoval žádné účinky na rychlost faktoru řezání, pokud je faktor posuv nastavena na 0.2mm/rev nebo 0.3mm/rev (intervaly spolehlivosti jsou nuly). Takže, řezná rychlost ovlivňuje RSM pouze v případě faktoru posuv je nastavena na 0,1, s rostoucí řezné rychlosti RSM klesá.

Tabulka 5 – Výsledky analýzy Ry Tukeyovou metodou.

Tukey 95,0% Simultaneous Confidence Intervals					
Response Variable Ra					
All Pairwise Comparisons among Levels of A					
A = 45 subtracted from:					
A	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----	
65	0,6472	0,7733	0,8995	(-----*-----)	
				-----+-----+-----+-----	
		0,700	0,770	0,840	
Tukey 95,0% Simultaneous Confidence Intervals					
Response Variable Ra					
All Pairwise Comparisons among Levels of B					
B = 0,1 subtracted from:					
B	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----	
0,2	0,7492	0,9430	1,137	(----*----)	
0,3	1,4770	1,6707	1,865	(----*----)	
				-----+-----+-----+-----	
		0,80	1,20	1,60	
B = 0,2 subtracted from:					
B	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----	
0,3	0,5340	0,7278	0,9215	(----*----)	
				-----+-----+-----+-----	
		0,80	1,20	1,60	
Tukey 95,0% Simultaneous Confidence Intervals					
Response Variable Ra					
All Pairwise Comparisons among Levels of A*B					
A = 45					
B = 0,1 subtracted from:					
A	B	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----
65	0,1	-0,1520	0,2035	0,5590	(--*--)
					-----+-----+-----+-----
		-1,2	0,0	1,2	2,4
A = 45					
B = 0,2 subtracted from:					
A	B	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----
65	0,2	0,6440	0,9995	1,35503	(--*--)
					-----+-----+-----+-----
		-1,2	0,0	1,2	2,4
A = 45					
B = 0,3 subtracted from:					
A	B	Lower	Center	Upper	-----+-----+-----+-----
65	0,3	0,761	1,117	1,4725	(--*--)
					-----+-----+-----+-----
		-1,2	0,0	1,2	2,4



## 2. Závěr

V této práci byl analyzován experiment soustružení bubnu pro hodnocení vlivu výrobních faktorů (řezná rychlost a posuv řezného nástroje) na parametry: zbytkové napětí, stupeň plastické deformace a drsnost povrchu. V případech, zbytkové měření byla provedena ve třech bodech 120° a měla velkou variabilitu, která způsobena nehomogenním povrchem bubnu.

Zbytková napětí ve směru posuvu nástroje (axiální směr) a stupeň plastické deformace v tangenciálním směru jsou ovlivněny posuvem a klesají, když posuv klesá. Zbytková napětí v tangenciálním směru a stupně plastické deformace v axiálním směru, nezávisí na zkoumaných faktorech. Zbytková napětí v tangenciálním směru je větší než v axiálním směru ve všech případech, průměrný poměr se rovná 1,6. Neexistuje žádné podstatné rozdíly v míře plastické deformace v axiálním a tangenciálním směru.

Oba faktory mají statisticky významný vliv na drsnosti povrchu Ra, Ry a RSM. Drsnost povrchu se zvyšuje, pokud se zvyšuje posuv nástroje na zub. Pokud je posuv nastaven na 0,2 mm/ot nebo 0,3 mm/ot řezná rychlost ovlivňuje Rx a Ry parametry stejným způsobem, ale když je posuv nastaven na 0,1 mm/ot řezná rychlost nemá žádný významný vliv na Rx a Ry. RSM parametr není ovlivněna rychlostí řezání, pokud je posuv stanoven na 0,2 mm/ot nebo 0,3 mm/ot a klesá, když řezná rychlost se zvyšuje, pokud je posuv nastaven na 0,1 mm / ot.

Využití statistických nástrojů umožnilo provést důkladnou statistickou analýzu v případech, kdy běžné statistiky nemůžou být použity.

### **Seznam použité literatury**

1. Fabian F., Horálek V., Chmelík V., Chodounský J., Král J., Křepela J., Michálek J. *Statistické metody řízení jakosti*. Praha: Česká společnost pro jakost, 2007
2. Neckář F., Kvasnička I.: *Vybrané statě z úběru materiálu*, Vydavatelství ČVUT, Praha 1991.
3. Ganev, N., Kolařík, K. and Pala, Z. Difrakční tenzometrická diagnostika. *Výzkumná zpráva o výsledcích plnění projektu MPO FR—TI3/711 Výzkum a vývoj konstrukce a technologie výroby systému na čištění komunálních a průmyslových kalů na odstředivém principu*. Praha, 2011
4. Montgomery, D.C. *Design and Analysis of Experiments*. Wiley, 2004. ISBN 9780470128664