

VYBRANÉ ASPEKTY PRESNOSTI OBROBKOV PRI TVRDOM SÚSTRUŽENÍ

Doc. Dr. Ing. Miroslav Neslušan, Žilinská univerzita, Strojnícka fakulta, Katedra obrábania a automatizácie, 010 26 Žilina, Tel: +421-41-513 2785,

E-mail: miroslav.neslusan@fstroj.utc.sk

Anotácia: Článok sa zaoberá problematikou presnosti pri tvrdom sústružení v súvislosti s tuhosťou technologickej sústavy ako aj elastickou deformáciou obrobeného povrchu. V článku je porovnanie sústrużenia ložiskovej ocele 100Cr6 v stave kalenom so žíhaným stavom ako aj porovnanie s oceľou 11 500.3. Článok taktiež poukazuje na vplyv opotrebenia nástroja na rozmerovú presnosť.

Kľúčové slová: sústružení, kalená oceľ, presnosť, elastická deformácia, opotrebenie

1. Úvod

Sústružení kalených ocelí sa ukazuje byť (za istých podmienok) vhodnou alternatívou brúsenia [1, 2]. Na druhej strane vznikajú isté obtiaže súvisiace s požiadavkami na presnosť rozmerovú ako aj tvarovú. Tieto obtiaže sú dané silovým pôsobením v sústave ako aj vlastnosťami obrobkov. Intenzita opotrebenia je pri obrábaní kalených ocelí relatívne vysoká čo vedie k pomerne intenzívnemu nárastu silového pôsobenia (predovšetkým zložky F_p). Zmena zložiek reznej sily je úzko spätá s geometriou nástroja, predovšetkým s uhlom čela. Veľká hodnota F_p pri sústružení kalených ocelí je dôležitá predovšetkým z hľadiska rozmerovej presnosti obrobkov. Tu je potrebné vidieť tri aspekty vplyvu F_p .

Jednou je elastická deformácia v kontakte nástroja a obrobku [1] v súvislosti s tuhosťou sústavy (odtláčenie nástroja ako aj obrobku). Tento aspekt je možné eliminovať zväčšením tuhosti sústavy.

Druhou je zmena rozmerov obrobkov v súvislosti s opotrebením nástroja ako aj nárastom F_p a s tým súvisiacim nárastom odtlačenia nástroja z kontaktu (zmenšuje sa hĺbka rezu). Rozmer obrobkov je potrebné kontrolovať a priebežne korigovať polohu nástroja voči obrobku na zabezpečenie výroby obrobkov v predpísaných toleranciách.

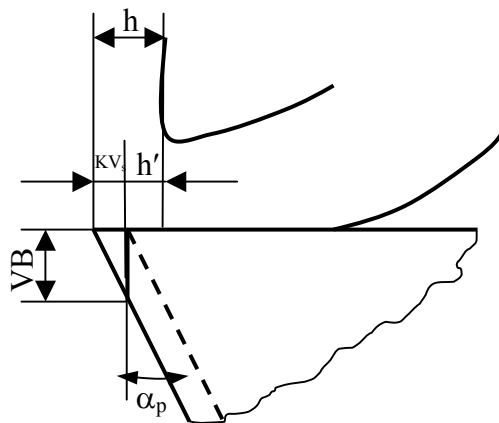
Tretím aspektom je elastická deformácia materiálu obrobku. V súvislosti s polomerom zaoblenia reznej hrany určitá hrúbka odrezávanej vrstvy podteká pod reznú hranu a je deformovaná v súvislosti s pôsobením chrbtovej plochy. Celková deformácia je súčtom plastickej a elastickej deformácie. Rozmer obrobku je potom ovplyvnený veľkosťou elastickej deformácie, pretože v súvislosti s ňou rozmer obrobku za oblasťou kontaktu chrbtovej plochy a obrobku rastie práve o veľkosť elastickej deformácie. Vzhľadom na veľký pomer medzi tvrdosťou materiálu a modulom pružnosti, vysoké silové pôsobenie v oblasti chrbtovej plochy nástroja spôsobuje pomerne veľkú elastickú deformáciu.

Zvýšené silové pôsobenie v radiálnom smere sa negatívne premieta nielen do rozmerov ale aj tvarovej presnosti obrobkov. Predkladaný príspevok sa preto zaoberá problematikou rozmerovej a tvarovej presnosti pri tvrdom sústružení a porovnaním so sústružením ocelí v stave žíhanom na mätko.

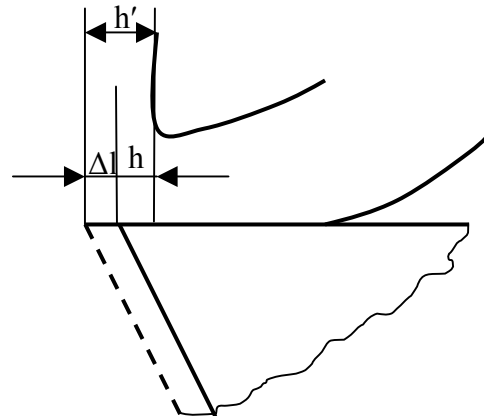
Presnosť vyrábaných súčiastok najviac ovplyvňuje [3, 4]:

- nepresnosť stroja - geometrická, kinematická, dynamická,
- tuhosť technologickej sústavy,
- nepresnosť nástroja predovšetkým vplyvom opotrebenia,
- nepresnosť prípravkov,
- vplyv teplotných deformácií nástroja, stroja a obrobku,
- nepresnosti dané upínaním (predovšetkým u tenkostenných súčiastok),

- elastická deformácia obrobenej plochy.



Obr. 1 Vplyv opotrebenia nástroja na hrúbku odoberanej vrstvy pri obrábaní



Obr. 2 Vplyv teplotnej rozťažnosti nástroja na hrúbku odoberanej vrstvy pri obrábaní

Je známe, že opotrebenie nástroja môže podstatne vplyvať na presnosť vyrobených súčiastok. Nástroj sa opotrebuje jednak na čele a jednak aj na chrbte. Opotrebenie na čele neovplyvňuje rozmery obrobku, zato však opotrebenie na chrbte má na ne podstatný vplyv. Od opotrebenia na chrbte závisí postupné zväčšovanie alebo zmenšovanie priemeru sústruženého predmetu. Opotrebenie na chrbte v oblasti hrotu VB (obr. 1) určuje rozmerové, čiže radiálne opotrebenie KV_s . Medzi opotrebením VB a rozmerovým opotrebením KV_s je vzťah [3, 4, 5]:

$$KV_s = VB \cdot \operatorname{tg} \alpha_p \quad (\text{mm}) \quad (1)$$

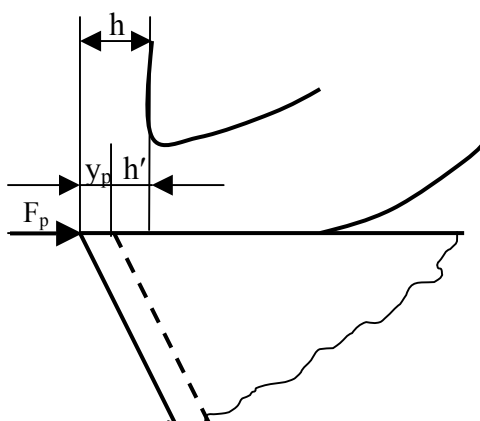
Významný vplyv na presnosť obrábania majú teplotné deformácie v sústave obrábania. Aj keď do nástroja prechádza pomerne malé množstvo tepla vyvinutého pri obrábaní, aj tak teplota rezného klina dosahuje vysoké hodnoty, v dôsledku čoho sa nástroj predlžuje (obr. 2). Teplotná deformácia nástroja vyloženého z nožovej hlavy vo vzdialenosti l sa dá približne vypočítať zo vzťahu

$$\Delta l = l \alpha (\Theta - \Theta_o) \quad (\text{mm}) \quad (2)$$

kde l - dĺžka vyloženia nástroja (mm), α - koeficient lineárnej teplotnej rozťažnosti ($^{\circ}\text{C}^{-1}$), Θ - stredná teplota nástroja ($^{\circ}\text{C}$), Θ_o - teplota okolia ($^{\circ}\text{C}$).

Vplyvom predĺženia noža sa pri sústružení vonkajších rotačných plôch zmenšujú rozmery obrobku. Pri obrábaní vnútorných plôch sa zväčšujú.

V súvislosti s tuhosťou technologickej sústavy, presnosť obrábania závisí od rezných síl, najmä od sily F_p . Účinkom síl pôsobiacich na rôzne miesta technologickej sústavy sa tieto deformujú, čím sa mení poloha reznej hrany nástroja (obr. 3). Výsledkom takéhoto premiestnenia je vznik nepresnosti tvaru, vzájomnej polohy a rozmerov [3, 4]. Deformácia sústavy je tým menšia, čím väčšia je jej tuhosť. Preto tuhosť technologickej sústavy je jednou zo základných podmienok zabezpečenia presnosti obrábania.

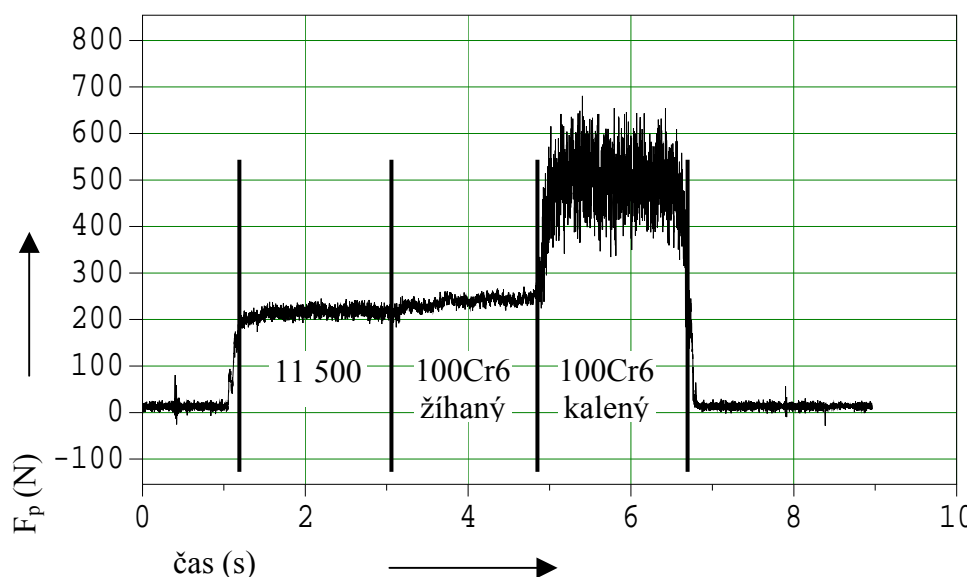


Obr. 3 Vplyv tuhosti na hrúbku odoberanej vrstvy pri obrábání

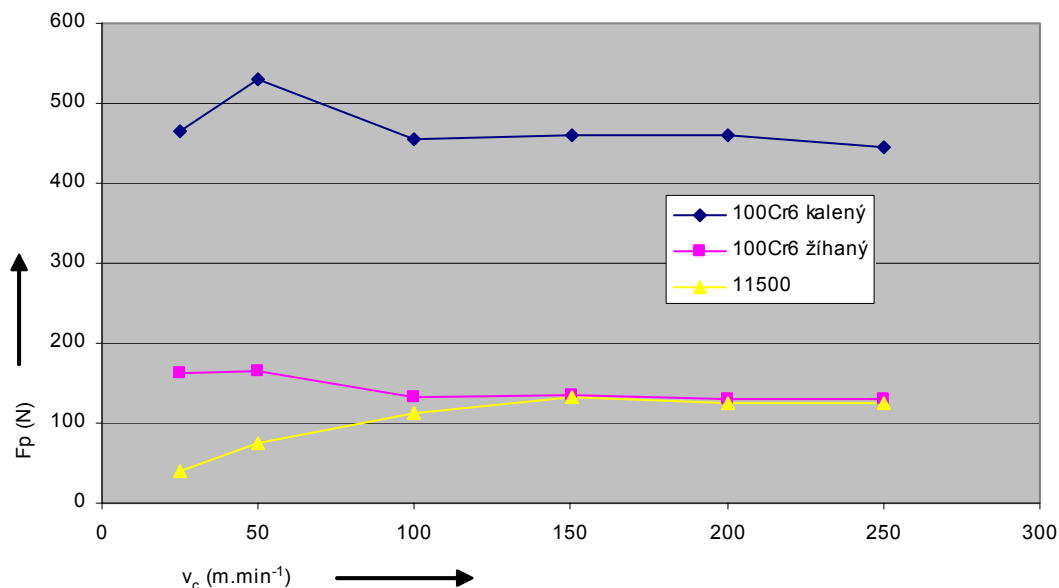
2. Podmienky a výsledky experimentov

Pri experimentálnych prácach bola sústružená ložisková oceľ 100Cr6 priemeru 56 mm tvrdosti 62 HRC (martenzitická štruktúra) ako aj v stave žíhanom na mätko. Pre porovnanie bolo použitá konštrukčná oceľ 11500. Ako nástroj bola použitý keramický nástroj DNGA150408 s TiN povlakom. Experimenty boli realizovaná za sucha na sústruhu SUI 40. Na meranie zložiek reznej sily bol použitý dynamometer KISTLER, na meranie rozmerových odchýlok povrchu bol použitý prístroj MP 125. Rezné podmienky: $v_c = 25$ až $250 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $f = 0,051$ až $0,271 \text{ mm}$, $a_p = 0,25 \text{ mm}$. Na experimentálne merania bol pripravený trn. Na tento trn boli nasunuté krúžky šírky 8 mm aby bolo možné sústružiť všetky materiály na 1 prechod nástroja za konštantných podmienok.

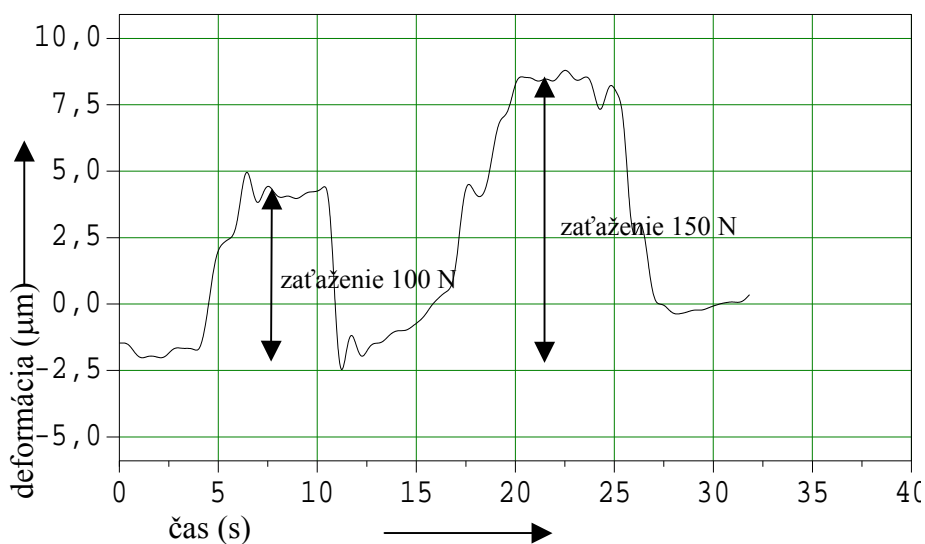
Prvotnou úlohou analýz rozmerovej presnosti obrobkov je meranie zložiek reznej sily, predovšetkým radiálnej zložky F_p . Ako ukazuje záznam F_p (obr. 4), pri sústružení je veľkosť F_p v prípade sústruženia kalených ocelí výrazne vyššia ako v prípade sústruženia ocelí žíhaných. Pokiaľ u žíhaných ocelí je veľkosť F_p do 200 N, pri sústružení kalenej ocele dosahuje až 500N (obr. 5).



Obr.4 Záznam radiálnej zložky reznej sily pri sústružení, $v_c = 100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $f = 0,271 \text{ mm}$



Obr. 5 Vplyv reznej rýchlosti na veľkosť F_p pre rôzne materiály, $f = 0,09 \text{ mm}$



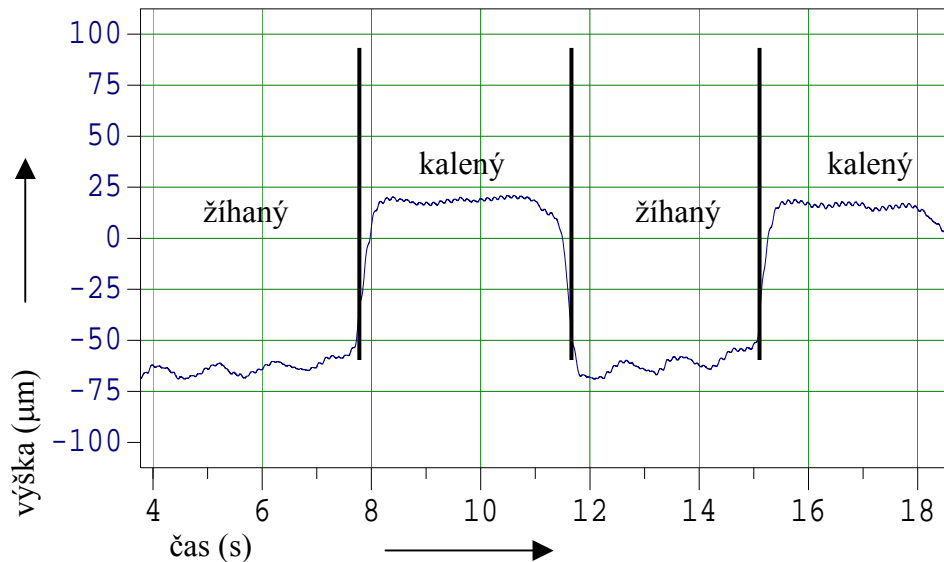
Obr. 6 Veľkosť posunutia upínacieho trnu pri zaťažovaní

Radiálna zložka reznej sily sama o sebe nie je rozhodujúca v súvislosti v rozmerovú presnosťou ale len v súvislosti s tuhosťou technologickej sústavy. Aby teda bolo možné určiť vplyv silového pôsobenia na rozmerovú presnosť je potrebné realizovať meranie tuhosti sústavy. Toto meranie pozostáva z merania posunutia (alebo deformácie) trnu, na ktorom sú upnuté súčiastky ako aj posunutia samotného nástroja (respektíve upínacej hlavy) pri známom zaťažovaní. Výsledná tuhosť (odtlačenie) nástroja súvisí s posunutím oboch týchto častí sústavy a výsledná tuhosť je daná ich súčtom. Na obr. 6 je znázornená veľkosť posunutia upínacieho trnu pri zaťažovaní zaťažovaním 100 a 150 N. Obdobný záznam bol získaný v súvislosti s posunutím upínacej hlavy pri zaťažovaní zaťažovaním 150 N. Z meraní vyplýva, že tuhosť sústavy je približne $14,5 \text{ N} \cdot \mu\text{m}^{-1}$.

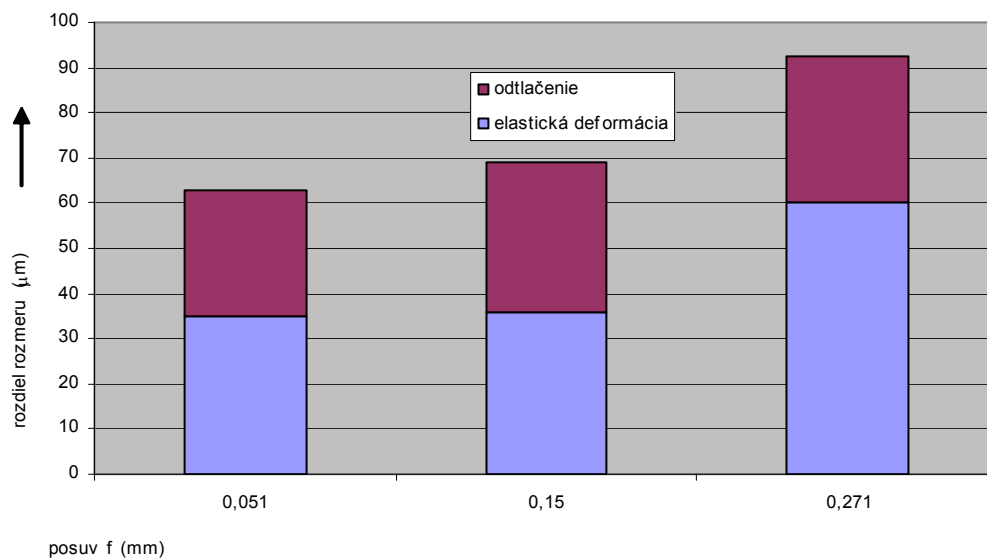
Z analýzy vplyvu teploty vyplýva, že rozdiely v rozmeroch medzi sústruženým obrobkom v stave kalenom a žíhanými ocelami (dané tepelnou rozťažnosťou obrobku, respektíve nástroja) sú zanedbateľne malé. Rovnako je vplyv opotrebenia zanedbateľný vzhľadom na to, že na spoločný trn boli upnuté krúžky šírky 8 mm (5 krúžkov za sebou). Na dráhe 40 mm je vplyv opotrebenia nástroja na rozmer krúžkov takmer nulový. (Na trn boli

upnuté súčiastky v poradí žíhaný, kalený, žíhaný, kalený a opäť žíhaný). Po sústružení boli identifikované zmeny v rozmeroch súčiastok na prístroji pre meranie priamosti MP 125. Charakteristický záznam je na obr. 7.

Po zanedbaní vplyvu opotrebenia a teploty je rozdiel v rozmeroch krúžkov daný jednak odlišnou veľkosťou odtlačenia (toto rozdielne odtlačenie je dané tuhosťou sústavy a rozdielom vo veľkosti F_p medzi kalenou oceľou a žíhanou – červený pás) a odlišnou intenzitou elastickej deformácie (modrý pás), obr. 8 až 10.



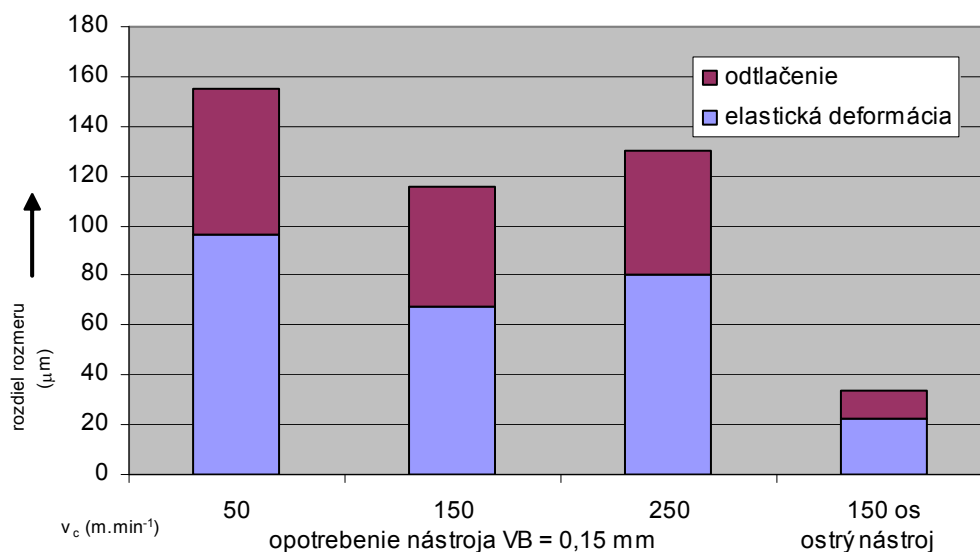
Obr. 7 Záznam rozmerov krúžkov upnutých na spoločný trn po sústružení, $VB = 0,15$ mm, $v_c = 100$ m.min⁻¹, $f = 0,271$ mm, 100Cr6



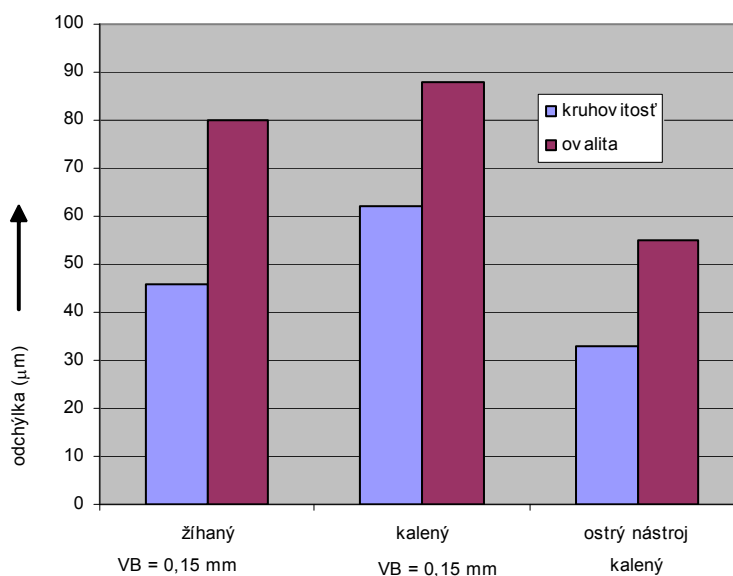
Obr. 8 Vplyv posuvu na rozdiel vo veľkosti elastickej deformácie a odtlačenia nástroja medzi oceľou 100Cr6 v stave žíhanom a kalenom stave, $VB = 0,15$ mm, $v_c = 100$ m.min⁻¹

Hodnoty v obr. 8 až 10 nie sú absolútnymi hodnotami odtlačenia, respektíve veľkosti elastickej deformácie, ale reprezentujú rozdiel vo veľkosti odtlačenia, respektíve veľkosti elastickej deformácie medzi sústružením ocele kalenej a žíhanej. Výsledky analýz poukazujú na skutočnosť, že veľkosť elastickej deformácie zohráva dominantnú úlohu pri sústružení kalených ocelí a zásadným spôsobom ovplyvňuje rozmerovú presnosť obrobkov. Uvedená

skutočnosť súvisí s veľkým modulom pružnosti kalených materiálov v porovnaní s oceľou v žíhanom stave (silové pôsobenie je v oveľa väčšej miere absorbované pružnou deformáciou u materiálu s vysokým modulom pružnosti v porovnaní s materiálom s nízkym modulom).



Obr. 9 Vplyv reznej rýchlosti a opotrebenia nástroja na rozdiel vo veľkosti elastickej deformácie a odtlačenia nástroja medzi oceľou 100Cr6 v stave kalenom a oceľou 11 500.3, $f = 0,09$ mm



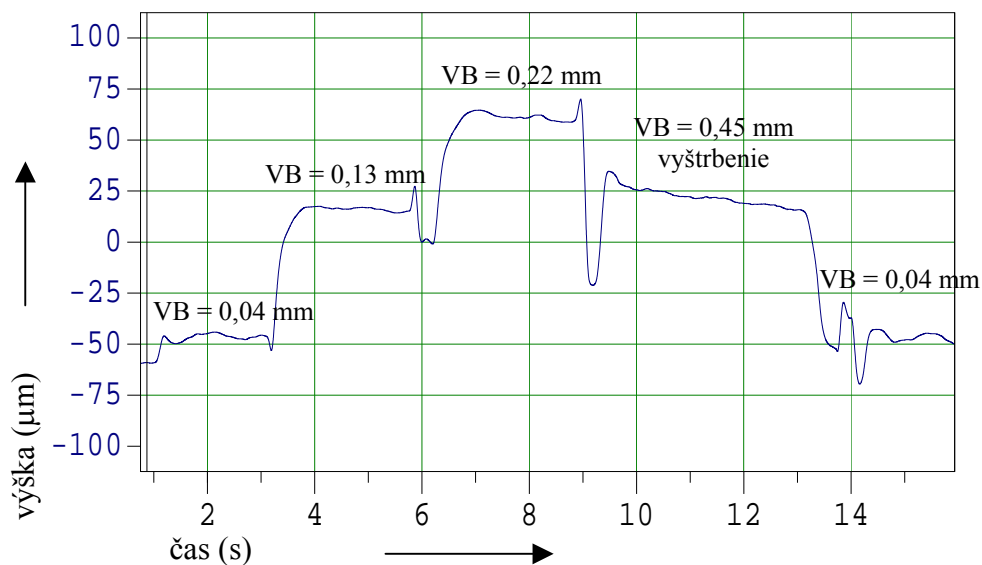
Obr. 10 Porovnanie odchýlok kruhovitosti a ovality v súvislosti s tepelným spracovaním a opotrebením nástroja, $v_c = 100$ m.min⁻¹, $f = 0,09$ mm

Z obr.8 až 10 vyplýva, že veľkosť odtlačenia ako aj elastickej deformácie rastie s veľkosťou posuvu a teda s rastúcou hodnotou F_p , taktiež má klesajúci trend v súvislosti s rastúcou reznou rýchlosťou. Výrazne sa do týchto hodnôt premieta opotrebenie nástroja. Ako ukazuje obr. 10, pri sústružení ostrým nástrojom je veľkosť odtlačenia nástroja ako aj elastickej deformácie oveľa menšia ako pri opotrebenom nástroji.

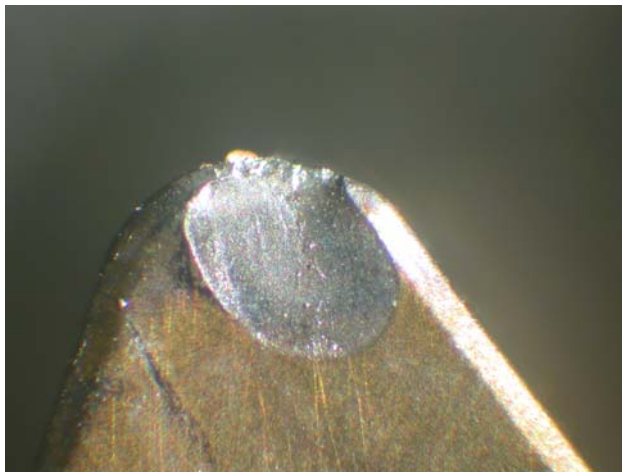
Ako ukazuje obr. 11, s opotrebením nástroja sa rozmer obrobkov výrazne mení. S rastúcim opotrebením rastie aj rozmer súčiastok pri sústružení vonkajších rotačných plôch. Táto zmena je daná jednak odlišným odtlačením nástroja pre rôzne opotrebenie nástroja ale aj zmenou rozmeru nástroja vplyvom vzniklého opotrebenia na chrbte VB ako to ilustruje obr. 1.

(Záznam na obr. 11 bol získaný sústružením jedného obrobku nástrojom s rôznym opotrebením, pričom začiatok a koniec obrobku boli sústružené ostrým nástrojom.)

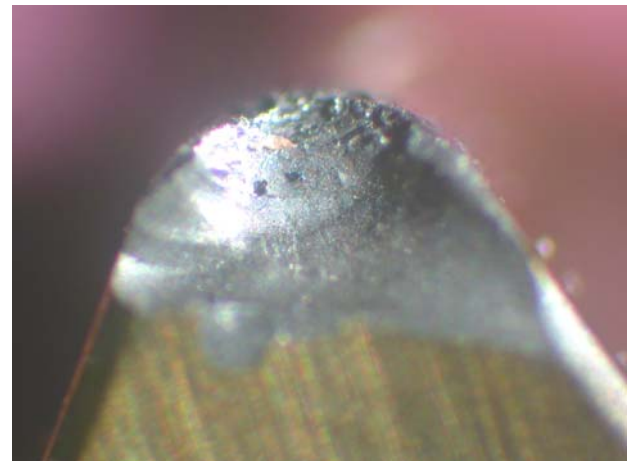
Ako ukazuje obr. 11, s rastúcim opotrebením nástroja sa rozmer obrobku postupne zväčšuje až do okamihu kedy dochádza k vyštrbeniu reznej hrany (obr. 12). Na čele nástroja sa vytvára lomom pozitívna geometria (obr. 12), veľkosť F_p prudko poklesne a v súvislosti s tým sa zmenší aj rozmer obrobku. Obdobný charakter má aj veľkosť radiálnej zložky reznej sily ako to ukazuje obr. 13. Z obr. 13 taktiež vidno, že veľkosť F_p rastie s opotrebením nástroja oveľa prudšie pri sústružení kalenej ocele ako v prípade sústruženia žihanej ocele.



Obr. 11 Záznam rozmerov krúžkov upnutých na spoločný trn po sústružení pre rôzne hodnoty opotrebenia nástroja, $v_c = 170 \text{ m.min}^{-1}$, $f = 0,09 \text{ mm}$, 100Cr6 62HRC



a) vyštrbenie reznej hrany – čelná plocha



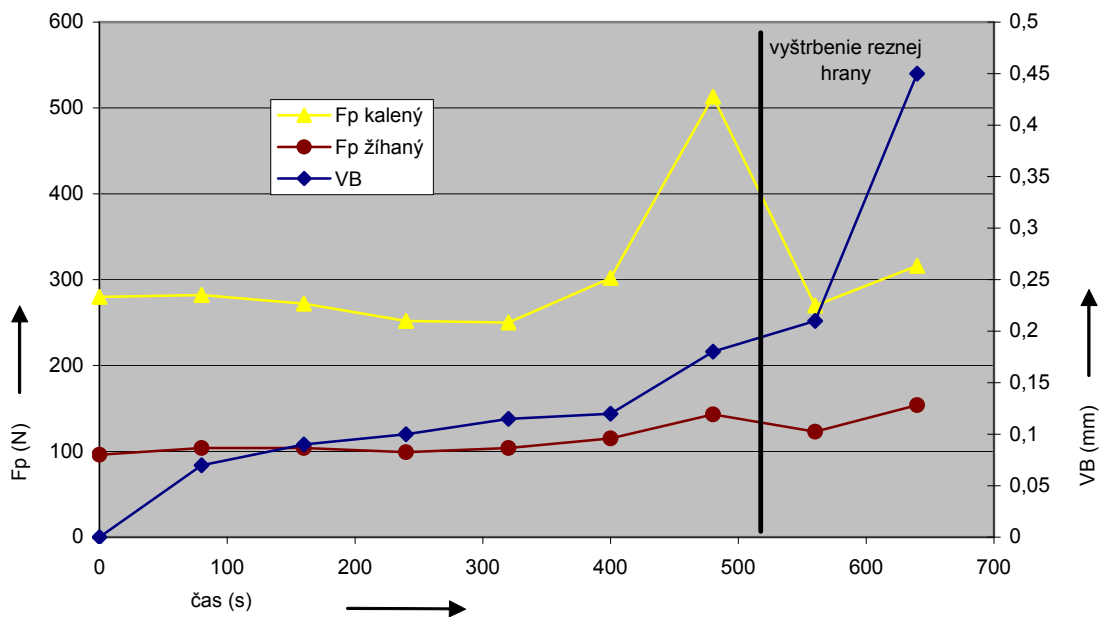
b) masívny lom reznej hrany – čelná plocha

Obr. 12 Porovnanie neopotrebenej reznej hrany s rôznymi stupňami opotrebenia nástroja, $v_c = 170 \text{ m.min}^{-1}$, $f = 0,09 \text{ mm}$

3. Záver

Vysoké hodnoty F_p pri sústružení kalených ocelí ako aj veľká elastická deformácia spôsobujú obtiaže súvisiace s dosahovaním požadovanej presnosti obrobkov. Na druhej strane dnes čoraz viac rastú nároky na presnosť. Táto skutočnosť sa priamo dotýka všetkých dokončovacích operácií, medzi ktoré tvrdé sústruženie zaiste patrí. V súčasnosti sú pre tvrdé sústruženie používané obvykle konvenčné sústruhy. Tieto stroje sú niekedy modifikované

a cieľom dosiahnuť vyššiu presnosť a nižšiu tvrdosť. Modifikácia pozostáva z úpravy upínacích častí vedenia, posuvových mechanizmov, uloženia a pod. Aplikácia takto modifikovaných strojov umožňuje vyrábať súčiastky v triedach presnosti IT6 až IT7. Najnovší vývoj v oblasti obrábacích strojov vedie ku konceptu vysoko presných sústruhov. Presnosť výroby súčiastok na týchto strojoch je porovnateľná s presnosťou akú je možné dosiahnuť pri brúsiacich operáciách. Rozmerová a tvarová presnosť v triedach IT4 až IT6 je možná na vysoko presných sústruhoch. Pri požiadavkách na výrobu súčiastok v triede presnosti IT3 až IT5 je potrebné využívať stroje ktoré majú odlišnú koncepciu [1, 2]. Zvláštnu pozornosť je potrebné venovať geometrickej a kinematickej presnosti ako aj tuhosti stroja. Každá odchýlka polohy medzi nástrojom a obrobkom spôsobuje nepresnosť obrobku. Moderné koncepcie vysoko presných sústruhov sú charakteristické hydrostatickými vedeniami a vretenami uloženými na prírodnej žule.



Obr. 13 Vplyv opotrebenia reznej hrany na veľkosť F_p , $v_c = 170 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,09 \text{ mm}$, 100Cr6

Literatúra:

- [1] TONSHOFF, H.K. - ARENDT, C. - BEN AMOR, R.: *Cutting of hardened steel*, CIRP Annals 2/2000, p.547 – 567
- [2] SHAW, M.C.: *The Mechanism of Chip Formation with Hard Turning Steel*, CIRP Annals, 47/1/1998, p.77 – 83
- [3] BUDA, J. - BÉKÉS, J.: *Teoretické základy obrábania kovov*, ALFA Brat. 1977
- [4] BUDA, J. – SOUČEK, J. – VASILKO, K. : *Teória obrábania*, ALFA Bratislava 1984
- [5] BEŇO, J.: *Teória rezania kovov*, Viena Košice 1999
- [6] NESLUŠAN, M. – TUREK, S.- BRYCHTA, J. – ČEP, R. – TABAČEK, M.: *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*, Edis Žilina 2007, ISBN 9788080707118, 345 s.
- [7] MRKVICA, I.: *Návody ke cvičení z obrábacích nástrojů – 1. část*. Ostrava, VŠB-TU, 1. vydání, 1999, 148 s.. ISBN 80-7078-624-8.
- [8] HUMÁR, A.: *Slituté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. Brno : CCB spol. s r. o. Brno ISBN 80-85825-10-4



- [9] ŘEHOŘ, J.: *Teoretické a experimentální studium problematiky HSC obrábění ocelí vysoké pevnosti a tvrdosti*: DDP ZČU KTO: Západočeská univerzita v Plzni, 2004

