

Optimiranje tehnologije izdelave v redni proizvodnji

Peter ENIKO, Davorin KRAMAR

Izvleček: Prispevek obravnava optimizacijo postopka povrtavanja na CNC-obdelovalnem centru do te mere, da je nadzorovan postopek primeren za doseganje končnih geometrijskih specifikacij brez honanja. Za doseganje sistematičnih izboljšav tehnologije izdelave je bil izbran pregleden pristop z uporabo orodij kakovosti in načrtovanja eksperimentov. Eksperimentalni del se je izvajal v redni proizvodnji in je tako obsegal realne industrijske faktorje šuma, ki se pri laboratorijskem testiranju težko simulirajo. Raziskovanje vplivnih faktorjev in njihovih nivojev je temeljilo na pregledu stanja tehnike na področju povrtavanja. Nadzorovana tehnologija izdelave batne izvrtine brez honanja predstavlja izziv za doseganje specifikacij po konkurenčnih cenah.

Ključne besede: DOE, SPC, povrtavanje, optimizacija

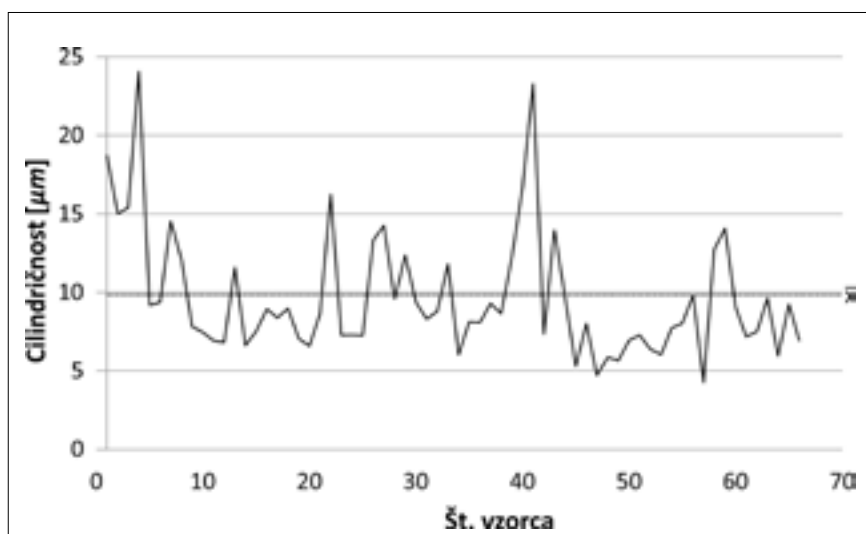
1 Uvod

Specifikacije batne izvrtine ohišja hidravličnega ventila predpisujejo končno mero cilindričnosti $\phi/ < 3 \mu\text{m}$ in hrapavost površine $Ra < 0,4 \mu\text{m}$. Honanje predstavlja proces izdelave, s katerim se dosega končne geometrijske zahteve in zahteva predhodno obdelavo na CNC-obdelovalnem centru z zaporednimi postopki odrezavanja: vrtanje, frezanje in povrtavanje. Prispevek obravnava optimizacijo postopka povrtavanja na CNC-obdelovalnem centru. Optimizacija se je izvajala z načrtovanjem eksperimentov (DOE – Design Of Experiments). Dobljeni multikriterijski optimizacijski model omogoča doseganje zahtevanih specifikacij batne izvrtine in poveča sposobnost procesa povrtavanja. Faktorji, ki so bili prepoznani kot ključni za doseganje specifikacij (tabela 1), so bili raziskani z eksperimentalnim delom. Raziskave na področju optimizacije procesa povrtavanja z

načrtovanjem eksperimentov kot numerične procesne spremenljivke upoštevajo vrtilno in podajalno hitrost [1]. Vplivi dobe obstojnosti svedra, frezala, materiala rezalnega orodja, materiala obdelovanca, držala rezalnega orodja, geometrije obdelovanca ter karakteristik HMT so bili v raziskovalnem delu zanemarjeni, ker so se eksperimenti izvajali na istem tipu izdelka, z materialom iz iste šarže ter z istim rezalnim orodjem. Obdelovalni parametri svedra in frezala se med eksperimentalnim delom niso spreminjali.

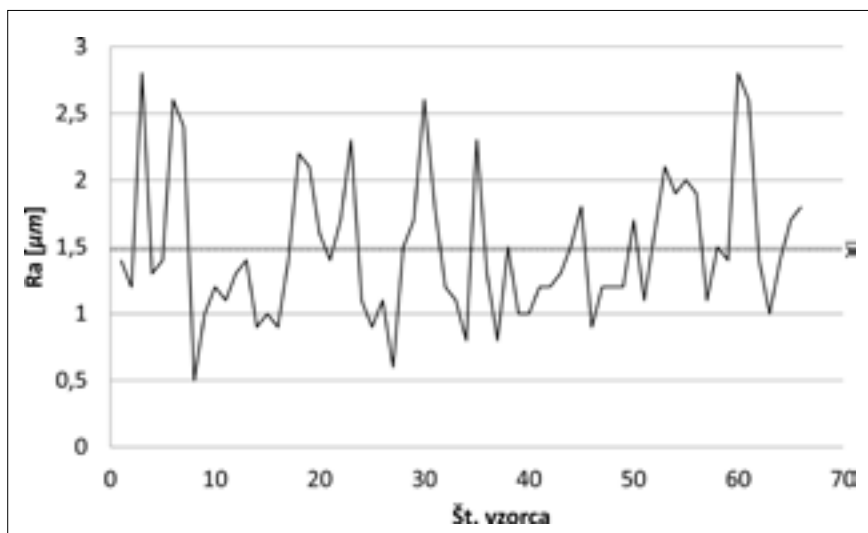
2 Pristop in metoda dela

Za doseganje sistematičnih izboljšav [1] tehnologije izdelave je bil izbran pregleden pristop z uporabo statističnega nadzora procesa (SPC) in DOE. Prvotna tehnologija izdelave predstavlja referenčni nivo za oceno izboljšav, ki so bile dosežene s strategijo eksperimentiranja kombinacij procesnih parametrov za izpolnjevanje specifikacij na stroškovno učinkovit način. Za doseganje želenega rezultata, ki vključuje omenjene faktorje, je bila uporabljena Taguchijeva ortogonalna matrika L12 [2]. Spre-



Slika 1. x-kontrolna karta hrapavosti površine Ra : spremljanje prvotnega procesa povrtavanja

Peter Eniko, univ. dipl. inž.,
MAPRO, d. o. o., Žiri; doc. dr.
Davorin Kramar, univ. dipl.
inž., Univerza v Ljubljani, Fa-
kulteta za strojništvo



Slika 2. x-kontrolna karta cilindričnosti: spremljanje prvotnega procesa povrtavanja

mljanje prvotnega postopka povrtavanja prikazujeta kontrolni karti SPC na *sliki 1* in *2*, iz katerih je razvidna slaba sposobnost procesa. Specifikaciji prvotnega procesa povrtavanja sta $Ra = 1,6 \mu m$ in cilindričnost $12 \mu m$. Za izboljšanje slabe sposobnosti procesa so potrebne izboljšave več točk tehnologije izdelave. Za njihovo učinkovito izvajanje je potreben pristop sistematičnega reševanja problemov.

2.1 Predeksperimenti

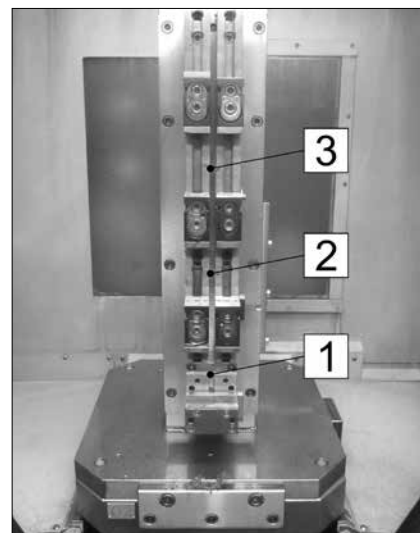
Sliki 1 in 2 prikazujeta spremljanje prvotnega postopka izdelave batne izvrtine na CNC-obdelovalnem centru. Meritve predstavljajo vzorčenje v polletni periodi. Iz vsake serije je

bilo vzeti 6 zaporedno izdelanih vzorcev. $Cpk_{Ra} = 0,07$ in $Cpk_{cilindričnost} = 0,18$ predstavljata slabo nadzorovano tehnologijo izdelave, ki zahteva sistematične izboljšave. Velik raztros meritev znotraj iste serije in odstopanje rezultatov med serijami kažeta na merilno neponovljivost. Na podlagi teh ugotovitev je bilo izvedeno merjenje vseh zaporedno izdelanih vzorcev znotraj iste serije. Iz meritev cilindričnosti /o/, ki so prikazane v x-kontrolni karti na *sliki 3*, so razvidne pomanjkljivosti vpenjalne naprave. Iz trenda meritev je razvidno odstopanje treh zaporedno izdelanih kosov.

Obstoječa vpenjalna naprava omogoča vpenjanje treh obdelovancev, kot prikazuje *slika 4*. Rezultati (*sli-*



Slika 3. x-kontrolna karta cilindričnosti: prikaz pomanjkljivosti vpenjalne naprave

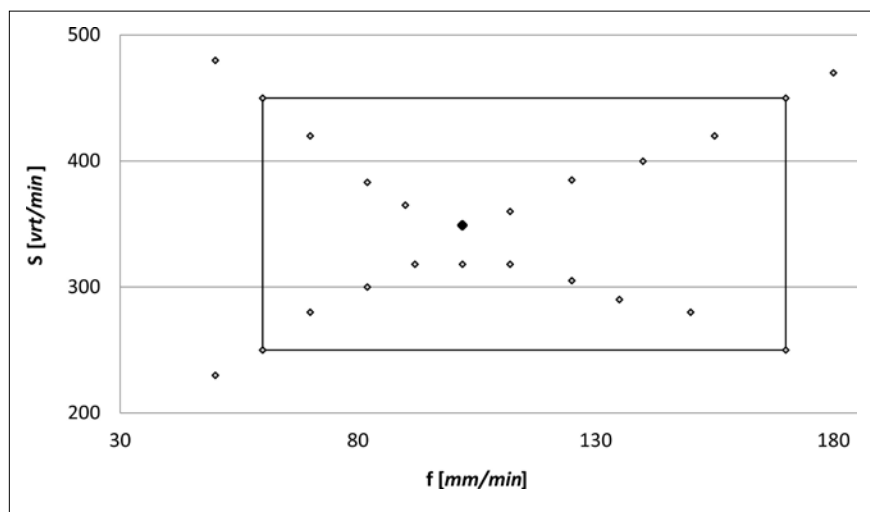


Slika 4. Vpenjalna naprava s tremi gnezdi

ka 3) kažejo, da edino gnezdo 1 zagotavlja ustrezno togost vpetja. Gnezdo 1 tako omogoča doseganje zahtevanih toleranc in ustrezno ponovljivost meritev. Gnezdi 2 in 3 sta bili zaradi neustrezne togosti, ki je vzrok slabe cilindričnosti in neponovljivosti meritev, izključeni iz nadaljnega eksperimentalnega dela, ki se je tako izvajalo samo na spodnjem gnezdu (*gnezdo 1, slika 4*).

Tehnološko okno povrtala je bilo določeno s predeksperimenti v redni proizvodnji. Uporabljeno je bilo povrtalo z dobo uporabe 250 min. Eksperimenti so se izvajali z začetne točke prvotno nastavljenih parametrov ($S = 250$ vrt./min, $f = 100$ mm/min; *slika 5*) v diagonalni smeri grafa S/f (*slika 5*). Ekstremne vrednosti tehnološkega okna (kvadrat na *sliki 5*) so bile določene s točko, ki predstavlja še sprejemljive obdelave. Takšen pristop je bil izbran, ker so eksperimenti potekali v redni proizvodnji, kjer izdelava neustreznih izdelkov ni sprejemljiva. Takšen pristop je primeren tudi za določanje tehnoloških oken ostalih konvencionalnih procesov obdelovanja maloserijskih proizvodnih procesov.

Kriterija določanja tehnološkega okna sta bila cilindričnost /o/ $< 4 \mu m$ in hrapavost površine $Ra < 1,4 \mu m$. Rezultati predeksperimentov so limite tehnološkega okna, ki so definirane v *tabeli 1* kot spodnji in zgornji nivo procesa povrtavanja.



Slika 5. Tehnološko okno procesa povrtavanja

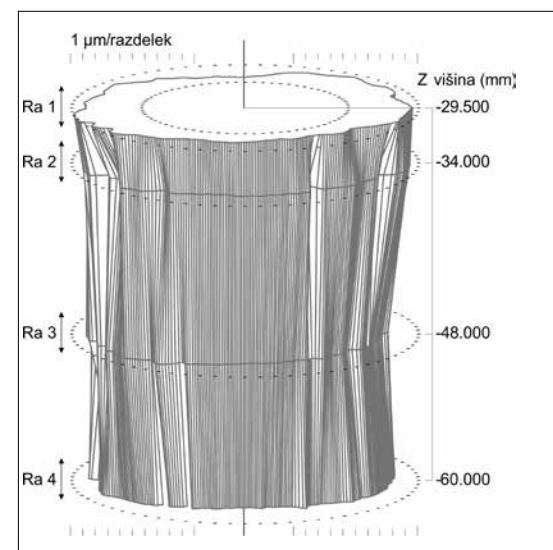
2.2 Priprava eksperimenta

Eksperimentalni del je bil izveden v redni proizvodnji in je tako vključeval realne faktorje šuma, ki se pri laboratorijskem testiranju običajno zanemarijo oziroma težko simulirajo. Dejavniki in njihovi nivoji so bili izbrani na podlagi pregleda sodobnih študij povrtavanja [1]. Eksperimenti so bili izvedeni s standardno Taguchijevo ortogonalno matriko L12 in analizirani z ANOVA. Z eksperimentalnim delom so bili raziskani vplivi časa obstojnosti povrtala, obdelovalnih prametrov (tabela 1) in pozicije vpetja na vpenjalni napravi na doseganje zahtevane cilindričnosti in površinske hrapavosti

batne izvrtine. Vsak eksperiment je bil ponovljen trikrat z namenom preverjanja stabilnosti procesa. Eksperimenti so se izvajali pri sobni temperaturi 23 °C s standardnim povrtalom DIN 8094B, premera 11,9 mm. Parametri tehnološkega okna so bili določeni s predeksperimenti, tako da sta vrednost in razpon vrednosti parametrov omogočala doseganje zahtevanih specifikacij. Razpon parametrov predstavljata nivo 1 in 2 v tabeli 1. Eksperimenti so se izvajali na CNC-obdelovalnem centru Mori Seiki NH 5000, katerega dodatna oprema omogoča spremljanje časa obstojnosti orodja v minutah. Obdelovanec je predstavljal kvader surovega železa GL 250 z dimenzijami 70 x 100 x 100 mm. Ma-

ksimalna doba obstojnosti povrtala, ki je bila določena z izkušnjami predhodnih serij, je bila 180 min. V obravnavanem eksperimentalnem delu je bilo uporabljeno povrtalo s 40 % daljšim časom obstojnosti. Pretečena doba delovanja uporabljenega povrtala je bila 250 min. Cilj uporabe takšnega povrtala je bil dokazati, da je moč doseči zahtevane specifikacije z daljšo dobo obstojnosti in tako ustvariti dodatne prihranke.

3 Merjenje cilindričnosti in hrapavosti površine batne izvrtine



Slika 6. Področja merjenja hrapavosti in krožnosti

Tabela 1. DOE in eksperimentalni rezultati

Eks. št.	Nivoji		Nastavljene vrednosti		Cilindričnost $[\mu\text{m}]$	Hrapavost površine $Ra [\mu\text{m}]$				Povprečna $Ra [\mu\text{m}]$
			f [mm/min]	S [vrt/min]		$Ra1$	$Ra2$	$Ra3$	$Ra4$	
1	1	1	60	250	1.99	0.1	0.2	0.2	0.1	0.15
2	1	1	60	250	2.34	0.2	0.2	0.4	0.3	0.275
3	1	1	60	250	2.24	0.1	0.1	0.2	0.3	0.175
4	1	2	60	450	2.83	0.2	0.2	0.3	0.2	0.225
5	1	2	60	450	2.36	0.3	0.2	0.2	0.2	0.225
6	1	2	60	450	2.95	0.1	0.2	0.1	0.2	0.15
7	2	1	170	250	3.38	1.1	1.1	1.3	1.1	1.15
8	2	1	170	250	3.21	0.8	0.9	1.2	1	0.975
9	2	1	170	250	3.09	1	1	1.1	1.2	1.075
10	2	2	170	450	3.34	1.3	1.2	1.2	1.3	1.25
11	2	2	170	450	4.18	1	0.7	1.7	1.4	1.2
12	2	2	170	450	2.99	0.9	0.8	1	1.2	0.975

Cilindričnost batne izvrtine je bila merjena z merilnikom Taylorround 585. Za vsak obdelovanec so bile pomerjene štiri krožnosti, ki skupaj definirajo cilindričnost, na štirih različnih višinah batne izvrtine (slika 6).

Za karakterizacijo hrapavosti površine je bil uporabljen parameter topologije površine Ra. Meritve so se izvajale z merilnikom hrapavosti MarSurf GD25. Za vsak vzorec so bile pomerjene štiri hrapavosti površine na različnih višinah batne izvrtine (slika 6).

4 Rezultati in diskusija

Cilindričnost in povprečna hrapavost (Ra) batne izvrtine, ki sta bili doseženi, sta bili merjeni po izvedbi eksperimentov po zgledu sodobnih študij [4, 5]. Rezultati eksperimenta so podani v tabeli 1. Korelacije vplivnih faktorjev med obdelovanjem batne izvrtine so bile določene z večkratno regresijo. Analiza variance (ANOVA) je bila uporabljena za identifikacijo signifikantnosti faktorjev glede na meritve cilindričnosti in hrapavosti površine, dosežene po obdelavi batne izvrtine. Eksperimentalni rezultati in optimizacijska procedura so bili analizirani s programom Design Expert 7.

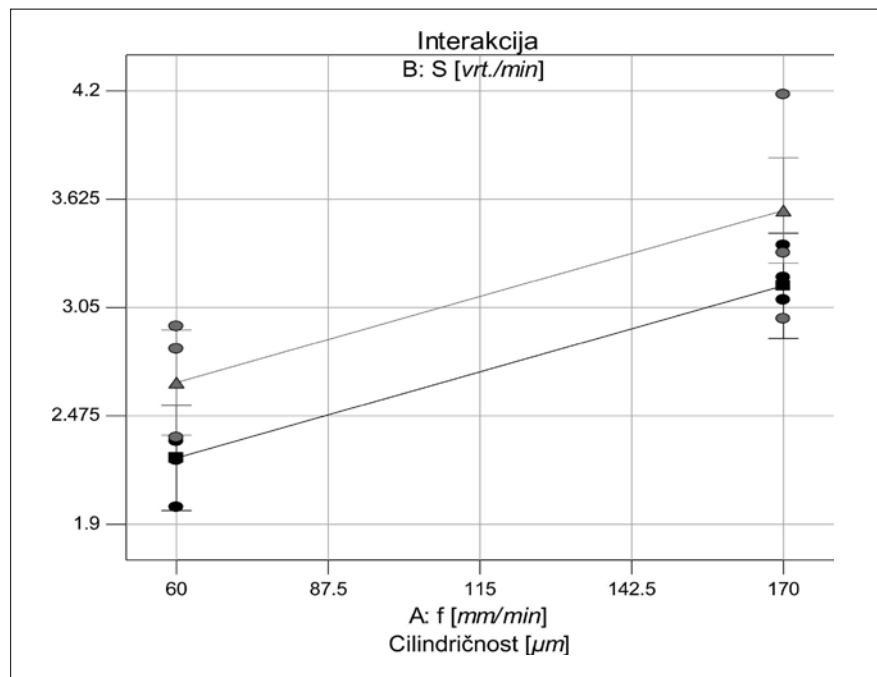
4.1 Regresijski model cilindričnosti

Za določitev optimalnih obdelovalnih parametrov so bili uporabljeni linearni regresijski grafi (slika 7). Oba kontrolna faktorja sta bila prepoznana kot signifikantna in dosežeta najboljši rezultat na spodnjem nivoju (nivo 1).

Regresijski model cilindričnosti je določen z regresijsko enačbo:

$$\text{Cilindričnost} = 1,2535 + 8,303 \cdot 10^{-3} \cdot f + 2 \cdot 10^{-3} \cdot S \quad (1)$$

Regresijski model cilindričnosti kaže, da se cilindričnost povečuje z večanjem podajalne hitrosti f in obodne hitrosti S . Podajalna hitrost ima najbolj dominanten efekt obdelovanja batne izvrtine, efekt obodne hitrosti pa je precej nižji. Model F-vrednosti 12,25 implicira, da je model signifikanten (tabe-



Slika 7. Interakcijski graf cilindričnosti za podajalno hitrost (A) in obodno hitrost (B)

Tabela 2. ANOVA faktorji modela cilindričnosti

Vtr	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečne kvadratov	F-vrednost	p-vrednost $P_{ob} > F$
Model	2,98	2	1,49	12,25	0,0027
A - f	2,50	1	2,50	20,56	0,0014
B - S	0,48	1	0,48	3,94	0,0783
R-Squared	0,7313				
S/N	7,528				

la 2). Obstaja le 0,27 % verjetnost, da je »model F-vrednosti« rezultat faktorjev šuma. Razmerje odziva in šuma – S/N (signal to noise) – večje kot 4, je dizertabilno. S/N-vrednost modela cilindričnosti 7,528 prikazuje ustrezen odziv. Ta model se lahko uporablja za navigacijo načrtovanja cilindričnosti.

4.2 Regresijski model hrapavosti površine

Kakovost dosežene hrapavosti površine batne izvrtine je obravnavana kot povprečna vrednost izmerjenih vrednosti hrapavosti površin (Ra).

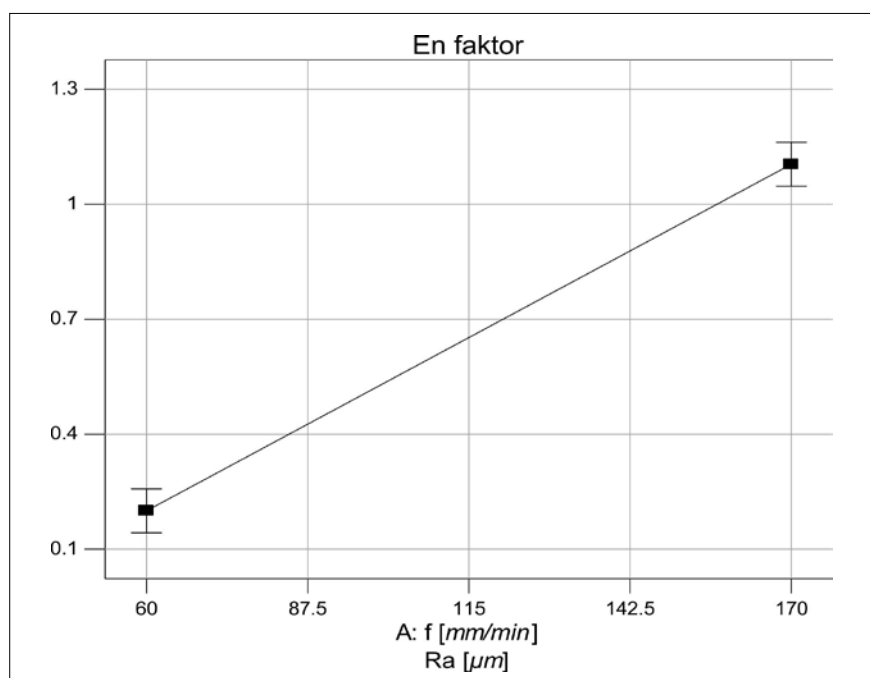
Graf na sliki 8 in ANOVA v tabeli 3 so bili uporabljeni za določitev op-

timalnih nastavitev parametrov eksperimentalnega načrta. Iz linearne regresijskega grafa in ANOVA je bil kontrolni faktor podajalne hitrosti f prepoznana kot signifikanten in poda najboljše rezultate na nivoju 1. Na drugi strani je bil kontrolni faktor obodne hitrosti S prepoznana kot nesignifikanten.

Regresijski model je definiran z enačbo (2).

$$Ra_{\text{povprečna}} \cdot 10^{-3} = -0,29318 + 8,2197 \cdot f \quad (2)$$

Glavno vlogo doseganja hrapavosti površine ima podajalna hitrost. F-vrednost modela 309,39 potrjuje model kot signifikanten. Obstaja le



Slika 8. Faktorski graf hrapavosti površine za podajalno hitrost

Tabela 3. ANOVA faktorjev modela hrapavosti površine Ra

Vir	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečje kvadratov	F-vrednost	p-vrednost P ob > F
Model	2,45	1	2,45	309,39	< 0,0001
A - f	2,45	1	2,45	309,39	< 0,0001
R-Squared	0,9687				
S/N	24,875				

0,01-odstotna možnost, da predstavljeni rezultati temeljijo na efektih faktorjev šuma. Podajalna hitrost ima ključno vlogo pri doseganju hrapavosti površine.

zgornja in 0,15 μm spodnja meja optimizacijskega modela (tabela 4). Optimizacija regresijskih modelov pri upoštevanju nastavitve ciljnih kriterijev rezultira v nast-

4.3 Optimizacijski model in potrditveni test za ciljno cilindričnost in hrapavost površine

Za optimizacijo procesa povrtavanja sta bila uporabljena oba regresijska modela. Čeprav specifikacije določajo zgornjo mejo cilindričnosti $\phi / < 3 \mu\text{m}$, je bila ciljna vrednost nastavljena na $\phi / = 2 \mu\text{m}$ za določitev bolj robustnega modela (tabela 4). Ciljna vrednost hrapavosti površine (drugi kriterij) je bila nastavljena na $Ra = 0,3 \mu\text{m}$, kjer je $0,4 \mu\text{m}$

Tabela 4. Kriteriji optimizacije

	Ciljna vrednost [μm]	Spodnja meja [μm]	Pomembnost	Zgornja meja [μm]	Pomembnost
Cilindričnost	2	1,5	5	3	1
Ra	0,3	0,15	3	0,4	1

Tabela 5. Kontrolni faktorji in predvidene vrednosti odzivov

f [mm/min]	S [vrt./min]	Cilindričnost [μm]	Ra [μm]	Dizertabilnost
72,2	250	2,35	0,3	0,805

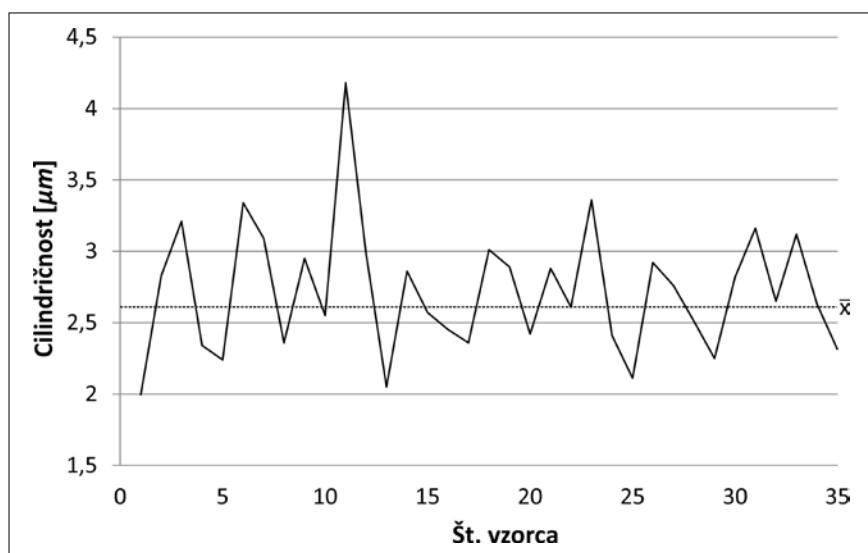
vitvah procesnih parametrov, ki jih prikazuje tabela 5.

Za uporabo optimizacijskega modela v realni maloserijski proizvodnji je bilo potrebno preveriti tudi robustnost modela. Optimizacijski model je bil implementiran v redno proizvodnjo. Merjenih je bilo 35 zaporedno izdelanih vzorcev. Rezultate prikazujeta x-kontrolni karti (sliki 9 in 10). Povprečna vrednost hrapavosti površine $Ra_{\text{povprečna}} = 0,203 \mu\text{m}$ in cilindričnost $\phi_{\text{povprečna}} = 2,677 \mu\text{m}$ sta v sprejemljivi vrednosti predvidenih vrednosti odzivov. Interpretacija takšnega rezultata lahko vodi k odpravi procesa honanja, vendar je raztros vrednosti prevelik.

Tabela 6 prikazuje napredek sposobnosti procesa povrtavanja. Drugi in tretji stolpec prikazujeta indeks Cpk, ki je bil izračunan za obstoječi in izboljšani proces povrtavanja. Zadnji stolpec prikazuje Cpk izboljšane procesa povrtavanja s specifikacijami procesa honanja. Iz rezultatov je očitno, da je napredek sposobnosti procesa povrtavanja zelo velik. Tudi pri upoštevanju specifikacij procesa honanja je indeks Cpk izboljšane procesa povrtavanja večji od prvotnega. Optimizacija procesa povrtavanja se je izkazala kot drastično skrajšanje časovnega normativa procesa honanja. Batne izvrtine s širšim tolerančnim poljem ($\phi / < 4 \mu\text{m}$ in $Ra < 0,5 \mu\text{m}$) bi lahko bile izdelane z uporabo obstoječe optimizacije – brez honanja.



Slika 9. *x*-kontrolna karta hrapavosti površine Ra: potrditveni test



Slika 10. *x*-kontrolna karta cilindričnosti: potrditveni

Tabela 6. Izboljšave procesa povrtavanja

	Obstoječe povrtavanje	Optimirano povrtavanje	Povrtavanje specifikacije honanja
Ra [μm]	1,6	1,6	0,4
Cilindričnost [μm]	12	12	3
Cpk_{Ra}	0,07	5,23	0,74
$Cpk_{cilindričnost}$	0,18	8,36	0,29

■ 5 Zaključek

Z uporabo metodologije SPC in DOE je bil izboljšán proces povrtavanja cilindra batne izvrtine. Iz raziskave se lahko povzamejo sledeči zaključki:

- Rezultati SPC prikazujejo, da prvotni proces povrtavanja ne dosega zahtevanih specifikacij.

Glavni vzrok nizke sposobnosti procesa je neustrezna togost vpenjalne naprave. Samo eno vpenjalno gnezdo (od treh) omogoča doseganje specifikacij. Zamenjava oziroma nadgradnja vpenjalne naprave je obvezna.

- Regresijska analiza da modele za oba odziva, pri tem sta tako hrapavost površine kot cilindričnost

batne izvrtine na ustreznem nivoju zaupanja – 96 % in 73 %.

- Rezultati kažejo, da podajalna hitrost vpliva na oba odziva, pri tem pa je bil ugotovljen tudi manjši vpliv obodne hitrosti na doseženo cilindričnost batne izvrtine.
- Za optimizacijo procesa povrtavanja sta bila uporabljena dva kriterija; cilindričnost $/o/ \leq 2 \mu\text{m}$ in $Ra \leq 0,3 \mu\text{m}$. Testi v redni proizvodnji so potrdili regresijska modela in optimizacijsko strategijo.
- Z optimizacijo procesa povrtavanja se je sposobnost procesa zelo povečala in se izražala kot drastično znižanje časovnega normativa procesa honanja. Cilinder s širšim tolerančnim poljem ($/o/ < 4 \mu\text{m}$ in $Ra < 0,4 \mu\text{m}$) je z uporabo obstoječega modela lahko izdelan brez honanja.
- V eksperimentalnem delu je bilo uporabljeno povrtalo s 40 % daljšo pretečeno dobo uporabe kot pri prvotnem procesu.

Viri

- [1] P. Müller, G. Genta, G. Barbato, L. De Chiffre, R. Levi, Reaming process improvement and control: an application of statistical engineering, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 196–201, 2012.
- [2] G. Taguchi, S. Chowdhury, Y. Wu, Taguchi's quality engineering handbook, American supplier institute, 2005.
- [3] B. Tadic, D. Vzekelc, D. Miljanic, B. Bogdanovic, I. Macuzic, I. Budak, P. Todorovic, Model testing of fixture-workpiece onterface compliance in dynamic conditions, Journal of Manufacturing Systems, 33, 76–83, 2014.
- [4] B. Gapinski, M. Wiecezowski, Measurement of diameter and roundness on incomplete outline of element with three-lobbing deviation, Procedia Engineering, 247–254, 2014.
- [5] X. Wen, Y. Zhao, D. Wang, J. Pan, Advanced Monte Carlo and GUM methods for the evaluation of measurement uncertainty of cylindricity error, Precision Engineering, 856–864, 2013.

Optimization of manufacturing technology in real production

Abstract: This paper deals with the optimization of the reaming process on a CNC center to the extent that with a controlled process suitable geometrical specifications are achieved without honing. To attain systematic improvements in the manufacturing technology, transparent approach with the use of quality tools has been selected. Statistical process control (SPC) on bore cylindricity and surface roughness (Ra) of the original reaming process shows pure process capability and demonstrates the shortcomings of the clamping device. Process modeling was performed by pre experiments and the design of experiments (DOE) methodology. Regression analyses gave models for both responses under consideration, namely cylinder cylindricity and surface roughness, and they were adequate at 73 % and 96 % confidence level, respectively. The resulting optimization model was implemented in real production. With the reaming process optimization, the capability of the process improved enormously and it resulted in drastic honing time reduction.

Keywords: DOE, SPC, reaming, optimization




Mednarodni sejem za avtomatiko, robotiko, mehatroniko ...
International Trade Fair for Automation, Robotics, Mechatronics ...

SPONZOR
ELEKTROPOJ

Celje, Slovenija
28.-30.01.2015
www.ifam.si

 **JAKŠA**
MAGNETNI VENTILI
od 1965

- vrhunska kakovost izdelkov in storitev
- zelo kratki dobavni roki
- strokovno svetovanje pri izbiri
- izdelava po posebnih zahtevah
- širok proizvodni program
- celoten program na internetu



www.jaksa.si



Jakša d.o.o., Šlandrova 8, 1231 Ljubljana
T (0)1 53 73 066, F (0)1 53 73 067, E info@jaksa.si