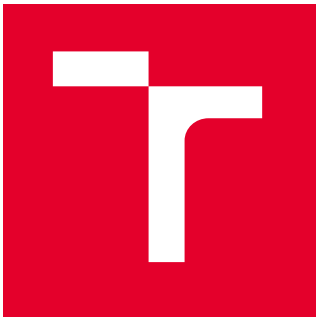


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NÁSTROJE PRO TECHNOLOGII SOUSTRUŽENÍ

TOOLS FOR TURNING TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Martin Bayer

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. Karel Osička, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2022

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	**Martin Bayer**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	**Ing. Karel Osička, Ph.D.**
Akademický rok:	2021/22

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

Nástroje pro technologii soustružení

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rešerše technologie soustružení se zaměřením na řezné nástroje a jejich materiály. Provedení komplexního rozboru problematiky z hlediska jednotlivých aplikací soustružení, dále přehled jednotlivých materiálů nástrojů z hlediska použití na skupiny materiálů dle obrobitelnosti.

Cíle bakalářské práce:

Základní rozbor technologie soustružení.
Detailní rozbor používaných nástrojů pro jednotlivé aplikace soustružení.
Přehled materiálů používaných pro soustružnické nástroje.
Předpokládaná vize soustružnických nástrojů pro Průmysl 4.0.

Seznam doporučené literatury:

Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ, s.r.o. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, 1997. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.

KOCMAN, K. a PROKOP, J. Technologie obrábění. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno. 2001. ISBN 80-214-1996-2.

FOREJT, M. a PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno. 2006. ISBN 80-214-2374-9.

HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. MM Publishing, Praha. 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.

HUMÁR, A. a PÍŠKA, M. Moderní řezné nástroje a nástrojové materiály. MM Průmyslové spektrum. Speciální vydání včetně CD. 110 s. Praha. 2004. ISSN 1212-2572.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na současné soustružnické nástroje. V první části práce je krátká historie, kde je shrnut vývoj technologie soustružení. V další části je základní rozbor technologie soustružení. Třetí část se zabývá používanými soustružnickými nástroji, které jsou rozdělené dle jednotlivých aplikací soustružení. Ve čtvrté části jsou rozděleny nástrojové materiály, které se používají pro výrobu soustružnických nástrojů. Poslední část se zabývá Průmyslem 4.0 a předpokládanou vizí soustružnických nástrojů.

Klíčová slova

soustružnický nástroj, soustružení, vyměnitelná břitová destička, nástrojové materiály, Průmysl 4.0

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on current turning tools. The first part of the work is a short history, which summarizes the development of turning technology. The next part is a basic analysis of turning technology. The third part deals with the used turning tools, which are divided according to individual turning applications. The fourth part divides the tool materials that are used for the production of turning tools. The last part deals with Industry 4.0 and the expected vision of turning tools.

Key words

turning tool, turning, replaceable cutting insert, tool materials, Industry 4.0

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BAYER, Martin. *Nástroje pro technologii soustružení* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-02-18]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139915. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Karel Osička.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Nástroje pro technologii soustružení vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

V Brně dne 20. května 2022

.....

Bayer Martin

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Karlovi Osičkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování bakalářské práce. Rád bych poděkoval také své rodině a přátelům, kteří mi byli podporou po celou dobu mého studia.

OBSAH

ÚVOD 9
1 HISTORIE SOUSTRUŽENÍ 10
2 ZÁKLADNÍ ROZBOR TECHNOLOGIE SOUSTRUŽENÍ 12
2.1 Obrobek 12
2.2 Nástroj 13
2.3 Průřez třísky 15
2.4 Kinematika soustružení 16
2.5 Řezné síly a řezný výkon 17
2.6 Jednotkový strojní čas 18
3 NÁSTROJE PRO SOUSTRUŽENÍ 20
3.1 Nástroje pro podélné soustružení 21
3.1.1 Nástroje pro vnější podélné soustružení 21
3.1.2 Nástroje pro vnitřní podélné soustružení 22
3.2 Nástroje pro čelní soustružení 22
3.3 Nástroje pro tvarové soustružení 23
3.3.1 Nástroje pro vnější tvarové soustružení 23
3.3.2 Nástroje pro vnitřní tvarové soustružení 24
3.4 Nástroje pro upichování 24
3.5 Nástroje pro zapichování 25
3.5.1 Nástroje pro vnější zapichování 25
3.5.2 Nástroje pro vnitřní zapichování 25
3.5.3 Nástroje pro čelní zapichování 25
3.6 Nástroje pro soustružení závitů 26
3.6.1 Nástroje pro soustružení vnějších závitů 27
3.6.2 Nástroje pro soustružení vnitřních závitů 27
4 NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY 28
4.1 Nástrojové oceli 29
4.1.1 Rychlořezné oceli 29
4.2 Slinuté karbidy 30
4.2.1 Povlakované slinuté karbidy 30
4.2.2 Nepovlakované slinuté karbidy 31
4.3 Cermety 31
4.4 Řezná keramika 32
4.5 Supertvrdé řezné materiály 32
4.5.1 Polykrystalický kubický nitrid bóru 33
4.5.2 Polykrystalický diamant 33
5 PRŮMYSL 4.0 34
5.1 Soustružnické nástroje pro Průmysl 4.0 34
5.1.1 Tvorba třísky 34
5.1.2 Předpokládaná vize soustružnických nástrojů pro Průmysl 4.0 36
ZÁVĚR 37
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 38
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 42

ÚVOD

Soustružení patří mezi hlavní metody technologie třískového obrábění. Tato práce nabízí přehled o technologii soustružení a soustružnických nástrojích, které jsou rozděleny dle jednotlivých aplikací soustružení. V další části jsou shrnuty nástrojové materiály, které jsou používané pro výrobu soustružnických nástrojů. V poslední části je vysvětleno, co je Průmysl 4.0 a jaký je základní předpoklad pro bezobslužné soustružení. V této části je dále popsána předpokládaná vize soustružnických nástrojů, které by v budoucnu mohly pomocí senzorů měřit řezné síly a v reálném čase sledovat stav břitu. Následně by tyto informace byly předány stroji. Stroj by na základě těchto informací v reálném čase upravoval parametry soustružení. Díky tomu by soustružení bylo efektivnější.

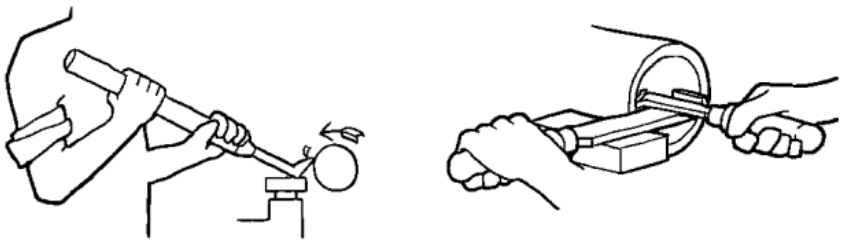
Při soustružení je hlavní řezný pohyb rotační a koná ho obrobek, vedlejší pohyb je přímočarý nebo obecný a koná ho nástroj. Stroj pro soustružení se nazývá soustruh a jako nástroj se používá jednobodový soustružnický nůž nebo soustružnický nůž s jednou aktivní řeznou plochou. Dříve byly rozšířené celistvé soustružnické nože vyrobené z rychlořezné oceli. Dnes dominují nástroje tvořené držákem z konstrukční oceli, ve kterém je upnutá vyměnitelná břitová destička.

Pomocí soustružnických nástrojů lze soustružit podélně, čelně i tvarově, upichovat, vytvářet zápichy a soustružit závity. Soustružením se vyrábí rotační součásti, jako je například hřídel, klika na dveře ve tvaru koule nebo šachová figurka.

1 HISTORIE SOUSTRUŽENÍ

Obrábění kovů vždy hrálo v historii podstatnou roli. Hlavním materiálem, který se obráběl bylo dřevo, a to až do 18. století. Kovoobrábění na strojích nebylo hodně rozšířené. Až do 19. století se kovoobrábění omezovalo na kovářské práce, dokud nebyly k dispozici mechanické pohony pro stroje, jejichž zdrojem byly nejprve parní stroje a později elektromotory. [1]

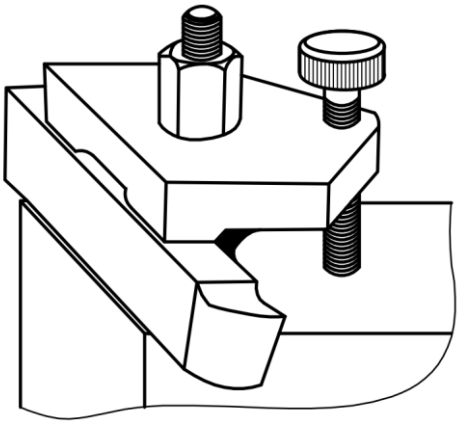
Obráběcí stroje se rychle vyvíjely. Zavedení křížového suportu na soustruhu je ukázkovým příkladem velkého kroku vpřed, protože nástroj již nebylo potřeba držet v ruce (obr. 1), ale byl upnutý pomocí držáku. V průběhu 19. století byl zaveden revolverový systém u soustruhů z důvodu rychlé výměny nástrojů. [1]



Obr. 1 Dříve používané ruční nástroje pro soustružení a vyvrtávání [1].

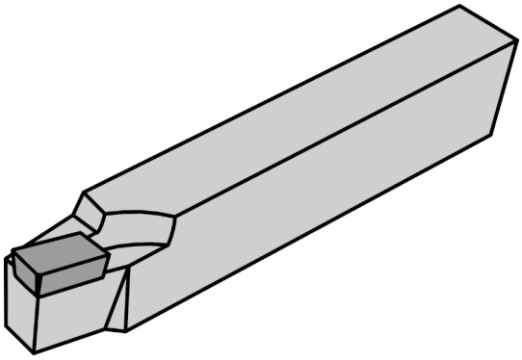
Během 19. století bylo vyvinuto několik procesů výroby oceli, které následně vyústily ke vzniku nástrojové oceli. V té době byly nejlepšími řeznými materiály legované a nelegované uhlíkové oceli. Trvanlivost břitu ale byla extrémně krátká a nespolehlivá, protože metalurgie a tepelné zpracování byly málo rozvinuté obory. Prvním skutečně vylepšeným řezným materiálem byla tak zvaná „Mushetova ocel“, která zdvojnásobila produkci při soustružení. Bylo dosahováno řezné rychlosti 10 m/min. [1]

Na začátku 20. století vznikla rychlořezná ocel, která měla výrazně vyšší pevnost za tepla (více než 600 °C) ve srovnání s uhlíkovou ocelí, kde byla pevnost za tepla 250 °C. Nástroje z rychlořezné oceli (obr. 2) se staly páteří soustružnického obrábění díky relativně jednoduchému ostření. V praxi to znamenalo, že soustružení nožem z uhlíkové oceli v 19. století trvalo 100 minut a při použití rychlořezné oceli operace trvala pouze 26 minut. [1]



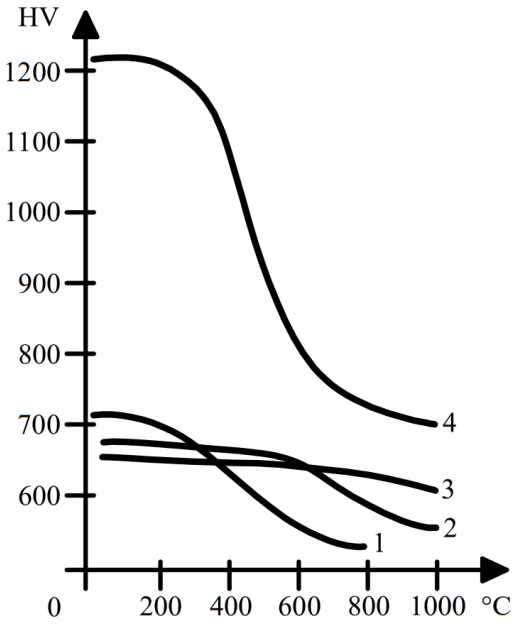
Obr. 2 Upnutý soustružnický nůž z rychlořezné oceli – podle [1].

Kolem roku 1915 nástup slévárenských slitin posunul vývoj řezných materiálů o krok dále. Tyto typy slitin obsahují cca 50 % tvrdých karbidů. Slévárenské slitiny jsou velmi tvrdé, s vysokou tvrdostí za tepla kolem 800 °C a velmi vysokou odolností proti opotřebení, ale jsou velmi křehké. Destičky z těchto slitin bylo možné pájet na držák z uhlíkové oceli viz obr. 3. Některé pracovní procesy, které dříve s nástroji z rychlořezné oceli trvaly 26 minut, s nástroji ze slévárenské slitiny zabraly pouze 15 minut. [1]



Obr. 3 Soustružnický nůž s připájenou břitovou destičkou – podle [1].

Ve 30. letech byl vyvinut slinutý karbid, který obsahoval až 90 % tvrdých karbidů. Obrábění nástroji ze slinutého karbidu umožňovalo výrazně zkrátit obráběcí časy. Obrábění nástroji z rychlořezné oceli trvalo 26 minut a při použití nástrojů ze slinutého karbidu trvá obrábění pouhých 6 minut. Na obr. 4 lze vidět, že slinutý karbid má mnohem lepší pevnost za tepla než u dříve dominujících nástrojových materiálů. [1]



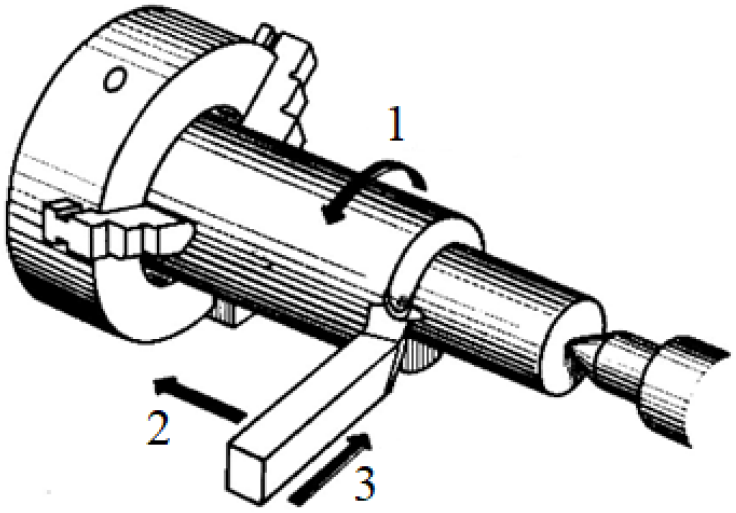
1 – uhlíková ocel, 2 – rychlořezná ocel, 3 – slévárenské slitiny,
4 – slinuté karbidy na bázi karbidu wolframu.
Obr. 4 Tvrdost za tepla – podle [1].

Zkoušení keramiky jako s řezným materiálem se začínalo ve 30. letech, ale do podoby vyměnitelných břitových destiček byly ve značném rozsahu dále vyvíjeny v průběhu 50. let. Kubický nitrid boru a polykrystalický diamant byly zavedeny po konci 70. let. [1]

2 ZÁKLADNÍ ROZBOR TECHNOLOGIE SOUSTRUŽENÍ

Soustružení je technologie třískového obrábění, kde hlavní řezný pohyb je rotační a koná ho obrobek, vedlejší pohyb je přímočarý nebo obecný a koná ho nástroj. Soustružení se používá pro výrobu součástí rotačních tvarů, při níž se většinou používají jednobřité nástroje různého provedení.

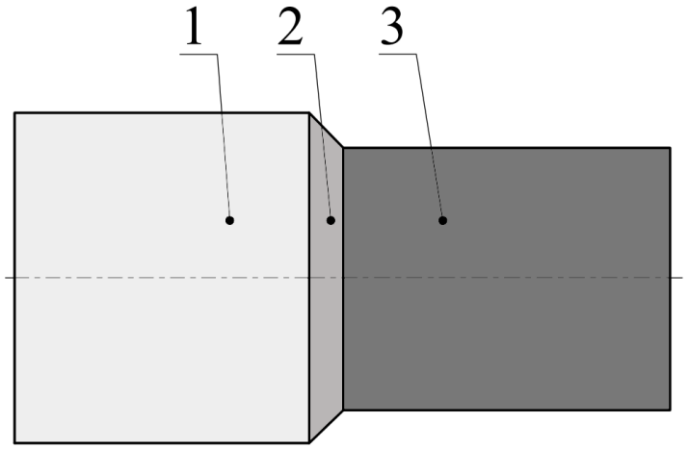
Nástroj, který při soustružení ubírá materiál, je soustružnický nůž. Pohyb nástroje ve směru rovnoběžně s osou obrobku se nazývá podélné soustružení (obr. 5). Při podélném soustružení je průměr zmenšován. Pokud se nástroj pohybuje ve směru kolmo k ose obrobku, tak se jedná o čelní soustružení, to znamená, že nástroj soustruží čelní plochu obrobku. Často se používá kombinace těchto pohybů a vzniká kombinovaný pohyb, který umožňuje zhotovovat zakřivené nebo kuželové plochy.



1 – hlavní pohyb, 2 – podélný posuv (přísuv), 3 – příčný posuv (přísuv).
Obr. 5 Pohyby při soustružení – podle [2].

2.1 Obrobek

Obrobek je z geometrického hlediska charakterizován obráběnou, obrobenou a přechodovou plochou (obr. 6). Obráběná plocha je plocha před procesem řezání. Obrobená plocha je výsledkem řezného procesu a přechodová plocha je část povrchu obrobku, která vzniká působením ostří nástroje během zdvihu nebo otáčky nástroje nebo obrobku. [3]



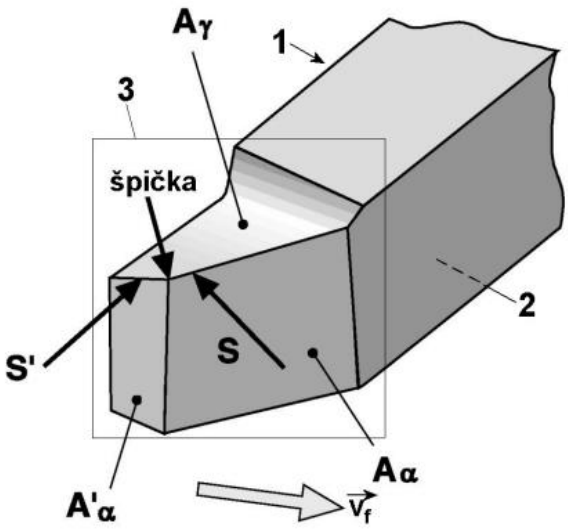
1 – obráběná plocha, 2 – přechodová plocha, 3 – obrobená plocha.
Obr. 6 Plochy obrobku.

2.2 Nástroj

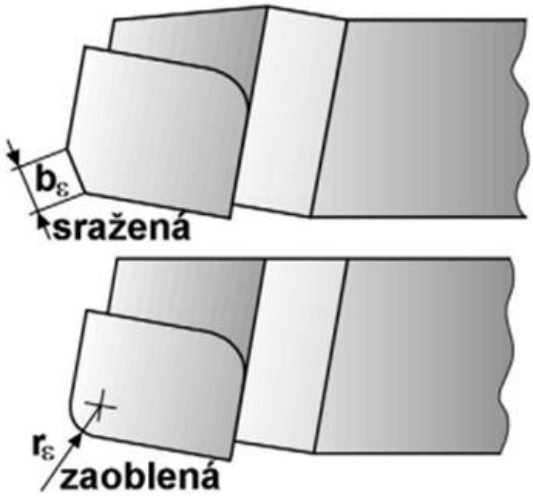
Nástroj společně s obrobkem umožnuje řezný proces. Nástroj se skládá z upínací části, základny a řezné části.

Základní popis nástroje [3]:

- **Upínací část** – je část nástroje, za kterou se upíná nástroj (obr. 7, označeno 1).
- **Řezná část** – je funkční část nástroje a obsahuje prvky tvořící třísku (obr. 7, označeno 3). Hlavní části jsou ostří, čelo a hřbet.
- **Základna** – je plochý prvek stopky nástroje, který se využívá pro umístění a orientaci nástroje při jeho výrobě, ostření a kontrole (obr. 7, označeno 2). Základnu nemají všechny nástroje jasně určenou.
- **Břit** – je řezná část nástroje tvořená čelem a hřbetem nástroje.
- **Čelo A_γ** – je plocha nebo souhrn ploch, po kterých odchází tříska (obr. 7).
- **Hlavní hřbet A_α** – je plocha nebo souhrn ploch, která je přikloněna k přechodové ploše nebo k obrobené ploše (obr. 7).
- **Vedlejší hřbet A'_α** – je plocha nebo souhrn ploch, která je přikloněna k obrobené ploše (obr. 7).
- **Utvařeč třísky** – je část čelní plochy určená k lámání nebo svinování třísky.
- **Ostří** – je prvek řezné části nástroje, kterým se realizuje vlastní proces řezání.
- **Hlavní ostří S** – je část ostří, která má sloužit k vytvoření přechodové plochy na obrobku (obr. 7).
- **Vedlejší ostří S´** – je část ostří, která provádí dokončovací práci na obrobené ploše (obr. 7).
- **Špička** – část ostří na přechodu hlavního a vedlejšího ostří (obr. 7). Špička může být přímá (sražená) nebo zaoblená (obr. 8).



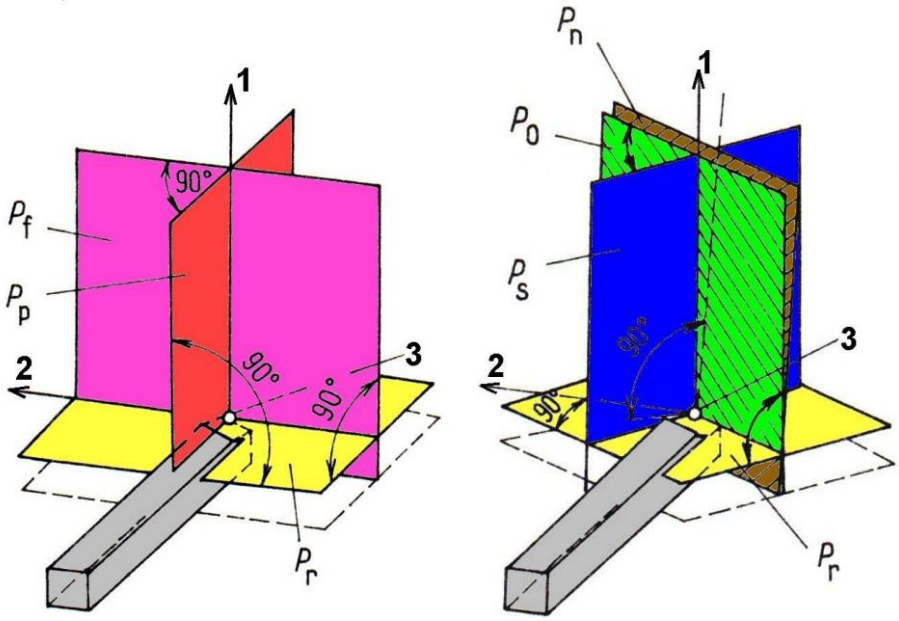
Obr. 7 Prvky a plochy nástroje [3].



Obr. 8 Sražená a zaoblená špička nástroje [3].

Rozdělení nástrojových rovin [3]:

- **Nástrojová základní rovina P_r** – rovina, která prochází uvažovaným bodem ostří a je kolmá na předpokládaný směr hlavního pohybu.
- **Nástrojová boční rovina P_f** – rovina, která prochází uvažovaným bodem ostří a je kolmá na nástrojovou základní rovinu P_r.
- **Nástrojová zadní rovina P_p** – rovina, která prochází uvažovaným bodem ostří a je kolmá na nástrojovou základní rovinu P_r a nástrojovou boční rovinu P_f.
- **Nástrojová rovina ostří P_s** – rovina, která je tečná k ostří v uvažovaném bodě a je kolmá na nástrojovou základní rovinu P_r.
- **Nástrojová ortogonální rovina P_o** – rovina, která prochází uvažovaným bodem ostří a je kolmá na nástrojovou základní rovinu P_r a nástrojovou rovinu ostří P_s.
- **Nástrojová normálová rovina P_n** – rovina, která je kolmá k ostří v uvažovaném bodě.
- **Nástrojová rovina největšího spádu čela P_g** – rovina, která prochází uvažovaným bodem ostří a je kolmá na čelo nástroje A_γ a nástrojovou základní rovinu P_r.
- **Nástrojová rovina největšího spádu hřbetu P_b** – rovina, která prochází uvažovaným bodem ostří a je kolmá na hřbet nástroje A_α a nástrojovou základní rovinu P_r.

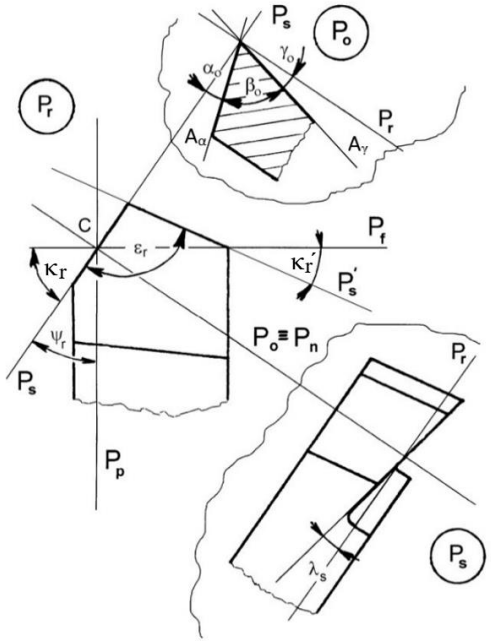


1 – předpokládaný směr hlavního pohybu,
2 – směr posuvového pohybu, 3 – uvažovaný bod ostří.
Obr. 9 Roviny nástrojové souřadnicové soustavy [3].

Základní nástrojové úhly [3; 4]:

- **Nástrojový úhel nastavení κ_r** – úhel, který svírá nástrojová rovina ostří P_s s nástrojovou boční rovinu P_f.
- **Nástrojový vedlejší úhel nastavení κ_r'** – úhel, který svírá nástrojová rovina vedlejšího ostří P_s' s nástrojovou boční rovinou P_f.
- **Nástrojový úhel špičky ε_r** – úhel, který svírá nástrojová rovina ostří P_s s nástrojovou rovinou vedlejšího ostří P_s'.

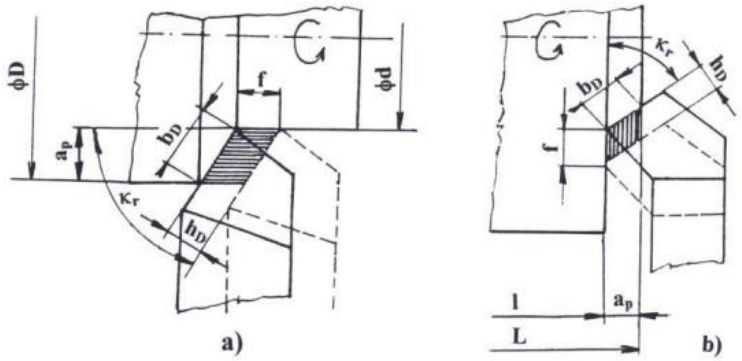
- **Nástrojový úhel nastavení doplňkový ψ_r** – úhel, který svírá nástrojová rovina ostří P_s s nástrojovou zadní rovinou P_p.
- **Nástrojový úhel sklonu ostří λ_s** – úhel mezi hlavním ostřím a nástrojovou základní rovinou P_r.
- **Nástrojový úhel čela ortogonální γ_o** – úhel, který svírá čelo nástroje A_γ s nástrojovou základní rovinou P_r.
- **Nástrojový úhel břitu ortogonální β_o** – úhel mezi čelem nástroje A_γ a hřbetem nástroje A_α.
- **Nástrojový úhel hřbetu ortogonální α_o** – úhel, který svírá hřbet nástroje A_α s nástrojovou rovinou vedlejšího ostří P_s.



Obr. 10 Základní nástrojové úhly na příkladu nože – podle [4].

2.3 Průřez třísky

Tříska je vedlejším produktem procesu řezání a má mít specifické vlastnosti z hlediska tvarů a rozměrů z důvodu lepší manipulace při odvodu ze stroje. Podle obr. 9 se stanoví vztahy pro výpočet. [5]



a) válcová plocha, b) čelní plocha, $\mathbf{a_p}$ – šířka záběru ostří, **f** – posuv na otáčku obrobku, $\mathbf{b_D}$ – jmenovitá šířka třísky, $\mathbf{h_D}$ – jmenovitá tloušťka třísky, $\boldsymbol{\kappa_r}$ – nástrojový úhel nastavení hlavního ostří, **D** – průměr obráběné plochy, **d** – průměr obrobené plochy, **L** – délka obráběné plochy, **l** – délka obrobené plochy.
Obr. 9 Identifikace průřezu třísky při soustružení [3].

Výpočet šířky záběru ostří pro podélné soustružení [3]:

$$a_p = 0{,}5 \cdot (D - d)[mm]. \tag{1.1}$$

Výpočet šířky záběru ostří pro čelní soustružení [3]:

$$a_p = L - l\ [mm], \tag{1.2}$$

kde: a_p - šířka záběru ostří [mm],
D - průměr obrobku [mm],
d - průměr obrobené plochy [mm],
L - délka obráběné plochy [mm],
l - délka obrobené plochy [mm].

Výpočet jmenovité šířky třísky a jmenovité tloušťky třísky [3]:

$$b_D = \frac{a_p}{\sin \kappa_r}\ [mm], \tag{1.3}$$

$$h_D = f \cdot \sin \kappa_r\ [mm], \tag{1.4}$$

kde: b_D - jmenovitá šířka třísky [mm],
h_D - jmenovitá tloušťka třísky [mm],
a_p - šířka záběru ostří [mm],
f - posuv na otáčku obrobku [mm],
κ_r - nástrojový úhel nastavení hlavního ostří [°].

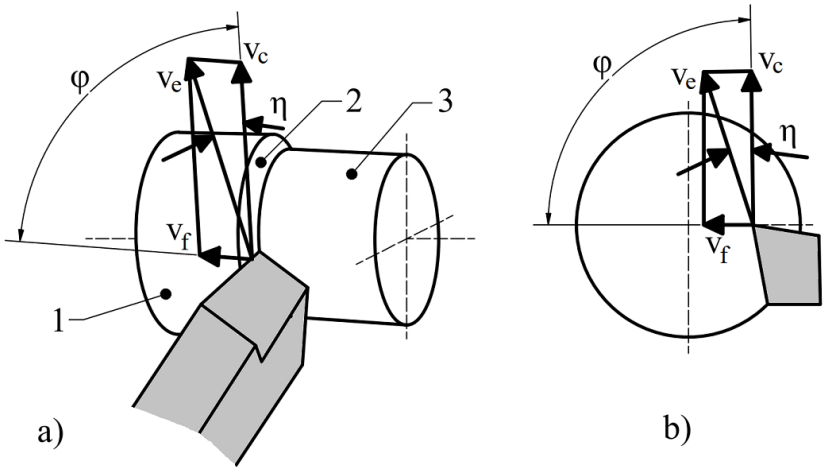
Jmenovitý průřez třísky [3]:

$$A_D = b_D \cdot h_D = a_p \cdot f\ [mm^2], \tag{1.5}$$

kde: A_D - plocha jmenovitého průřezu třísky [mm^2],
b_D - jmenovitá šířka třísky [mm],
h_D - jmenovitá tloušťka třísky [mm],
a_p - šířka záběru ostří [mm],
f - posuv na otáčku obrobku [mm].

2.4 Kinematika soustružení

Hlavní pohyb je rotační a koná ho obrobek. Vedlejší pohyb je přímočarý nebo obecný a koná ho nástroj. Vektory pohybů při soustružení jsou na obr. 10.



1 – obráběná plocha, 2 – přechodová plocha, 3 – obrobená plocha, a) podélné soustružení, b) čelní soustružení, **v**$_c$ – řezná rychlost, **v**$_f$ – posuvová rychlost, **v**$_e$ – rychlost řezného pohybu, **φ** – úhel posuvového pohybu, **η** – úhel řezného pohybu.
Obr. 10 Vektory pohybů při soustružení – podle [6].

Výpočet základních veličin:

Výpočet řezné rychlosti [6]:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}\ [m \cdot min^{-1}], \tag{1.6}$$

kde: v_c - řezná rychlost [m·min^{-1}],
D - průměr obrobku [mm],
n - otáčky obrobku [min^{-1}].

Výpočet posuvové rychlosti [6]:

$$v_f = \frac{f \cdot n}{1000}\ [m \cdot min^{-1}], \tag{1.7}$$

kde: v_f - posuvová rychlost [m·min^{-1}],
f - posuv na otáčku obrobku [mm],
n - otáčky obrobku [min^{-1}].

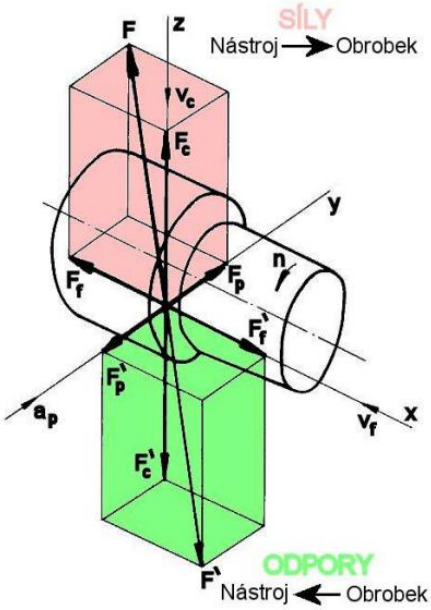
Výpočet rychlosti řezného pohybu [6]:

$$v_e = \sqrt{{v_c}^2 + {v_f}^2}\ [m \cdot min^{-1}], \tag{1.8}$$

kde: v_e - rychlost řezného pohybu [m·min^{-1}],
v_c - řezná rychlost [m·min^{-1}],
v_f - posuvová rychlost [m·min^{-1}].

2.5 Řezné síly a řezný výkon

Řezné síly jsou limitujícím prvkem obrobitelnosti a ovlivňují spotřebu energie během procesu (obr. 11). Vysoké řezné síly způsobí větší deformace řezných nástrojů a obrobků, což může mít za následek vibrace a deformace obrobku. Pokud jsou řezné síly příliš vysoké, může dojít ke snížení životnosti nástroje. Řezné síly hlavně ovlivňuje obráběný materiál, geometrie nástroje a řezné podmínky. [7]



F – celková řezná síla, $\mathbf{F_c}$ – řezná síla, $\mathbf{F_f}$ – posuvová síla, $\mathbf{F_p}$ – pasivní síla, $\mathbf{a_p}$ – šířka záběru ostří, **n** – otáčky obrobku, $\mathbf{v_c}$ – řezná rychlost, $\mathbf{v_f}$ – posuvová rychlost.
Obr. 11 Řezné síly při soustružení [3].

Základní výpočty:

Výpočet jednotlivých složek celkové řezné síly a celkové řezné síly [3]:

$$F_c = C_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} \; [N], \tag{1.9}$$

$$F_f = C_{F_f} \cdot a_p^{x_{F_f}} \cdot f^{y_{F_f}} \; [N], \tag{1.10}$$

$$F_p = C_{F_p} \cdot a_p^{x_{F_p}} \cdot f^{y_{F_p}} \; [N], \tag{1.11}$$

$$F = \sqrt{F_c^{\,2} + F_p^{\,2} + F_f^{\,2}} \; [N], \tag{1.12}$$

kde:
- F_c - řezná síla [N],
- F_f - posuvová síla [N],
- F_p - pasivní síla [N],
- F - celková řezná síla [N],
- a_p - šířka záběru ostří [mm],
- f - posuv na otáčku obrobku [mm],
- $C_{F_c}, C_{F_f}, C_{F_p}$ - materiálové konstanty [-],
- $x_{F_c}, x_{F_f}, x_{F_p}$ - exponenty vlivu šířky záběru [-],
- $y_{F_c}, y_{F_f}, y_{F_p}$ - exponenty vlivu posuvu [-].

Výpočet měrné řezné síly [3]:

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} \; [MPa], \tag{1.13}$$

kde:
- k_c - měrná řezná síla [MPa],
- F_c - řezná síla [N],
- A_D - plocha jmenovitého průřezu třísky [mm^2].

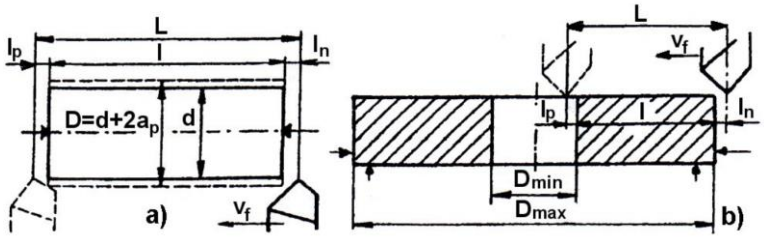
Výpočet řezného výkonu [3]:

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{6 \cdot 10^4} \; [kW], \tag{1.14}$$

kde:
- P_c - řezný výkon [kW],
- F_c - řezná síla [N],
- v_c - řezná rychlost [m·min^{-1}].

2.6 Jednotkový strojní čas

Podle obr. 12 se stanoví vzorce pro výpočet jednotkového strojního času pro podélné a čelní soustružení.



a) podélné soustružení b) čelní soustružení
Obr. 12 Stanovení jednotkového strojního času [6].

Výpočet jednotkového strojního času pro podélné soustružení [3]:

$$t_{AS} = \frac{L}{n \cdot f} = \frac{l + l_n + l_p}{n \cdot f}\ [min], \tag{1.15}$$

kde: t_{AS} - jednotkový strojní čas pro podélné soustružení [min],
L - dráha nástroje [mm],
n - řezná rychlost [m·min^{-1}],
f - posuv na otáčku obrobku [mm],
l - délka soustružené plochy [mm],
l_n - délka náběhu [mm],
l_p - délka přeběhu [mm].

Výpočet jednotkového strojního času pro čelní soustružení při konstantních otáčkách [3]:

$$t_{ASn} = \frac{L}{n \cdot f} = \frac{[(D_{max} + 2 \cdot l_n) - (D_{min} - 2 \cdot l_p)]}{2} \Big/ (n \cdot f)\ [min], \tag{1.16}$$

kde: t_{ASn} - jednotkový strojní čas pro čelní soustružení při konstantních otáčkách [min],
L - dráha nástroje [mm],
n - řezná rychlost [m·min^{-1}],
f - posuv na otáčku obrobku [mm],
D_{max} - vnější průměr obrobku [mm],
D_{min} - vnitřní průměr obrobku [mm],
l_n - délka náběhu [mm],
l_p - délka přeběhu [mm].

Výpočet jednotkového strojního času pro čelní soustružení při konstantní řezné rychlosti [3]:

$$t_{ASv} = \frac{\pi \cdot [(D_{max} + 2 \cdot l_n)^2 - (D_{min} - 2 \cdot l_p)^2]}{4 \cdot 10^3 \cdot v_c \cdot f}\ [min], \tag{1.17}$$

kde: t_{ASv} - jednotkový strojní čas pro čelní soustružení při konstantní řezné rychlosti [min],
f - posuv na otáčku obrobku [mm],
D_{max} - vnější průměr obrobku [mm],
D_{min} - vnitřní průměr obrobku [mm],
l_n - délka náběhu [mm],
l_p - délka přeběhu [mm],
v_c - řezná rychlost [m·min^{-1}].

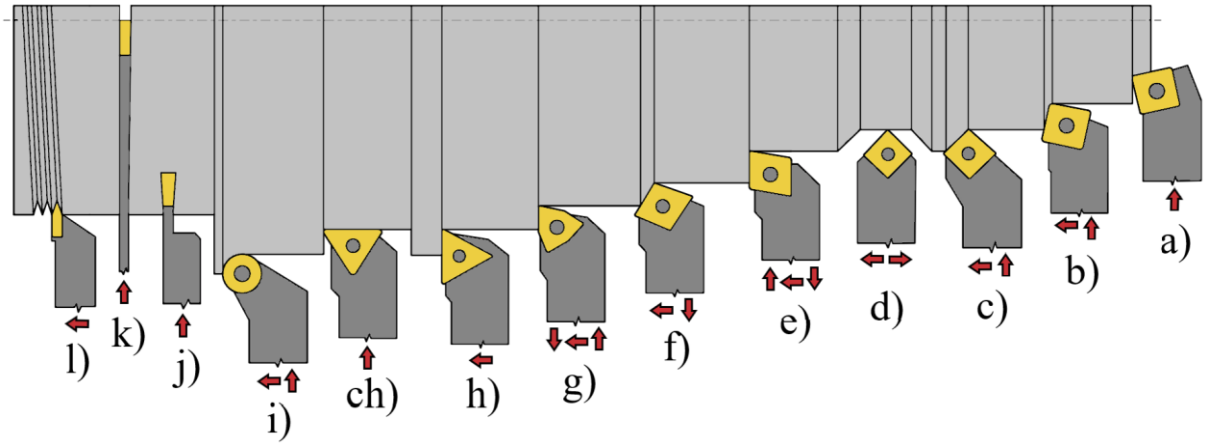
3 NÁSTROJE PRO SOUSTRUŽENÍ

Soustružení se provádí především pomocí jednobodových řezných nástrojů, případně nástrojů s jednou aktivní řeznou plochou. V minulosti se k soustružení nejčastěji používaly masivní jednobodové nože broušené z polotovaru HSS nebo nože s pájenými břitovými destičkami. V současnosti se však soustružení nejčastěji provádí pomocí vyměnitelných břitových destiček upnutých v držáku. Nejrozšířenější nože jsou radiální (obr. 13 a obr. 14). [8]

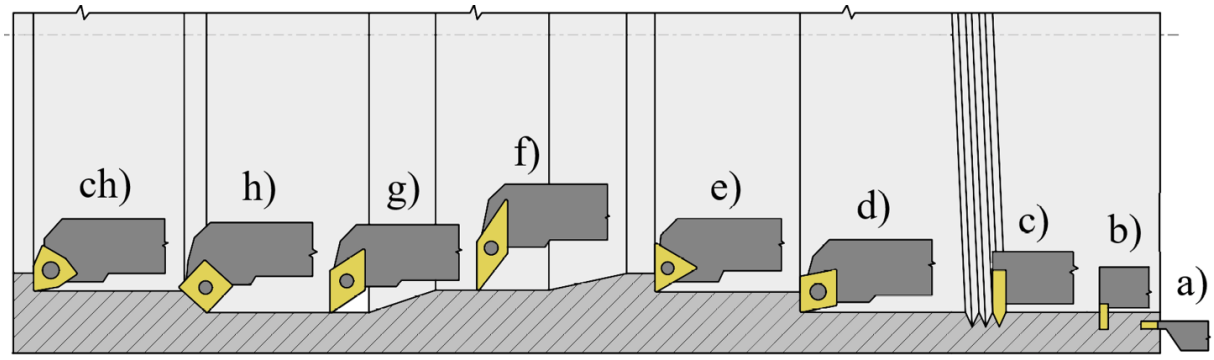
Soustružnické nože se dělí z technologického hlediska na [2]:

- radiální,
- prizmatické,
- kotoučové,
- tangenciální.

Prizmatické, kotoučové a tangenciální nože se používají výhradně pro tvarové soustružení. [9]

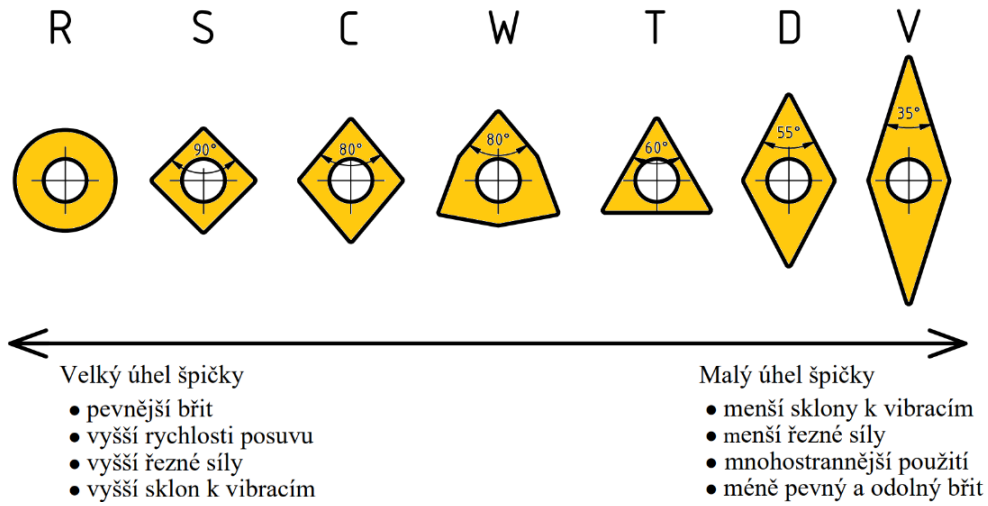


a) uběrací nůž čelní, b) uběrací nůž přímý, c) uběrací nůž přímý, d) uběrací nůž ohnutý, e) uběrací nůž oboustranný, f) rohový nůž, g) rohový nůž, h) uběrací nůž stanový, ch) hladící nůž, i) rádiusový nůž, j) zapichovací nůž, k) upichovací nůž, l) závitový nůž.
Obr. 13 Rozdělení vnějších radiálních nožů – podle [10].



a) čelní zapichovací nůž, b) vnitřní zapichovací nůž, c) vnitřní závitový nůž, d) vnitřní uběrací nůž, e) vnitřní rohový nůž, f) vnitřní kopírovací nůž, g) vnitřní uběrací nůž, h) vnitřní uběrací nůž, ch) vnitřní rohový nůž.
Obr. 14 Rozdělení vnitřních radiálních nožů – podle [10].

Dnes se většinou používají nástroje víceúčelové, to znamená, že jedním nástrojem jsme schopni soustružit podélně, čelně i tvarově. Základ je ve správné volbě vyměnitelné břitové destičky a držáku. Destičky s menším úhlem špičky se spíše používají na dokončování a břitové destičky s velkým úhlem špičky se používají na hrubování viz obr. 15.



Obr. 15 Nejpoužívanější typy břitových destiček pro soustružení – podle [1; 11].

Dále se mohou soustružnické nože dělit dle aplikace soustružení:

- pro podélné soustružení,
- pro čelní soustružení,
- pro tvarové soustružení,
- pro upichování,
- pro zapichování,
- pro soustružení závitů.

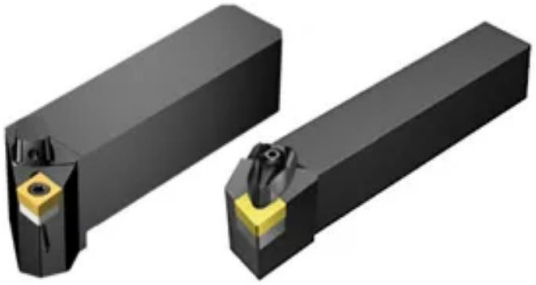
3.1 Nástroje pro podélné soustružení

Nástroj při podélném soustružení koná posuv a pohybuje se rovnoběžně s osou obrobku. To znamená, že při vnějším podélném soustružení je vnější průměr obrobku zmenšován a při vnitřním podélném soustružení je vnitřní průměr obrobku zvětšován. [1]

3.1.1 Nástroje pro vnější podélné soustružení

Nejčastěji se jako nástroj používá držák s úhlem nastavení 91–95°, který umožnuje obrábět i osazené plochy. Pokud na obrobku nejsou osazené plochy, je vhodné použít držák s úhlem nastavení 75°, který umožní zvýšení posuvu, protože dojde ke snížení tloušťky třísky. Držák může být osazen VBD typu C, D, V, W a také lze použít typ T. Při hrubování se používá typ C, pro lehké hrubování lze použít typy C, W, T, D a při obrábění načisto se používají typy W, T, D a V. Nástroje pro vnější podélné soustružení viz obr. 16 a 17. [8; 12]

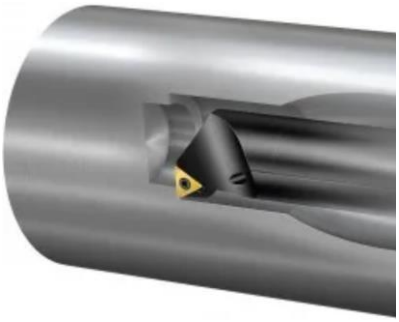
Obr. 16 Soustružnický nůž pro vnější podélné soustružení v záběru [13].



Obr. 17 Typické nástroje pro vnější podélné soustružení – podle [14].

3.1.2 Nástroje pro vnitřní podélné soustružení

Nástroj pro vnitřní soustružení musí být přizpůsoben délce a průměru díry v obrobku. Průřez nástroje je menší při porovnání s ostatními nástroji. Vyložení nástroje je závislé na délce soustružené díry. Pro díry, které mají velkou délku, je nástroj upnut do vyvrtávací tyče. Vyvrtávací tyče musí být dostatečně pevné a tuhé z důvodu namáhání a stability. Jako nástroj se nejčastěji používá držák s VBD (obr. 18 a 19). Pro soustružení díry s malým průměrem se používá monolitní karbidový nástroj (obr. 19 vpravo). Pokud je na obrobku osazení, je doporučeno použít držák s úhlem nastavení 91–95° a VBD tvaru T, D, případně při vyšší požadované pevnosti břitu tvar C. Pokud na obrobku není osazení, je výhodnější použít VBD tvaru S v kombinaci s držákem o úhlu nastavení 75°. Vyměnitelné břitové destičky mají převážně pozitivní tvar, protože při použití negativních VBD vznikají vyšší řezné síly. [15; 16]

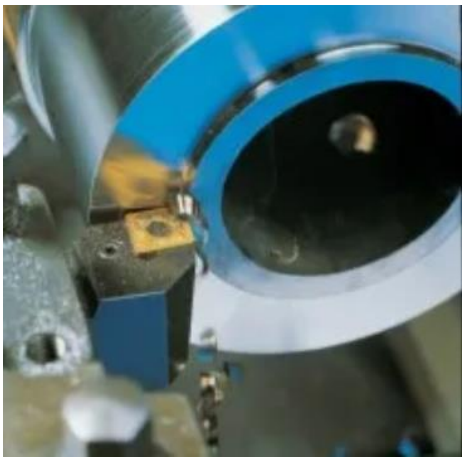


Obr. 18 Ukázka soustružnického nože pro vnitřní podélné soustružení v záběru [15].

Obr. 19 Příklad soustružnických nástrojů pro vnitřní podélné soustružení – podle [17].

3.2 Nástroje pro čelní soustružení

Při čelním soustružení se nástroj pohybuje kolmo k ose obrobku. To znamená, že nástroj soustruží čelní plochu obrobku (obr. 20). Radiální řezné síly jsou vysoké a mohou být příčinou vzniku vibrací nebo průhybu obrobku. Nástroj může být celistvý z rychlořezné oceli, ale dnes se převážně používá držák s VBD (obr. 21). Tvar vyměnitelné břitové destičky se odvíjí od požadovaného úhlu nastavení. Čím menší je úhel nastavení, tím menší jsou radiální řezné síly, což znamená, že je menší sklon k vibracím a větší stabilita. Jako nástroj se většinou používá držák s úhlem nastavení 75° a VBD tvaru S. Pokud je vyžadována univerzálnost, je doporučeno volit držák s úhlem nastavení 95° a VBD tvaru C nebo T. [1; 12]

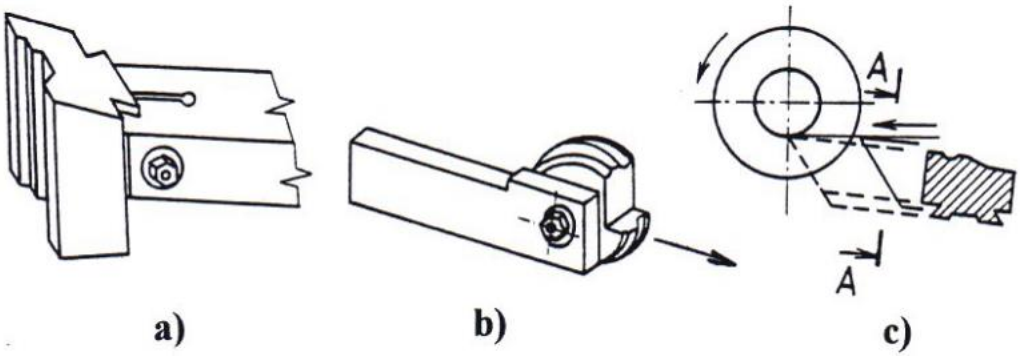


Obr. 20 Čelní soustružnický nůž v záběru [12].

Obr. 21 Soustružnický nůž pro čelní soustružení [18].

3.3 Nástroje pro tvarové soustružení

Pro tvarové soustružení se používají nože radiální, prizmatické, kotoučové a tangenciální. Tyto nože mají řeznou část z rychlořezné oceli nebo slinutých karbidů. Prizmatické, kotoučové a tangenciální nože (obr. 22) jsou drahé a používají se u sériové výroby z důvodu úspory strojního času ve srovnání s radiálními noži, protože oproti radiálním nožům jsou schopny vyrobit požadovaný tvar obrobku na jeden záběr. [19]

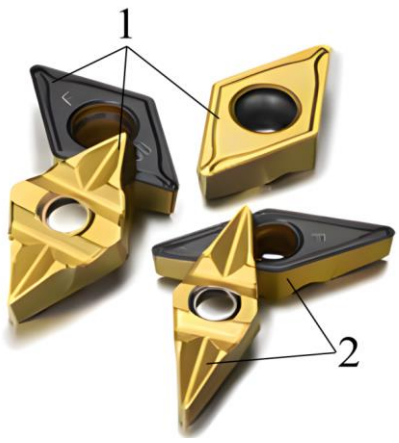


a) prizmatický, b) kotoučový, c) tangenciální.
Obr. 22 Tvarové soustružnické nože [3].

Tvarové soustružení radiálními noži lze definovat jako obrábění, při kterém nástroj neustále mění směr posuvu. Nástroj se pohybuje ve směru dvou os, a tím získá obrobek požadovaný tvar. Z tohoto důvodu je nástroj vystaven velkým změnám hloubky řezu a namáhání. Nejdůležitější vlastností tvarového nástroje je přístupnost břitu do místa řezu. Tvarovým soustružením lze obrábět i tvarově složité součásti. Radiální nože pro tvarové soustružení se mohou nazývat také kopírovací nože. [1; 12]

3.3.1 Nástroje pro vnější tvarové soustružení

Jako nástroj pro vnější tvarové soustružení lze použít prizmatický, kotoučový a tangenciální nůž. Nejpoužívanější je však radiální nůž (obr. 24). Výsledný požadovaný tvar obrobku je důležitý při výběru nástroje, protože z důvodu pevnosti a nákladů je vhodné u VBD použít co největší úhel špičky. Typickým nástrojem pro vnější tvarové soustružení je radiální nůž s úhlem nastavení 93° s VBD tvaru D (obr. 23 označeno 1). V případě požadovaného většího úhlu sestupu je vhodné zvolit tvar destičky V (obr. 23 označeno 2). Pro vytvoření rohových zápichů se používá radiální nůž s úhlem nastavení 107–117°. [12]



1 – tvar D, 2 – tvar V.
Obr. 23 Břitové destičky typu D a V – podle [20].

Obr. 24 Nůž pro vnější tvarové soustružení [21].

3.3.2 Nástroje pro vnitřní tvarové soustružení

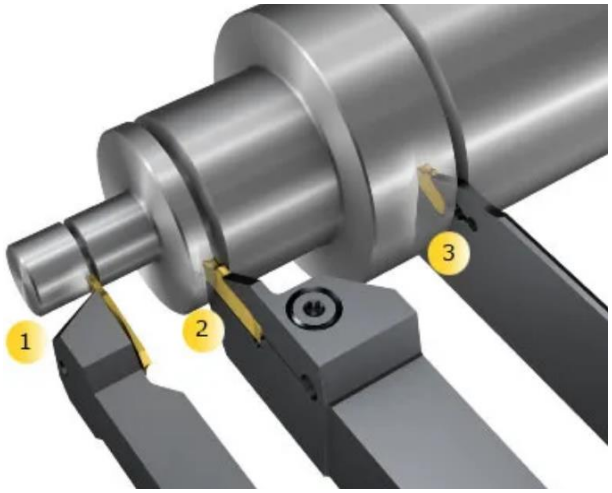
Na nástroj pro vnitřní tvarové soustružení působí radiální a tangenciální řezné síly. Jako nástroj se používá radiální nůž s úhlem nastavení 93° s VBD tvaru D nebo V. Pokud je požadavek, aby nástroj obráběl i čelní tvarové plochy nebo rohové zápichy, je doporučeno zvolit radiální nůž s úhlem nastavení 107–117° (obr. 25). Při velké hloubce díry je nástroj upnut na vyvrtávací tyč (obr. 26). [15]

Obr. 25 Ukázka tvarového soustružnického nože při soustružení rohového zápichu [15].

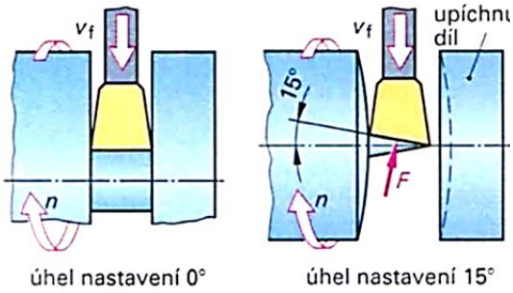
Obr. 26 Nůž pro vnitřní tvarové soustružení upnutý ve vyvrtávací tyči [22].

3.4 Nástroje pro upichování

Při upichování nástroj koná přímočarý posuvný pohyb a obrobek koná rotační pohyb. Držáky a vyměnitelné břitové destičky musí mít takový tvar, aby zajistily optimální přístupnost břitu do obrobku (obr. 27). Utvařeč třísky musí vytvářet třísky menší, než je upichovaná drážka, aby byla dobrá kvalita obrobené plochy. Upichovací nože jsou podobné jako zapichovací nože, ale řezná část je delší. Délka řezné části je určena průměrem obrobku. Břitová destička by měla být co nejmenší šířky z důvodu úspory materiálu. Vyměnitelné břitové destičky se většinou používají s úhlem nastavení do 25° (obr. 28). Pro mělké upichování se používá většinou trojbřitá břitová destička, pro upichování se střední hloubkou řezu je vhodné použít dvoubřité břitové destičky a pro upichování s velkou hloubkou řezu se používá jednobřitá břitová destička v kombinaci s nožovou planžetou. Upichovat lze tyče i trubky. [1; 9; 23; 24]



1 – Držák s VBD pro mělké upichování, 2 – Držák s VBD pro upichování se střední hloubkou řezu, 3 – Držák s VBD pro upichování s velkou hloubkou řezu.
Obr. 27 Nástroje pro upichování [24].



Obr. 28 Úhel nastavení upichovací destičky [9].

3.5 Nástroje pro zapichování

Zapichovacími nástroji můžeme zhotovovat zápichy na vnější straně obrobku, na vnitřní straně obrobku a na čelní ploše obrobku. Nejčastěji se dělají zápichy kolmé a zaoblené, a mohou být i složitě profilované. Při zapichování je třeba věnovat velkou pozornost tolerancím hloubkového rozměru, šířky zápichu a jakosti obrobeného povrchu. Stejně jako u nástrojů pro upichování je důležité, aby nástroj utvářel třísky menší, než je šířka zapichované drážky. [1; 25]

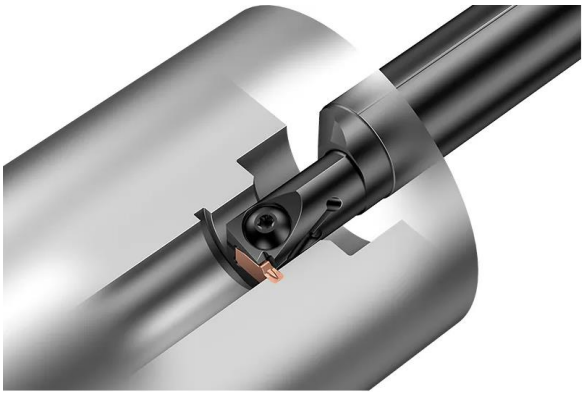
3.5.1 Nástroje pro vnější zapichování

Nástroje pro vnější zapichování jsou velice podobné nástrojům pro upichování a většina nástrojů se dá použít pro zapichování i upichování. Nástroji lze zhotovovat na obrobku zápichy různého tvaru a rozměru. Dnes se jako nástroj pro vnější zapichování převážně používá držák, ve kterém je upnutá VBD (obr. 29). [1]

Obr. 29 Nástroje pro vnější zapichování firmy Sandvik Coromant – podle [26].

3.5.2 Nástroje pro vnitřní zapichování

Nástroj pro vnitřní zapichování může být celistvý z rychlořezné oceli, ale většinou se používá držák s VBD (obr. 27 a 28), který je při velkých hloubkách díry upnut na vyvrtávací tyč. Délka a materiál vyvrtávací tyče se určuje podle potřebného průměru vyvrtávací tyče. Při soustružení vnitřních drážek je nutné volit co největší držák nástroje z důvodu vibrací. Největším rozdílem oproti soustružení vnější drážky je odchod třísky, která se musí při odchodu z drážky otočit o 90° a projít ven z obrobku kolem držáku. [1; 27]

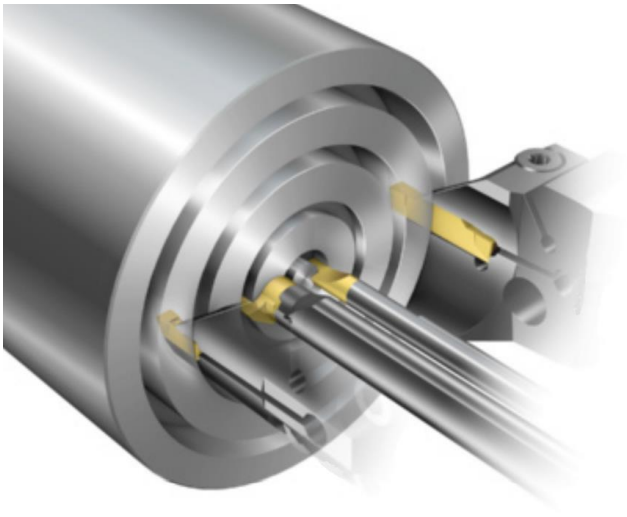


Obr. 30 Držák s VBD upnutý ve vyvrtávací tyči pro vnitřní zapichování [27].

Obr. 31 Vnitřní zapichovací nůž [28].

3.5.3 Nástroje pro čelní zapichování

Nástroj pro čelní zapichování musí být přizpůsoben poloměru zakřivení zápichu viz obr. 33 (čím menší je průměr, tím je poloměr zakřivení menší), protože nástroj do materiálu zabírá axiálně do čelní plochy obrobku (obr. 32). Je doporučeno volit co nejširší držák a břitovou destičku z důvodu vyšší stability nástroje. [1; 23; 29]



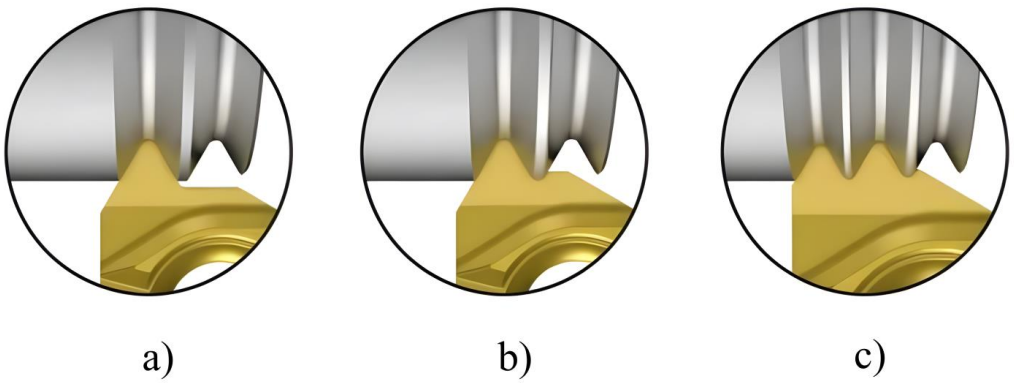
Obr. 32 Čelní zapichování nástroji různého typu [30].

Obr. 33 Držák s VBD pro čelní zapichování [23].

3.6 Nástroje pro soustružení závitů

Soustružit závity lze radiálním, tangenciálním a kotoučovým nožem. Tangenciálním a kotoučovým nožem jsme schopni vysoustružit závit na jeden záběr. Při použití radiálních nožů se závity soustruží na více průchodů a posuv je závislý na stoupání závitu. Špička nástroje musí být kolmo směrem k ose obrobku. Radiální nože lze osadit třemi základními druhy vyměnitelných břitových destiček viz obr. 34 [1; 31; 32; 33]:

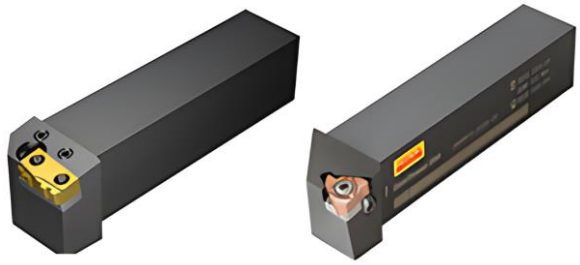
- **VBD s částečným profilem (V-profilem)** – Největší výhodou je, že tento typ VBD lze použít pro více stoupání, a tím lze snížit skladové zásoby. Nevýhodou je kratší trvanlivost VBD z důvodu menšího poloměru špičky a požadavek na přesně obrobený průměr, protože VBD s částečným profilem neseřezávají vrchol závitů.
- **VBD s plným profilem** – Nejpoužívanější typ VBD, protože obrábějí i vrchol závitu. Hlavní nevýhodou je, že pro každé stoupání je potřeba použít jiný rozměr VBD.
- **VBD vícebřité (hřebenové)** – Jsou podobné destičkám s plným profilem, ale mají více břitů. Tento typ VBD má větší produktivitu, protože je potřeba menší počet záběrů, a tím je větší i trvanlivost destičky. Z důvodu většího ostří na destičku působí vyšší řezné síly, což vyžaduje stabilní podmínky obrábění. Při použití toho typu je za posledním závitem požadován dostatečně velký prostor, aby průchod přes konec závitu mohly dokončit všechny břity nástroje.



a) VBD s částečným profilem, b) VBD s plným profilem, c) VBD vícebřité.
Obr. 34 Typy břitových destiček pro soustružení závitu [32].

3.6.1 Nástroje pro soustružení vnějších závitů

Soustružení vnějších závitů je obecně jednodušší než soustružení vnitřních závitů, protože jsou požadovány menší nároky na nástroj. Výrobci nástrojů nabízí různé provedení nástrojů. Například firma Iscar nabízí nástroj s desetibřitými destičkami (obr. 36 vlevo) a pětibřitými destičkami (obr. 36 vpravo). Firma Sandvik Coromant nabízí také různé provedení nástrojů, jako je například hřebenová VBD (obr. 35 vlevo) a trojbřitá destička (obr 35. vpravo). [34; 35; 36]



Obr. 35 Nástroje pro vnější soustružení závitu od firmy Sandvik Coromant [35]

Obr. 36 Nástroje pro vnější soustružení od firmy Iscar [36]

3.6.2 Nástroje pro soustružení vnitřních závitů

Soustružení vnitřních závitů je obtížnější než soustružení vnějších závitů z důvodu vysokého požadavku na efektivní odvod třísky. Nástroje jsou většinou delší a mají menší průřez (obr. 37 a 38). Pro malé vnitřní závity se používá monolitní karbidový nástroj. [34]

Obr. 37 Ukázka vnitřních soustružnických nožů pro soustružení závitů [30].

Obr. 38 Nástroje pro vnitřní soustružení závitů od firmy Sandvik Coromant [35].

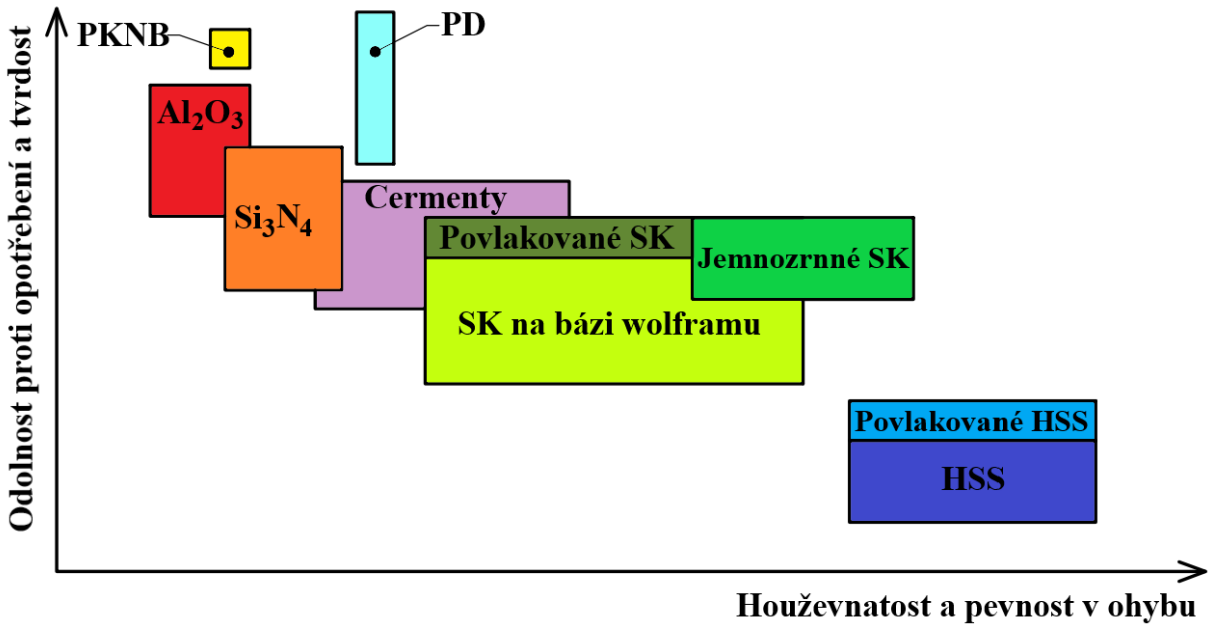
4 NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY

Účinnost soustružnického nástroje výrazně závisí na vlastnostech použitého materiálu (obr. 39). Materiály soustružnických nástrojů musí být vyrobeny z materiálů schopných odolat vysokému namáhání a teplotám. Mezi požadavky na nástrojový materiál patří [5; 6; 8]:

- vysoká tvrdost,
- vysoká odolnost proti opotřebení,
- vysoká lomová houževnatost,
- vysoká pevnost v ohybu,
- chemická inertnost,
- vysoká tepelná vodivost,
- vysoká odolnost proti únavě,
- vysoká odolnost proti otěru,
- vysoká odolnost proti náhlým teplotním změnám.

Nástrojové materiály se dělí na [6]:

- nástrojové oceli,
  - nelegované oceli,
  - legované oceli,
  - rychlořezné oceli,
- slinuté karbidy,
  - povlakované SK,
  - nepovlakované SK,
- cermety,
- řezná keramika,
  - oxidová keramika,
  - nitridová keramika,
- supertvrdé řezné materiály,
  - polykrystalický kubický nitrid bóru,
  - polykrystalický diamant.



Obr. 39 Vlastnosti řezných materiálů – podle [9].

4.1 Nástrojové oceli

Nástrojová ocel musí mít vysokou čistotu, to znamená méně vměstků a rovnoměrně rozložené karbidy v matrici, aby se snížilo riziko praskání nástroje během kalení a vyštipování břitu při provozu. Pro nástrojové oceli s velkými průřezy nebo složitými tvary rovněž musí být zaručena dostatečně vysoká prokalitelnost. Nástrojové oceli se dělí na oceli nelegované, oceli legované a rychlořezné oceli viz tab. 1. [3]

Tab. 1 Rozdělení, značení, vlastnosti a užití nástrojových ocelí – podle [3; 37].

Nástrojové oceli	Nelegované	Legované	Rychlořezné
Označování dle ČSN	19 0xx ÷ 19 2xx	19 3xx ÷ 19 7xx	19 8xx
Obsah uhlíku [%]	0,5 ÷ 1,5	0,8 ÷ 1,2	0,7 ÷ 1,3
Obsah legujících prvků [%]	< 1,0	10 ÷ 15	> 30
Legující prvky	Mn, Si, Cr	Cr, W, Mo, V, Mn, Si, Ni	W, Mo, Cr, V, Co
Kalící prostředí	voda	olej	vzduch
Tvrdost po kalení [HRC]	62 ÷ 64	66	64 ÷ 68
Využití	ruční nástroje a nářadí (nůžky, pilníky, sekáče, pilky na kov)	strojní nástroje pro nižší hodnoty řezné rychlosti (revolverové nože, vrtáky, frézy)	strojní nástroje (nože, frézy, vrtáky, výstružníky)

4.1.1 Rychlořezné oceli

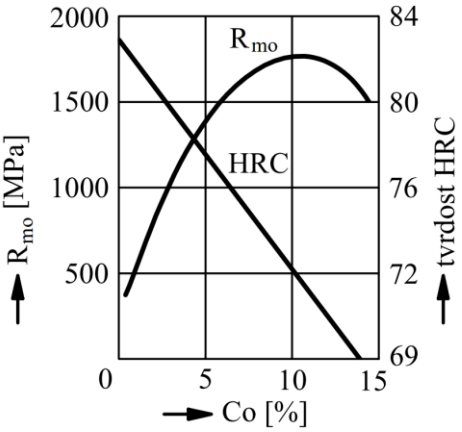
V současnosti se pro soustružnické nástroje z nástrojové oceli používají výhradně rychlořezné oceli. Rychlořezná ocel je vysoce legovaná ocel, kde hlavními legujícími prvky jsou W, Mo, Cr, V, Co. Rychlořezné oceli mají v porovnání s jinými řeznými materiály větší houževnatost a menší tvrdost. Nástroje vyrobené z rychlořezné oceli snesou teplotu na břitu až 600 °C. Nejpoužívanější rychlořezné oceli jsou vyznačeny v tab. 2. [9; 38]

Tab. 2 Charakteristiky aplikací rychlořezných ocelí – podle [38]

Označení podle normy	Hutní označení	Obráběné materiály a charakteristika pracovních podmínek
19 802	Maximum Speciál G Extra	Značně namáhané nástroje pro obrábění materiálů o nižší a střední pevnosti cca do 850 MPa hrubováním
19 830	Maximum Speciál M05	Značně namáhané nástroje pro obrábění materiálu do pevnosti 900 MPa i přerušovaným řezem a při požadavku na vysokou houževnatost
19 855	Maximum Speciál 55	Vysoce namáhané nástroje pro obrábění ocelí a ocelolitiny o vysoké pevnosti a materiálů těžkoobrobitelných při vysokých řezných rychlostech
19 857	MKG	Hrubování oceli a ocelolitiny o vysoké pevnosti a materiálů těžkoobrobitelných
19 858	Radeco C	Jemné a přesné obrábění oceli a ocelolitiny o vysoké pevnosti, tvrdých a abrazivních materiálů, nepřerušovaný řez
19 860	MKH	Nejvýše namáhané nástroje pro obrábění, zejména hrubování oceli a ocelolitiny o vysoké pevnosti, pevných a houževnatých materiálů
19 861	Radeco M10	Jemné obrábění oceli a ocelolitiny, ubírání třísek velkého průřezu u ocelí a ocelolitiny o vysoké pevnosti

4.2 Slinuté karbidy

Slinuté karbidy jsou nejpoužívanějšími materiály pro soustružnické nástroje. Vyrábí se slinováním, tedy technologií práškové metalurgie z karbidů a pojiva. Nejpoužívanějšími karbidy pro výrobu jsou karbid wolframu, karbid titanu, karbid tantalu a karbid niobu. Nejčastěji se jako pojivo používá kobalt. Změnou obsahu kobaltu lze změnit rovnováhu tvrdosti a houževnatosti viz obr. 40. Slinuté karbidy se vyrábí ve formě destiček, které mají normalizovaný tvar a rozměr viz obr. 41. Tyto destičky jsou následně pájeny nebo nejčastěji mechanicky upnuty na řeznou část nástroje. Mezi vlastnosti slinutých karbidů patří vysoká pevnost, vysoká únavová pevnost, vysoká tvrdost za tepla a dobrý odvod tepla. Modul pružnosti a pevnost v krutu jsou dvojnásobné v porovnání s rychlořeznou ocelí. [6; 8; 39]

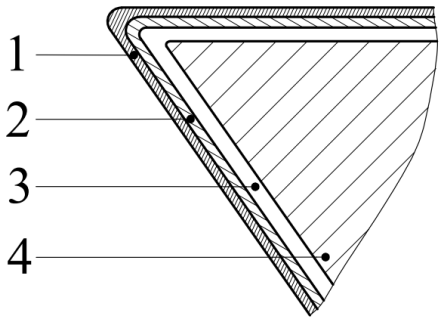


Obr. 40 Závislost tvrdosti HRC a pevnosti v ohybu $\mathbf{R_{mo}}$ slinutých karbidů na obsahu kobaltu – podle [6].

1 – tvar S, 2 – tvar W, 3 – zapichovací, 4 – závitové, 5 – upichovací
Obr. 41 VBD ze slinutých karbidů – podle [3].

4.2.1 Povlakované slinuté karbidy

Povlakované slinuté karbidy mají velký význam, protože v současnosti se používají nástroje z povlakovaných slinutých karbidů odhadem u více než 75 % soustružnických operací. Povlak, který je nanesen ve formě tenké vrstvy na slinutý karbid, má vysokou tvrdost a odolnost proti opotřebení. Na povlakování slinutých karbidů se převážně používá karbid titanu TiC, nitrid titanu TiN, karbonitrid titanu TiCN a oxid hlinitý Al_2O_3. Povlaky se dělí na jednovrstvé a vícevrstvé. U jednovrstvých povlaků se nejčastěji používá TiC, TiCN nebo TiN. Vícevrstvé povlaky se skládají ze dvou a více vrstev viz obr. 42. Na první vrstvu jsou většinou nanášeny vrstvy TiC nebo TiC-TiCN, které mají dobrou přilnavost ke slinutému karbidu. Na poslední vrstvu se nanáší TiN nebo Al_2O_3, které mají vysokou tvrdost a odolnost proti opotřebení. Dnes se především u vyměnitelných břitových destiček používají vícevrstvé povlaky. [3; 6]



1 – TiN, 2 – TiCN, 3 – TiC, 4 – základní SK
Obr. 42 Příklad třívrstvého povlaku – podle [6].

4.2.2 Nepovlakované slinuté karbidy

Slinuté karbidy se dělí dle normy ISO 513 na šest hlavních skupin a několik podskupin (např. P01, M01, K01) viz tab. 3. Ve všech skupinách slinutých karbidů platí, že čím vyšší je číslo podskupiny, tím vyšší je houževnatost, protože materiál obsahuje více pojiva. To znamená, že materiál s větším obsahem pojiva je vhodný pro hrubování. Naopak počáteční třídy jsou určeny pro lehké a dokončovací obrábění. [37; 40]

Tab. 3 Základní rozdělení slinutých karbidů a jejich použití – podle [40].

Skupina	Podskupiny	Základní chemické složení	Použití
P	P01, P05, P10, P15, P20, P25, P30, P35, P40, P45, P50	WC (30÷82) % + TiC (8÷64) % + Co (5÷17) % + (TaC.NbC)	Slinuté karbidy pro obrábění materiálů, dávající dlouhou, plynulou třísku: Nelegovaná, nízkolegovaná a vysoce legovaná ocel, litá ocel, automatová ocel, nástrojová ocel, feritická a martenzitická korozivzdorná ocel.
M	M01, M05, M10, M15, M20, M25, M30, M35, M40	WC (79÷84) % + TiC (5÷10) % + TaC.NbC (4÷7) % + Co (6÷15) %	Slinuté karbidy pro obrábění materiálů, dávající dlouhou a střední třísku: Austenitická a feriticko-austenitická ocel, korozivzdorná, žáruvzdorná, žáropevná, nemagnetická a otěruvzdorná ocel.
K	K01, K05, K10, K15, K20, K25, K30, K35, K40	WC (87÷92) % + Co (4÷12) % + (TaC.NbC)	Slinuté karbidy pro obrábění materiálů, dávající krátkou, drobivou třísku: Nelegovaná i legovaná šedá litina, tvárná litina, temperovaná litina.
N	N01, N05, N10, N15, N20, N25, N30		Slinuté karbidy pro obrábění neželezných materiálů: Slitiny mědi a hliníku, duroplasty, fibry, plasty s vlákninou, tvrdá guma.
S	S01, S05, S10, S15, S20, S25, S30		Slinuté karbidy pro obrábění: Žáruvzdorné slitiny na bázi Fe, superslitiny na bázi Ni nebo Co, Ti, Ti slitiny.
H	H01, H05, H10, H15, H20, H25, H30		Slinuté karbidy pro obrábění: Zušlechtěné oceli s pevností nad 1 500 MPa, kalené oceli HRC 48÷60, tvrzené kokilové litiny HSh 55÷58

4.3 Cermety

Cermet je řezný materiál na bázi TiC, TiN nebo TiCN s kovovým pojivem Ni, Mo nebo Co. Vyrábí se ve formě destiček pomocí práškové metalurgie. Cermety mají vysokou tvrdost za tepla, vysokou odolnost proti difuznímu oxidačnímu opotřebení, vysokou chemickou stabilitu a odolnost vytvářet nárůstek. Houževnatost je u cermetů nižší než u slinutých karbidů, a proto se cermety používají hlavně pro dokončovací operace. Typické použití je u obrábění ocelí, neželezných kovů, litiny, lité oceli, snadno obrobitelných slitin a v současnosti také existují druhy cermetů k soustružení korozivzdorné oceli. [1; 6; 37]

4.4 Řezná keramika

Řezná keramika je polykrystalický materiál se zrny malých rozměrů (obvykle pod 1 μm). Řezná keramika má vysokou tvrdost (i při vysokých teplotách), nízkou houževnatost a je chemicky inertní k obráběnému materiálu. Keramické řezné materiály zaručují vysokou trvanlivost břitu a jsou schopné odolat vysokým teplotám na břitu (až 1 200 °C), což umožnuje použití vysokých řezných rychlostí (300 až 1 600 $m \cdot min^{-1}$). Použití řezné keramiky při soustružení viz tab. 4. Řezná keramika je dělena na dvě skupiny [1; 6; 41]:

- oxidová keramika
  - čistá, Al_2O_3
  - polosměsná, $Al_2O_3 + ZrO_2$, $Al_2O_3 + ZrO_2 + CoO$
  - směsná, $Al_2O_3 + TiC$, $Al_2O_3 + TiCN$, $Al_2O_3 + ZrO_2 + TiC$, $Al_2O_3 + TiC + TiN$
- nitridová keramika Si_3N_4, $Si_3N_4 + Y_2O_3$, $Si_3N_4 + TiN$; sialony

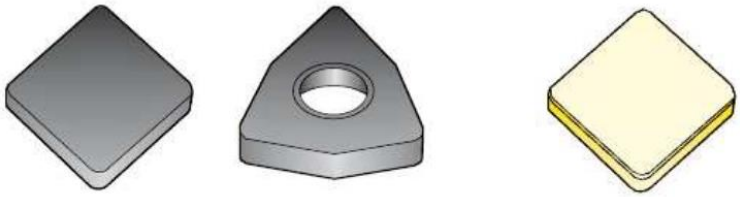
Všechny druhy keramiky pro řezné nástroje lze vyrábět ve formě s vyztužujícími vlákny, whiskery SiC nebo Si_3N_4 a CVD nebo PVD povlaky. Vyztužení zvyšuje houževnatost, pevnost v tahu, odolnost proti tepelnému šoku, tvrdost za tepla a odolnost proti opotřebení. [1; 41]

Tab. 4 Použití řezné keramiky při soustružení [42].

Druh řezné keramiky	Použití	Charakter řezu
Al_2O_3	obrábění šedé litiny a konstrukčních ocelí nepřerušovaným řezem vysokými rychlostmi za sucha	dokončovací operace
$Al_2O_3 + ZrO_2$	obrábění šedé, tvárné a temperované litiny, konstrukčních i zušlechtěných ocelí za sucha	střední a dokončovací operace, částečně přerušovaný řez
$Al_2O_3 + TiC$	obrábění kalených ocelí a těžko obrobitelných materiálů s částečně přerušovaným řezem za sucha i s chlazením obrábění šedé litiny a tvrzených litin	střední a dokončovací operace
keramiky na bázi Si_3N_4	obrábění všech druhů litin, slitin na bázi Ni za sucha i s chlazením	hrubovací i dokončovací operace
Al_2O_3 + whiskery SiC	obrábění žáruvzdorných a žárupevných materiálů a kalené oceli	hrubovací i dokončovací operace

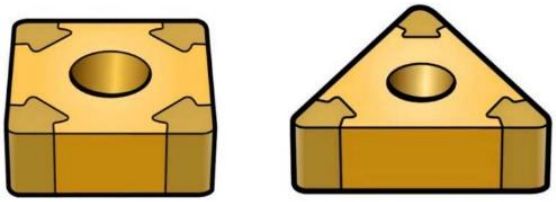
4.5 Supertvrdé řezné materiály

Nástroje ze supertvrdých materiálů jsou vyrobeny ve formě vyměnitelných břitových destiček a poskytují vysokou životnost při vysokých řezných rychlostech. Mezi supertvrdé řezné materiály patří polykrystalický kubický nitrid bóru PKNB a polykrystalický diamant PD. Vyměnitelné břitové destičky vyrobené ze supertvrdých řezných materiálů se vyrábí nanesením nebo připájením silné vrstvy PKNB nebo PD na podložku ze slinutého karbidu viz obr. 43. V současnosti se především používají vyměnitelné břitové destičky s PKNB nebo PD roubíkem viz obr. 44 a obr. 45. Roubík je připájen do drážky ve špičce destičky nebo špičku destičky sám tvoří. Vyměnitelné břitové destičky z PKNB se také vyrábí jako monolitní. [8; 41]



Obr. 43 Monolitní břitové destičky z PKNB (vlevo) a destička s nanesenou vrstvou (vpravo) [43].

Obr. 44 Břitové destičky s připájeným roubíkem z PKNB nebo PD [43].



Obr. 45 Břitové destičky CB7015 se zámkovou konstrukcí roubíku firmy Sandvik Coromant [43].

4.5.1 Polykrystalický kubický nitrid bóru

Polykrystalický kubický nitrid bóru je po diamantu nejtvrdší známý řezný materiál. Vyrábí se spojením kubických krystalů bóru a keramického nebo kovového pojiva při vysoké teplotě a tlaku. PKNB má vysokou tvrdost za tepla (až 2 000 °C), dobrou chemickou stabilitu a velkou odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Nástroje z PKNB se používají pro soustružení kalené oceli a litiny, ocelových výkovků, žáruvzdorných materiálů, povrchově kalených obrobků, nežíhané tvrdé litiny a kobaltových a niklových slitin. [1; 6; 8]

4.5.2 Polykrystalický diamant

Polykrystalický diamant téměř dosahuje tvrdosti monokrystalického diamantu, který je nejtvrdší známý materiál. Vyrábí se slinováním jemných krystalů diamantu při vysoké teplotě a tlaku. PD má vysokou tvrdost, vynikající odolnost proti opotřebení, vysokou tepelnou vodivost, vysokou trvanlivost břitu (až stokrát vyšší než u SK) a velkou křehkost. Nástroje z PD se používají pro soustružení neželezných kovů (titan a jeho slitiny, slitiny hliníku a slitiny mědi), nekovových materiálů (grafit, keramika, pryž, plast, sklo apod.) a kompozitních materiálů. Z důvodu afinity k železu nesmí být PD používán při obrábění železných materiálů. [1; 6; 8; 41]

5 PRŮMYSL 4.0

Průmysl 4.0 je koncept, který vznikl v Německu a často je označován jako čtvrtá průmyslová revoluce, protože představuje zcela nový rozměr organizace práce a výroby. Hlavní myšlenkou Průmyslu 4.0 je digitalizace výroby. Digitalizace zahrnuje rostoucí využívání síťových, digitálních a automatizovaných technologií. [44; 45]

První průmyslová revoluce proběhla v 18. století a jejím hlavním rysem bylo zavedení mechanických parních strojů. Druhá průmyslová revoluce proběhla v 19. století a byla ve znamení elektrické energie. Třetí průmyslová revoluce přinesla v 70. letech 20. století první průmyslové počítače a další prvky průmyslové automatizace. Čtvrtá průmyslová revoluce právě probíhá a skokově posunuje automatizaci a digitalizaci. Stroje jsou díky internetu spolu propojeny do jednotného digitálního celku a komunikují v reálném čase. Rozdělení průmyslových revolucí a jejich hlavních rysů viz obr. 46. [46; 47]

Obr. 46 Průmyslový vývoj [48].

Průmysl 4.0 sjednocuje fyzické, informační i datové komponenty a propojuje chytré stroje a nástroje, úložné a logistické systémy a další technologická zařízení do jednoho celku prostřednictvím internetu. To umožní továrnám fungovat spíše jako systém než jednotlivé části. V digitalizované budoucnosti budou všechny stroje a nástroje, které vyrábějí, vybaveny senzory. Tyto senzory budou mezi sebou komunikovat a nepřetržitě optimalizovat své procesy. Nejen mezi sebou, ale i s dalšími systémy jako je výroba, prodej, a dokonce i zákazníci a dodavatelé budou integrovaní do propojeného světa. [44; 46; 49]

V budoucnosti je velice pravděpodobné, že čtvrtá průmyslová revoluce se postupně rozšíří do všech oblastí průmyslové výroby. Sociálně to povede k velkým změnám, stejně jako tomu bylo po předchozích průmyslových revolucích. Pro spotřebitele budou existovat lépe propojené produkty s velkou mírou přizpůsobení. Továrny budou potřebovat méně dělníků, ale prudce vzroste poptávka po službách. Z technologického hlediska bude stále více a více dat vyměňováno rychleji a rychleji, aby byla realizována optimální výroba. [50]

5.1 Soustružnické nástroje pro Průmysl 4.0

Průmysl 4.0 vede k totální automatizaci, to znamená, že zde musí probíhat bezproblémový obráběcí proces, aby nemusel být nutný zásah osoby. Pro dosažení bezproblémového obráběcího procesu je základem soustružnický nástroj s utvařečem třísky, který musí vytvářet krátkou třísku.

5.1.1 Tvorba třísky

Při soustružení je materiál odebírán ve formě třísky. Správné utváření třísek a jejich odvod z místa řezu je základem toho, aby obrábění probíhalo plynule a obráběcí stroj, nástroj

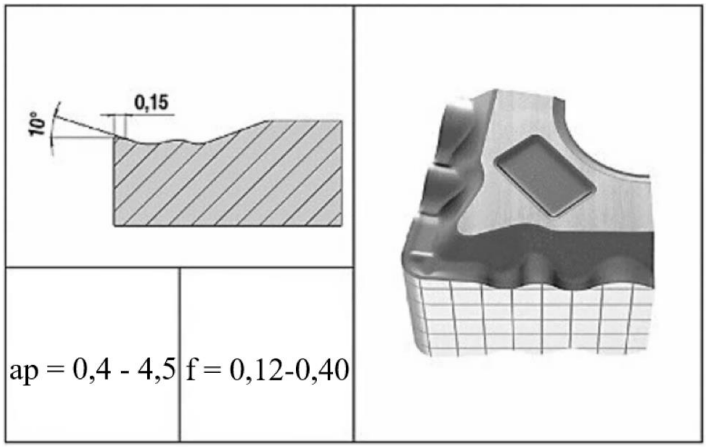
a obrobek nebyly poškozeny. Způsob utváření třísky souvisí s geometrií řezné hrany. Vhodná řezná hrana a geometrie utvařeče třísky zaručuje dlouhou životnost nástroje, nízké řezné síly, správné utváření třísek a jejich snadný odvod. Při použití vhodné řezné hrany a utvařeče třísky lze zajistit stabilní, efektivní a bezobslužný proces. Faktory, které ovlivňují utváření třísky viz obr. 47. [51]

Nástroj	Řezné podmínky	Materiál	Způsob chlazení
Úhel čela	Posuv	Tvrdost	Obrábění za sucha
Úhel řezné hrany	Hloubka řezu	Pevnost v tahu	Chlazení emulzí
Rádius špičky	Tloušťka třísky (úběr)	Houževnatost	Seco Jetstream
Geometrie řezné hrany a utvařeče třísek	Řezná rychlost	Materiálové složení	

Obr. 47 Faktory ovlivňující tvorbu třísky – podle [51].

Při kompletně automatickém obrábění se třísky v žádném případě nesmí namotávat na obrobek a tím znesnadňovat obráběcí proces. Nejvýhodnější jsou třísky krátké, ale neměly by být příliš krátké z důvodu vzniku mikrotrhlin na řezné hraně, což může vést k předčasnému vylomení řezné hrany. Utvařeče třísek pro moderní soustružnické nástroje jsou předlisovány na břitových destičkách. [51; 52]

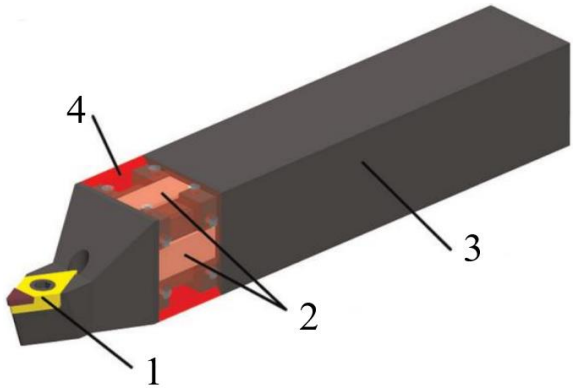
Typickým příkladem je moderní vyměnitelná břitová destička s utvařečem třísky –XU od firmy Ceratizit (obr. 48), která je schopna utvářet drobnou třísku u materiálů náchylných ke tvoření dlouhé třísky. Geometrie utvařeče –XU je vyvinutá pro optimální lámání třísek. Vytvrzený povrch zajišťuje jejich plynulé odvádění z místa řezu a má také vliv na stálost řezné hrany. Při použití těchto destiček v obráběcích centrech je zajištěna tvorba drobných třísek a čistý pracovní prostor. Tím je umožněna automatizovaná bezobslužná výroba. [53]



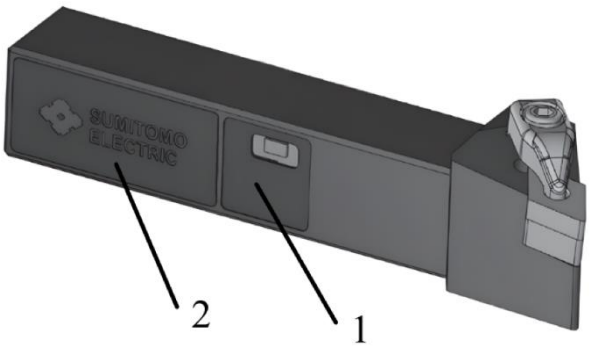
ap – hloubka řezu, **f** – posuv.
Obr. 48 Geometrie utvařeče –XU – podle [53].

5.1.2 Předpokládaná vize soustružnických nástrojů pro Průmysl 4.0

Chytré nástroje mají v Průmyslu 4.0 velký potenciál. Nástroj bude v budoucnu nejen zodpovědný za kvalitu obrobku, ale stane se i centrálním nosičem informací pro efektivní řízení jednotlivých procesních kroků a celé výroby. Chytré soustružnické nástroje budou vybaveny senzory (obr. 49 a 50), které budou v reálném čase s vysokou přesností monitorovat řezné síly, protože řezné síly mají vliv na opotřebení nástroje. Chytré nástroje se budou vyznačovat vysokou propojeností, autonomním provozem, aktivním sledováním stavu břitu a samoučením. Díky těmto informacím bude stroj schopný nastavit ideální parametry soustružení. To znamená, že nástroje budou používány optimálním způsobem, což povede k efektivnímu bezobslužnému výrobnímu procesu. [54; 55]



1 – VBD, 2 – piezoelektrické snímače, 3 – upínací část, 4 – kryt senzorů.
Obr. 49 Koncept chytrého soustružnického nože – podle [56].



1 – snímač s bezdrátovým přenosem, 2 – zdroj napájení.
Obr. 50 Koncept soustružnického nože od firmy Sumitomo Electric Industries – podle [57].

Ukázkovým příkladem chytrých soustružnických nástrojů je firma Sandvik Coromant, která vybavila soustružnický adaptér (obr. 51) z řady Silent Tools™ senzory, které disponují technologií Bluetooth, přes kterou jsou data posílána do mobilní aplikace, kde lze v reálném čase sledovat podmínky soustružení. Senzory posílají různé informace, jako například přesnost osy, vibrace a opotřebení břitové destičky. [58; 59]

Obr. 51 Senzory vybavený soustružnický adaptér Silent Tools™ + [60].

ZÁVĚR

První část byla věnována historii soustružení. V této části jsou popsané hlavní milníky vývoje technologie soustružení, které bylo potřeba překonat, aby se technologie soustružení dostala do dnešní podoby. Důležitým milníkem bylo zavedení křížového suportu, protože nástroj už nebylo potřeba držet v ruce, což znamenalo zlepšení přesnosti a bezpečnosti. Vývoj nových nástrojových materiálů také velmi výrazně přispěl k inovaci soustružení, protože se zkrátil čas soustružení a bylo možné soustružit materiály, které předtím bylo velice obtížné nebo nemožné soustružit.

Druhá část se zabývá rozborem technologie soustružení, kde je vysvětlen základní princip soustružení, definice obrobku a základní popis nástroje včetně rozdělení nástrojových rovin a základních nástrojových úhlů. V této kapitole jsou dále základní výpočtové vztahy, které souvisí s technologií soustružení.

Ve třetí části jsou rozdělené soustružnické nástroje dle technologického hlediska a dle jednotlivých aplikací soustružení. V každé operaci soustružení je ukázán vhodný typ nástroje. V této části jsou dále rozděleny nejpoužívanější typy břitových destiček a jejich vlastností, které jsou velice důležité při volbě soustružnického nástroje, protože pro každou operaci je vhodné použít jiný typ destičky. Dnes se však z důvodu úspory času používají nástroje víceúčelové, které jsou schopny soustružit podélně, čelně i tvarově. Tyto nástroje se především používají pro dokončování, kde je malý úběr třísky.

Čtvrtá část rozebírá používané nástrojové materiály. Mezi základní požadavky na nástrojový materiál patří vysoká tvrdost, vysoká houževnatost, vysoká pevnost v ohybu a odolnost proti opotřebení. Nejpoužívanějším materiálem pro výrobu soustružnických nástrojů je slinutý karbid, který se používá odhadem u více než 75 % soustružnických operací.

Poslední část se zabývá Průmyslem 4.0 a předpokládanou vizí soustružnických nástrojů. V Průmyslu 4.0 bude vše navzájem propojeno, to znamená, že továrny budou fungovat jako systém než jednotlivé části, což umožní téměř bezobslužný obráběcí proces. Hlavní podmínkou pro bezobslužný obráběcí proces je správné utváření a odvod třísky od místa řezu. To zajistí správná geometrie utvařeče třísky, která bude tvořit krátké třísky. Chytré soustružnické nástroje budou obsahovat senzory, které budou monitorovat v reálném čase řezné síly, což umožní stroji nastavit ideální parametry soustružení a bezobslužný provoz.

Shrnutí dosažených výsledků:

- základní rozbor technologie soustružení včetně výpočtových vztahů,
- rozbor používaných soustružnických nástrojů dle jednotlivé aplikace soustružení,
- rozdělení používaných nástrojových materiálů pro soustružení,
- hlavní myšlenka Průmyslu 4.0 a předpokládaná vize soustružnických nástrojů pro Průmysl 4.0.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Příručka obrábění – Kniha pro praktiky. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ, s.r.o. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, 1997. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.
2. BUREŠ, J. *Základy soustružení* [online]. 13 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://adoc.pub/zaklady-soustrueni.html
3. HUMÁR, A. *Technologie obrábění – 1. část: Studijní opory pro magisterskou formu studia* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2003 [cit. 2022-02-21]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
4. JERSÁK, J. Geometrie řezného nástroje [online]. s. 12 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: http://educom.tul.cz/educom/inovace/TOB/VY_03_039-geometrie%20%C5%99ezn%C3%A9ho%20n%C3%A1stroje_MZ_4.pdf
5. HUDA, Z. *Machining Processes and Machines* [online]. Milton: CRC Press, 2020 [cit. 2022-05-10]. ISBN 0367532697. Dostupné z: https://doi.org/10.1201/9781003081203
6. KOCMAN, K. a PROKOP, J. Technologie obrábění. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno. 2001. ISBN 80-214-1996-2.
7. *Vznik třísky a její druhy* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1190
8. STEPHENSON, D. A. a J. S. AGAPIOU. *Metal Cutting Theory and Practice* [online]. 3. Baton Rouge: CRC Press, 2016 [cit. 2022-05-10]. ISBN 0367532697. Dostupné z: https://doi.org/10.1201/9781315373119
9. DILLINGER, J. a J. HANDLÍŘ. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Praha: Europa-Sobotáles, 2007, 608 s. ISBN 978-80-86706-19-1
10. MATĚJKA, P. *Nástroje pro soustružení* [online]. Brno, 2008 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6327. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
11. SANDVIK COROMANT. *Volba vhodných soustružnických břitových destiček* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/pages/how-to-choose-correct-turning-insert.aspx
12. SANDVIK COROMANT. *Soustružení vnějších ploch* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/pages/external-turning.aspx
13. SANDVIK COROMANT. *Všeobecné soustružení* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/pages/default.aspx
14. SANDVIK COROMANT. *T-Max® P* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/t-max_p/pages/default.aspx
15. SANDVIK COROMANT. *Soustružení vnitřních ploch* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/pages/internal-turning.aspx
16. *Soustružení vnitřních válcových ploch* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.osu.cz/dokumenty/proportal/pdf/kpv/soustruzeni/lekce10.htm

17. SANDVIK COROMANT. *Soustružení vnitřních ploch* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/pages/internal-turning-tools.aspx
18. DORMER PRAMET. *PSKNR 5050 T 25* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://dormerpramet.com/cz/cs/p/6758289
19. SMETANOVÁ, A. *Soustružení tvarových ploch* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.zamekkurim.cz/security/Dum%20-%20Digitalni%20ucebni%20materialy/08_Sada_Obrabeni_1/VY_32_INOVACE_08_06_Soustruzeni_tvarovych_ploch.pdf
20. SANDVIK COROMANT. *CoroTurn® TR* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/coroturn_tr/pages/default.aspx
21. DORMER PRAMET. *SVXCL 2020 K 13* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.dormerpramet.com/cz/cs/p/6760448
22. DORMER PRAMET. *S32U-SDQCL 11-A* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.dormerpramet.com/cz/cs/p/6756652
23. *Práce na soustruhu - soustružení drážek, zápichy, upichování, vypichování* [online]. s. 7 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://coptel.cz/mod/resource/view.php?id=8105
24. SANDVIK COROMANT. *Upichování* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/parting-grooving/pages/parting-off.aspx
25. ČÍPOVÁ, I. Příručka základů soustružení [online]. [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: http://moodle2.voskop.eu/download/teu/U03_Prirucka_zakladu_soustruzeni.pdf
26. SANDVIK COROMANT. *Výroba vnějších drážek* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/pages/external-grooving-tools.aspx
27. SANDVIK COROMANT. *Výroba vnitřních drážek* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/parting-grooving/pages/internal-grooving.aspx
28. DORMER PRAMET. *A25S-GGHL 0313* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://dormerpramet.com/cz/cs/p/6758158
29. SANDVIK COROMANT. *Čelní zapichování* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/parting-grooving/pages/face-grooving.aspx
30. SANDVIK COROMANT. *Soustružnická příručka* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://coromantstrgprod.blob.core.windows.net/publications/2a9f4948-4451-4d4b-ab85-d6e2c81dfdc5.pdf?sv=2020-04-08&st=2022-05-10T19%3A16%3A08Z&se=2022-05-10T22%3A21%3A08Z&sr=b&sp=r&rscd=inline%3B+filename%3DC-1020-18.pdf&rsct=application%2Fpdf&sig=UMddqihg6rvgmQf6j8FzQRBtWLUqZ%2BC2s4jSM%2FEGZp4%3D
31. *Výroba závitů* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/STT-Vyroba_zavitu_RAJ.pdf
32. SANDVIK COROMANT. *Jak zvolit břitovou destičku a podložku pro soustružení závitů* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/threading/thread-turning/pages/how-to-choose-thread-turning-insert-and-shim.aspx

33. SAIF, M. *14 DIFFERENT TYPES OF LATHE CUTTING TOOLS USED IN LATHE MACHINE* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.theengineerspost.com/lathe-cutting-tools/

34. SANDVIK COROMANT. *Soustružení závitů* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/threading/thread-turning/pages/default.aspx

35. SANDVIK COROMANT. [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/pages/thread-turning-tools.aspx

36. *Závity přesně a spolehlivě* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/zavity-presne-a-spolehlive

37. FOREJT, M. a M. PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické vydavatelství CERM, s. r. o., 2006. 217 s. ISBN 80-214-2374-9.

38. KOCMAN, K. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.

39. YOUSSEF, H. A., H. A. EL-HOFY a M. H. AHMED. *Manufacturing Technology* [online]. 2011. Bosa Roca: Taylor & Francis Group, 2011 [cit. 2022-05-10]. ISBN 1439810850. Dostupné z: https://doi.org/10.1201/b11792

40. DEMBEK, J. *Slinuté karbidy a jejich efektivní využití* [online]. Brno, 2010 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29889. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

41. HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. MM Publishing, Praha. 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.

42. *Keramika* [online]. s. 26 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/keramika.pdf

43. JANIŠTINOVÁ, E. *Supertvrdé řezné materiály* [online]. Brno, 2011 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41047. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

44. RAVELING, J. *Was ist Industrie 4.0? Die Definition von Digitalisierung* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.wfb-bremen.de/de/page/stories/digitalisierung-industrie40/was-ist-industrie-40-eine-kurze-erklaerung

45. SIEMENS. *Průmysl 4.0* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.plm.automation.siemens.com/global/cz/our-story/glossary/industry-4-0/29278

46. *Jak rozumět konceptu Průmysl 4.0* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.spcr.cz/aktivity/z-hospodarske-politiky/12973-jak-rozumet-konceptu-prumysl-4-0

47. ENOVATION. *Průmysl 4.0: čtvrtá průmyslová revoluce právě probíhá* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.enovation.cz/aktuality/dotace-pro-podnikatele/prumysl-40-ctvrta-prumyslova-revoluce-prave-probiha/

48. LEAN INDUSTRY. *PRŮMYSL 4.0* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.leanindustry.cz/prumysl-4-0/

49. NICHOLS, M. R. *6 Ways Industry 4.0 Is Changing Machine Tools* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.manufacturingtomorrow.com/article/2017/12/6-ways-industry-40-is-changing-machine-tools/10787/
50. INRAY GMBH. *Requirements for Industry 4.0 — What is technically necessary?* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://medium.com/@inray.industriesoftware/requirements-for-industry-4-0-what-is-technically-necessary-18ee6bbb7351
51. *Příručka pro technology - Jak rozpoznat správné utváření třísek?* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-rozpoznat-spravne-utvareni-trisek
52. *SOUSTRUŽENÍ* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://vyuka.hradebni.cz/file.php/192/soustruzeni.pdf
53. *Nový utvařeč třísek* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/novy-utvarec-trisek
54. CHENG, K., Z. NIU, WANG, R. RAKOWSKI a R. BATEMAN. *Smart Cutting Tools and Smart Machining: Development Approaches, and Their Implementation and Application Perspectives* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/322758733_Smart_Cutting_Tools_and_Smart_Machining_Development_Approaches_and_Their_Implementation_and_Application_Perspectives
55. LEITZ. *Intelligente Leitz Werkzeuge beherrschen die Prozesse* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.leitz.org/de/news-downloads/news/news-detail/intelligente-leitz-werkzeuge-beherrschen-die-prozesse/
56. XIAO, C., H. DING, K. CHENG a S. CHEN. *Design of an innovative smart turning tool with application to real-time cutting force measurement*. [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/276834852_Design_of_an_innovative_smart_turning_tool_with_application_to_real-time_cutting_force_measurement
57. KOIKE, Y., T. AOKI a D. MURAKAMI. SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES. *Sensor-Equipped Cutting Tools to Visualize the Cutting Process* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://sumitomoelectric.com/sites/default/files/2021-04/download_documents/E92-05.pdf
58. BACKMAN, Å. a F. ANDREASSON. SANDVIK COROMANT. *Přivítejte další průmyslovou revoluci* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/mww/pages/t_coroplus.aspx
59. HANSON, K. MSC INDUSTRIAL DIRECT. *CUTTING-TOOL TRENDS IN METALWORKING AND MANUFACTURING* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.mscdirect.com/betterMRO/metalworking/4-cutting-tool-trends-metalworking-and-manufacturing
60. SANDVIK COROMANT. *Nástroje Silent Tools™ pro soustružení* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/silent_tools_turning/pages/default.aspx

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
A_D	plocha jmenovitého průřezu třísky	[mm]
A_α	hlavní hřbet	[-]
A_γ	čelo	[-]
A'_α	vedlejší hřbet	[-]
C_{Fc}	materiálová konstanta	[-]
C_{Ff}	materiálová konstanta	[-]
C_{Fp}	materiálová konstanta	[-]
D	průměr obrobku	[mm]
D_{max}	vnější průměr obrobku	[mm]
D_{min}	vnitřní průměr obrobku	[mm]
F	celková řezná síla	[N]
F_c	řezná síla	[N]
F_f	posuvová síla	[N]
F_p	pasivní síla	[N]
L	délka obráběné plochy	[mm]
P_b	nástrojová rovina největšího spádu hřbetu	[-]
P_c	řezný výkon	[kW]
P_f	nástrojová boční rovina	[-]
P_g	nástrojová rovina největšího spádu čela	[-]
P_n	nástrojová normálová rovina	[-]
P_o	nástrojová ortogonální rovina	[-]
P_p	nástrojová zadní rovina	[-]
P_r	nástrojová základní rovina	[-]
P_s	nástrojová rovina ostří	[-]
P_s'	nástrojová rovina vedlejšího ostří	[-]
R_{mo}	mez pevnosti v ohybu	[MPa]
S	hlavní ostří	[-]
S´	vedlejší ostří	[-]
a_p	šířka záběru ostří	[mm]
b_ε	šířka špičky	[mm]
b_D	jmenovitá šířka třísky	[mm]
d	průměr obrobené plochy	[mm]
f	posuv na otáčku obrobku	[mm]
h_D	jmenovitá tloušťka třísky	[mm]
k_c	měrná řezná síla	[MPa]
l	délka obrobené plochy	[mm]
l_n	délka náběhu	[mm]
l_p	délka přeběhu	[mm]
n	otáčky obrobku	[min^{-1}]
r_ε	poloměr špičky	[mm]
t_{AS}	jednotkový strojní čas pro podélné soustružení	[min]
t_{ASn}	jednotkový strojní čas pro čelní soustružení při konstantních otáčkách	[min]
t_{ASv}	jednotkový strojní čas pro čelní soustružení při konstantní řezné rychlosti	[min]
v_c	řezná rychlost	[$m \cdot min^{-1}$]
v_e	rychlost řezného pohybu	[$m \cdot min^{-1}$]

v_f	posuvová rychlost	[m·min^{-1}]
x_{Fc}	exponent vlivu šířky záběru	[-]
x_{Ff}	exponent vlivu šířky záběru	[-]
x_{Fp}	exponent vlivu šířky záběru	[-]
y_{Fc}	exponent vlivu posuvu	[-]
y_{Ff}	exponent vlivu posuvu	[-]
y_{Fp}	exponent vlivu posuvu	[-]
α_o	nástrojový úhel hřbetu ortogonální	[°]
β_o	nástrojový úhel břitu ortogonální	[°]
γ_o	nástrojový úhel čela ortogonální	[°]
ε_r	nástrojový úhel špičky	[°]
η	úhel řezného pohybu	[°]
κ_r	nástrojový úhel nastavení hlavního ostří [°].	[°]
κ_r'	nástrojový vedlejší úhel nastavení κ_r	[°]
λ_s	nástrojový úhel sklonu ostří	[°]
φ	úhel posuvového pohybu	[°]
ψ_r	nástrojový úhel nastavení doplňkový	[°]

Zkratky

Označení	Legenda
CVD	Chemical Vapor Deposition
HRC	tvrdost dle Rockwella
HSh	tvrdost dle Shorea
HSS	rychlořezná ocel
PD	polykrystalický diamant
PKNB	polykrystalický kubický nitrid bóru
PVD	Physical Vapour Deposition
SK	slinutý karbid
VBD	vyměnitelná břitová destička