

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**



FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ
A METROLOGIE

**MONITOROVÁNÍ OPOTŘEBENÍ A DESTRUKCE OBRÁBĚCÍCH
NÁSTROJŮ**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

VEDOUCÍ PRÁCE: prof. Ing. JAN MÁDL, CSc.

AUTOR PRÁCE: MICHAL PALÁN

Praha 2018



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Palán** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **419756**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Monitorování opotřebenění a destrukce obráběcích nástrojů

Název bakalářské práce anglicky:

Monitoring of cutting tool wear and cutting tool destruction

Pokyny pro vypracování:

1. Přehled současného stavu monitorování obráběcích nástrojů
2. Zhodnocení současného stavu monitorování obráběcích nástrojů

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

prof. Ing. Jan Mádl, CSc., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **31.10.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **19.01.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: _____



Podpis vedoucí(ho) práce



Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použitých literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.



Datum převzetí zadání



Podpis studenta



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci s názvem: „Monitorování opotřebení a destrukce obráběcích nástrojů“ vypracoval samostatně, pod vedením prof. Ing. Jana Mádla, CSc. a s použitím literatury, uvedené na konci mé bakalářské práce – viz seznam použité literatury.

V Praze dne 17.01.2018

Podpis autora Michal Palán



Poděkování

Mé největší poděkování patří vedoucímu této práce – panu prof. Ing. Janu Mádlovi, CSc. za odborný dohled, velice cenné rady, včasné připomínky a podporu při tvorbě této práce.

Na závěr děkuji celé své rodině za trpělivost a psychickou podporu během celého studia.



Anotace:

Bakalářská práce se stručně zabývá samotným vznikem opotřebení obráběcího nástroje, jednotlivými druhy opotřebení, mechanismy opotřebení a také jeho důsledky. Je zaměřena na monitorování tohoto opotřebení, nebo dokonce destrukce samotného obráběcího nástroje, rozbor jednotlivých metod monitorování, jejich aplikací a zhodnocením.

V práci jsou zařazeny i kapitoly, které nejednají bezprostředně o monitorování opotřebení a destrukce nástroje, ale s problematikou souvisejí.

Abstract:

The bachelor thesis deals briefly with the occurrence of wear of the cutting tool, with different types of wear, wear mechanisms and its consequences. It focuses on monitoring this wear, or even destroying the tool itself, analyzing individual monitoring methods, applying and evaluating them.

The thesis also includes chapters, that do not act directly on the monitoring of wear and destruction of the tool but they are related.



Obsah

Obsah	6
Seznam použitých symbolů	8
Úvod.....	10
1. Opotřebení obráběcích nástrojů	11
1.1 Typy opotřebení - otěruvzdorné	12
1.1.1 Opotřebení hřbetu nástroje.....	12
1.1.2 Opotřebení ve tvaru žlábků.....	12
1.1.3 Vydrolení ostří	13
1.1.4 Plastická deformace břitu.....	13
1.1.5 Opotřebení ve tvaru rýhy	14
1.2 Hlavní mechanismy opotřebení	15
1.2.1 Abrazivní opotřebení	15
1.2.2 Adhezní opotřebení.....	15
1.2.3 Difúzní opotřebení	16
1.2.4 Chemické opotřebení	17
1.2.5 Lom.....	17
1.2.5.1 Hřebenovité trhlinky na ostří nástroje	18
1.2.5.2 Únavový lom nástroje.....	18
1.2.5.3 Lom břitu nástroje.....	19
2. Monitorování opotřebení a destrukce obráběcích nástrojů.....	20
2.1 Úvod a podstata monitorování.....	20
2.2 Monitorování a jeho optimalizace	22
2.3 Přímé metody měření opotřebení.....	23
2.3.1 Metoda váhová.....	23
2.3.2 Metoda radioaktivních izotopů	24



2.3.3 Mikrometrická metoda.....	25
2.3.4 Optická (stínová) metoda.....	26
2.4 Metody monitorování opotřebení	27
2.4.1 Přímé metody.....	27
2.4.1.1 Metoda nanesené odporové vrstvy	27
2.4.1.1.1 Metoda odporové vrstvy s integrovanými senzory opotřebení.....	27
2.4.1.2 Pneumatická metoda	29
2.4.2 Nepřímé metody	30
2.4.2.1 Měření pomocí lupy s mikrometrickým šroubem.....	30
2.4.2.2 Měření pomocí síly řezání a krouticího momentu	31
2.4.2.3 Monitorování pomocí tepla obráběcího nástroje	33
2.4.2.4 Měření mezery mezi obrobenou plochou a břitem nástroje	34
2.4.2.5 Měření zvuku	36
2.4.2.6 Monitorování akustických emisí.....	36
2.4.2.7 Monitorování prostřednictvím vibrací	37
3. Závěr	39
Seznam použité literatury a zdrojů	40
Seznam obrázků.....	43



Seznam použitých symbolů

VB	opotřebení hřbetu průměrné [mm]
VC	opotřebení hřbetu v oblasti špičky [mm]
VN	opotřebení hřbetu vrubové [mm]
VB_{max}	opotřebení hřbetu maximální [mm]
KT	hloubka žlábků opotřebení čela [mm]
KB	šířka žlábků opotřebení čela [mm]
KL	poloha středu žlábků opotřebení čela [mm]
VR	radiální opotřebení špičky [mm]
ΔM	je úbytek hmoty [g]
M1	je hmotnost destičky před otupením [g]
M2	je hmotnost destičky po otupení [g]
i_n	specifická aktivita nástroje [impuls/min]
I_n	aktivita nástroje [impuls/min]
M_n	zkoumané množství nástrojového materiálu [g]
m_{mat}	hmotnost opotřebovaného materiálu [g]
$I_{tř}$	aktivita třísek [impuls/min]
D_o	průměr obráběné plochy [mm]
K_m	konstanta daná konstrukcí měřidla
f	posuv [mm]
α_n	úhel hřbetu [°]
κ	úhel nastavení hlavního břitu [°]
FB	fotobuňka



U	fotoelektrické napětí [V]
Q1	teplo vzniklé deformací v oblasti střižné plochy [J]
Q2	teplo vzniklé třením třísky v oblasti čela nástroje [J]
Q3	teplo vzniklé třením v oblasti hřbetu nástroje [J]
Q_t	teplo pohlcené třískou [J]
Q_o	teplo pohlcené obrobkem [J]
Q_n	teplo pohlcené nástrojem [J]
Q_p	teplo pohlcené okolím řezu [J]



Úvod

Během obrábění, kdy nástroj působí na obrobek, jsou břity nástroje velmi namáhány. Dochází zde na stykových plochách mezi nástrojem a obrobkem ke složitým fyzikálním a chemickým jevům, v důsledku kterých se nástroj otupuje. [1][5]

Vzniká zde tříska a díky vysokým působícím tlakům také velké množství tepla, které se vyvíjí na ploše hřbetu a čele nástroje. Výsledkem je ztráta původního tvaru břitu a snížení účinnosti řezání. Tím pádem zhoršení kvality povrchu, ztráta požadované tolerance a v neposlední řadě destrukce celého nástroje. [1]

Z těchto důvodů je třeba stav obráběcích nástrojů průběžně kontrolovat. Ve velkosériové výrobě je požadavek na automatické monitorování opotřebení obráběcích nástrojů z důvodů zvýšení výkonnosti, spolehlivosti a životnosti provozu strojů a nástrojů. [1]



1. Opotřebení obráběcích nástrojů

Při obrábění vznikají mechanické a tepelné vlivy, které nepříznivě působí na povrchovou vrstvu břitu nástroje. Nástroj se opotřebovává a tvar pracovních ploch břitu se mění. Toto opotřebení může mít dvě podoby. Může být náhlé (plastická deformace), nebo postupné. Postupné opotřebení můžeme chápat jako nepravidelně opotřebovanou plochu v místě styku ostří nástroje s obrobkem. [2]

U velikosti opotřebení hodnotíme:

VB – opotřebení hřbetu průměrné

VC – opotřebení hřbetu v oblasti špičky

VN – opotřebení hřbetu vrubové

VB_{max} - opotřebení hřbetu maximální

KT – hloubka žlábků opotřebení čela

KB – šířka žlábků opotřebení čela

KL – poloha středu žlábků opotřebení čela

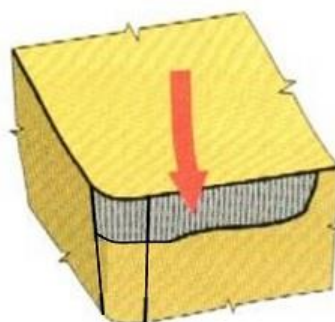
VR – radiální opotřebení špičky

Pro velikost opotřebení můžeme použít vyjádření určitého čísla, které nám bude vyjadřovat úbytek materiálu na hřbetě, nebo čele nástroje. Velikost čísla bude udávána v milimetrech. [2]

1.1 Typy opotřebení - otěruvzdorné

1.1.1 Opotřebení hřbetu nástroje

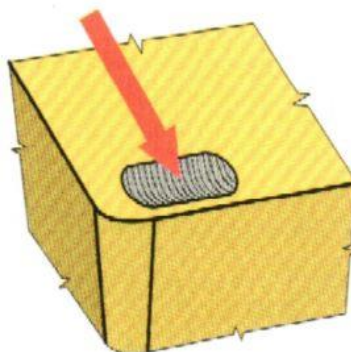
Patří mezi nejčastější způsoby opotřebení. Tato abrazivní forma opotřebení se projevuje na hřbetní ploše břitu. Plochy hřbetu u hlavního ostří, vedlejšího ostří, poloměru špičky a na čelní fasetce jsou zvláště vystaveny působení materiálu obrobku. Stejným směrem se zvětšující opotřebení hřbetu je často považováno za ideální. Příliš velké opotřebení má za následek zhoršení povrchu, nepřesnost rozměrů a zvýšené tření, které vzniká změnou geometrie břitu. Opotřebení hřbetu je všeobecně obvyklým typem opotřebení. [1][4]



Obrázek 1 Opotřebení hřbetu nástroje [3]

1.1.2 Opotřebení ve tvaru žlábků

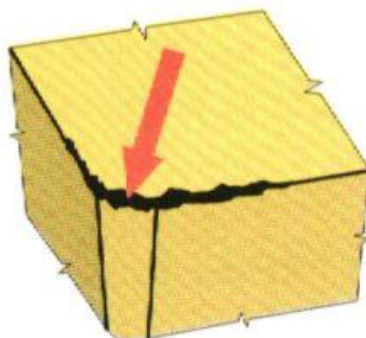
Je způsobeno působením mechanismů difuzního opotřebení a abraze. Žlábků vzniká částečně úběrem rezného nástrojového materiálu, působením tvrdých částic obsažených v materiálu, ale hlavně difúzí v místě břitu s nejvyšší teplotou, tedy v kontaktním místě mezi třískou a materiálem břitu. Velké opotřebení tohoto typu způsobuje změnu geometrie břitu, ovlivnění třísky, zeslabení břitu a jeho následnou destrukci. [1][4]



Obrázek 2 Opotřebení ve tvaru žlábků [3]

1.1.3 Vydrolení ostří

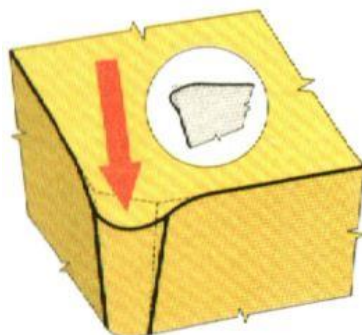
Toto opotřebení je způsobeno špičkami zatížení, při kterých se drobné částice začnou oddělovat z povrchu břitu. Břit se tedy namísto stejnosměrného opotřebení vydroluje. Mezi faktory, které způsobují tento druh opotřebení, patří nejčastěji obrábění přerušovaným řezem, nevhodná volba řezného materiálu nebo nevhodná volba ostří. [1][4]



Obrázek 3 Vydrolení ostří [3]

1.1.4 Plastická deformace břitu

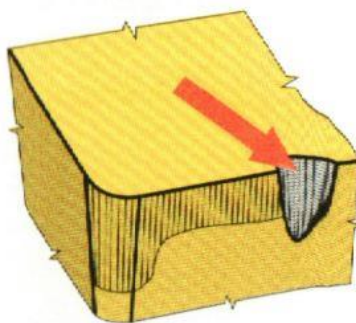
Vzniká především působením kombinace vysokých teplot a řezných tlaků na břit. Proto je důležité dbát na správný řezný materiál, který těmto zatížením odolává a plasticky se nedeformuje. Rozhodujícím faktorem je zde tvrdost za tepla. Toto opotřebení lze zmírnit použitím řezného materiálu s vyšší oteřuvzdorností a správným zaoblením ostří. [1]



Obrázek 4 Plastická deformace břitu [3]

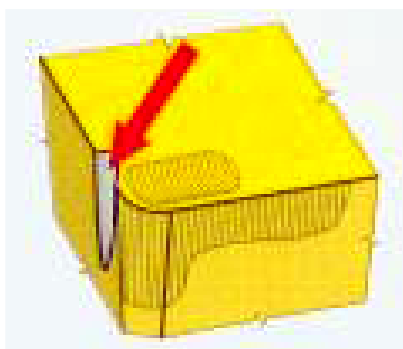
1.1.5 Opotřebení ve tvaru rýhy

Opotřebení ve tvaru rýhy je způsobeno především abrazivním účinkem tvrdé povrchové vrstvy. Může však souviset i s jevem oxidačního opotřebení, kdy vzniká v místě, kde dochází ke kontaktu břitu s bokem třísky přesněji v místě průniku vzduchu do oblasti obrábění. [1]



Obrázek 5 Opotřebení ve tvaru rýhy [3]

Opotřebení ve tvaru rýhy na vedlejším hřbetu je především důsledkem oxidačního opotřebení. Při velkém opotřebení destičky dochází k ovlivnění třísky a může vést až k lomu destičky. [1]



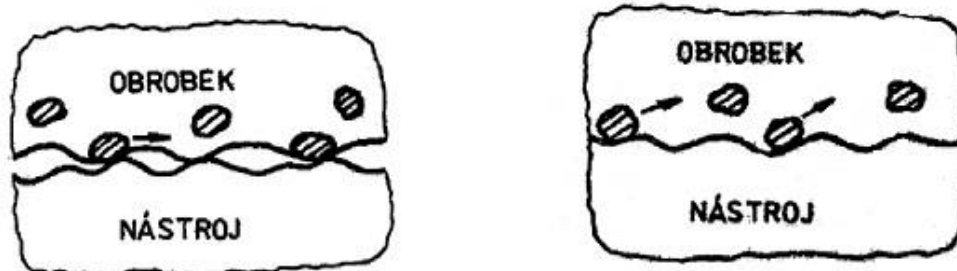
Obrázek 6 Opotřebení ve tvaru rýhy na vedlejším hřbetu [3]

1.2 Hlavní mechanismy opotřebení

Působením zatěžujících faktorů, které pozorujeme při procesu obrábění na břitu nástroje, vznikají mechanismy opotřebení popsané v následujících kapitolách.

1.2.1 Abrazivní opotřebení

Je formou opotřebení, které vzniká působením tvrdých částic obsažených v materiálu obrobku. Tento proces bychom pro zjednodušení mohli přirovnat k broušení, při němž se tvrdé částice dostávají mezi povrch obrobku a povrch nástroje. Jde tedy o odbrušování měkčích částic materiálu nástroje tvrdšími částicemi obrobku. Schopnost břitu odolávat tomuto opotřebení závisí hlavně na jeho tvrdosti. [4][10]



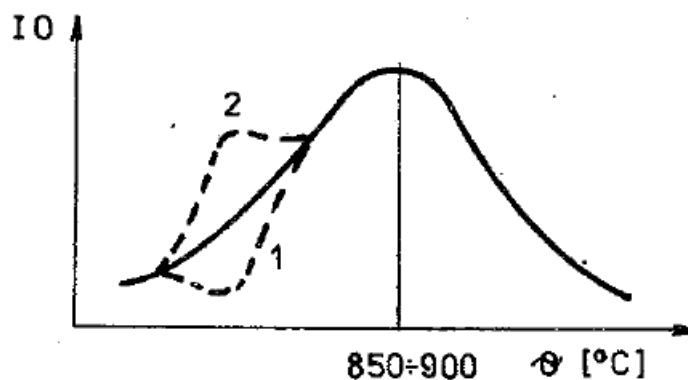
Obrázek 7 Bodový (vlevo) a plošný styk abrazivního otěru [10]

1.2.2 Adhezní opotřebení

Vzniká jak u ocelí tvořících dlouhou třísku, tak rovněž u materiálů tvořících krátkou třísku. Jedná se o průběh, kde se z řezného nástroje vytrhávají částice břitu v důsledku adhezních spojů mezi nástrojem a obrobkem. Při zvýšení teplot řezání se zmenšují předpoklady pro vznik tohoto opotřebení. Jde tedy hlavně o závislost afinity mezi nástrojovým materiálem, materiálem obrobku a tlacích v místě řezu. [10]

V případě tvorby stabilního nárůstku se bude intenzita otěru zmenšovat v důsledku ochrany tohoto nárůstku – viz obr. 8, přerušovaná čára č. 1. [10]

V případě rozpadajícího se nárůstku, v důsledku zvýšené pevnosti částic nárůstku, dojde ke zvýšení intenzity otěru v oblasti, kde se nárůstek tvoří – viz obr. 8, přerušovaná čára č. 2.

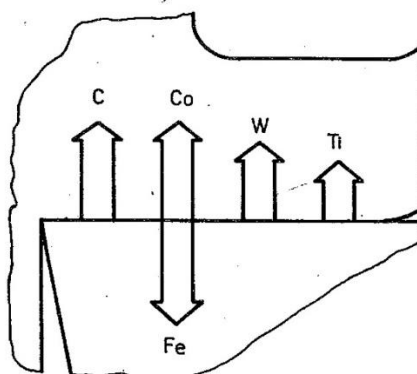


Obrázek 8 Intenzita otěru v závislosti na teplotě [10]

1.2.3 Difúzní opotřebení

Podstatou je přestup materiálu nástroje do obrobku v důsledku difúze. Oproti abrazivnímu opotřebení zde má tvrdost řezného materiálu pouze minimální podíl. Vzniká díky působení chemických vlivů při procesu obrábění. Chemické vlastnosti nástrojového materiálu a jeho afinita vůči materiálu obrobku jsou nejdůležitějšími parametry a zároveň činiteli pro vznik difúzního opotřebení. [4]

U slinutých karbidů nejlépe difundují uhlík, železo a kobalt, hůře potom wolfram a nejobtížněji titan. Železo difunduje do nástroje, zatímco ostatní složky do obrobku – viz obr. 9.



Obrázek 9 Difúze základních složek SK [10]

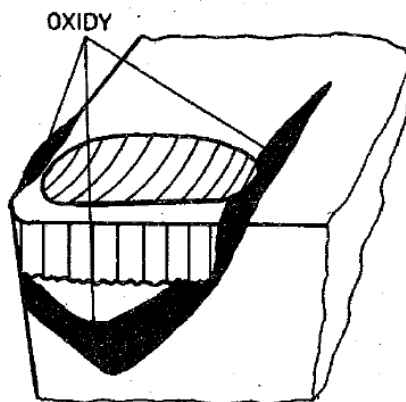
1.2.4 Chemické opotřebení

Podstatou tohoto opotřebení je snadné rozrušování defektních vrstev na stykových plochách nástroje. Tyto vrstvy vznikají v důsledku vzájemného působení materiálu obrobku, nástroje a řezného prostředí. Přičemž tvorba vrstev probíhá:

- Vzájemným působením řezného prostředí a materiálu nástroje.
- Vzájemným působením materiálu nástroje a obrobku a je dána chemickým složením obou stýkajících se materiálů. [10]

Nové vrstvy vzniklé v důsledku působení materiálu nástroje a prostředí se tvoří na:

- Stykových plochách nástroje.
- V blízkosti stykových ploch – viz obr. 10 [10]



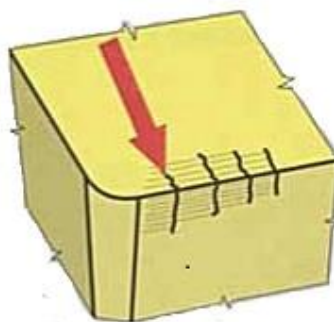
Obrázek 10 Nově vznikající vrstvy [10]

1.2.5 Lom

Je typem opotřebení, který má ve většině případů termomechanické příčiny. K lomu většinou dochází při zatížení řeznými silami a kolísáním teplot. Tvrdost materiálu a vysoké posuvy, nebo příliš tvrdý nástrojový materiál, mohou být příčiny tohoto opotřebení. V opačném případě příliš měkký materiál za vysokých teplot. [4]

1.2.5.1 Hřebenovité trhlinky na ostří nástroje

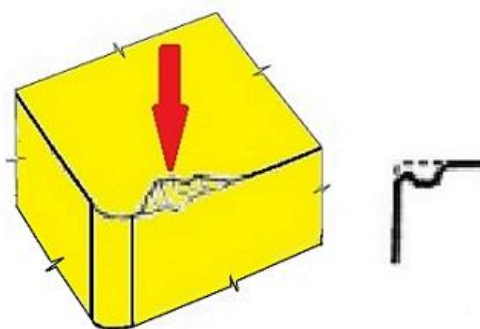
Vznik trhlinek je formou opotřebení, které vzniká tepelnými šoky. Proces frézování má na toto opotřebení zvláště velký vliv a to právě díky změně teplot. Trhlinky se tvoří kolmo na ostří a částice řezného materiálu se mohou mezi jednotlivými trhlinkami vylamovat a způsobit tak náhlý lom břitu. Použití chladicích kapalin se v tomto případě nedoporučuje z důvodu zvýšení rozdílu teplot při záběru břitu do materiálu obrobku a při výstupu z něj. [1]



Obrázek 11 Hřebenovité trhlinky na břitu nástroje [3]

1.2.5.2 Únavový lom nástroje

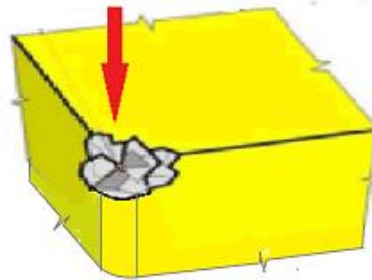
Únavový lom je z velké většiny následek mimořádně velkých změn velikosti řezných sil. Tento druh opotřebení vzniká součtem měnících se různých zatížení, kdy vřezávání nástroje do materiálu obrobku a změna velikosti a směru působení sil řezání mohou být pro břitovou destičku příliš náročné a dojde k její destrukci. Lomové plochy vznikají paralelně s ostřím. [1]



Obrázek 12 Únavový lom nástroje [3]

1.2.5.3 Lom břitu nástroje

Představuje konec funkčnosti řezného elementu. Za každých okolností by se lomu břitu mělo zabránit. Totální lom je často velmi nebezpečný a je nutné ho v každém případě považovat za konec trvanlivosti. [1]



Obrázek 13 Lom břitu nástroje [3]

Vyjmenovali jsme si zde nejdůležitější formy a mechanismy opotřebení, na které je nutné nahlížet jako na příčinu způsobující rychlé opotřebení a následný lom destičky. Proto jim musíme bezpodmínečně předcházet a hledat optimální řešení pro daný druh obrábění. [4]

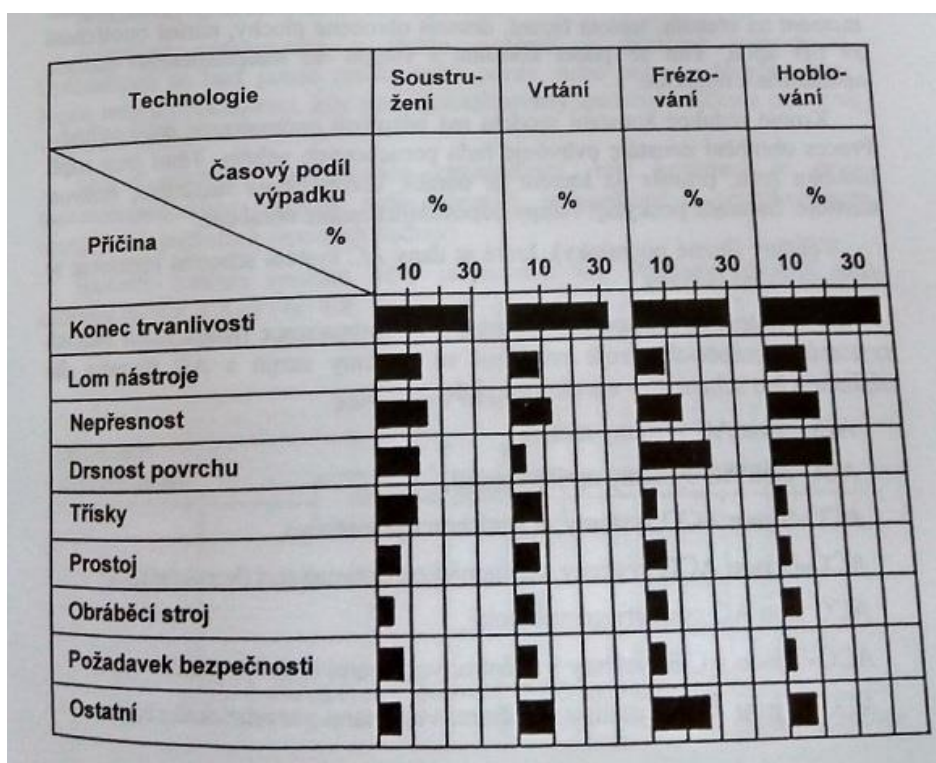
V návaznosti na uvedené faktory, po zavedení monitorování stavu opotřebení nástrojů je výrobce schopen mnohonásobně zvýšit produktivitu podniku, optimalizaci procesu obrábění a tím pádem snížit celkové výrobní náklady.

2. Monitorování opotřebení a destrukce obráběcích nástrojů

2.1 Úvod a podstata monitorování

Monitorování stavu obráběcího nástroje je významnou metodou pro optimalizaci řezného procesu. Díky ní kontrolujeme stav nástroje během obrábění a po jeho ukončení. Kontrolou stavu nástroje rozumíme kontrolu velikosti opotřebení, nebo destrukce. Tyto důsledky řezného procesu mohou výrazně ovlivnit kvalitu a rozměrové nepřesnosti obrobku. Díky monitorovacím systémům je obsluha stroje upozorněna a je tak zabráněno nežádoucím výsledkům při obrábění.

Opotřebení a lom nástroje společně představují rozhodující faktory výpadků procesu řezání. Proto je monitorování stavu nástroje velmi významné i z ekonomického hlediska. Kromě sledování stavu břitů je významné i monitorování celkové destrukce břitů, díky kterému lze zabránit havárii stroje a dalším ztrátám. Viz obr. 14. [6] [1]



Obrázek 14 Technické příčiny nevyužití pracovního času [6]



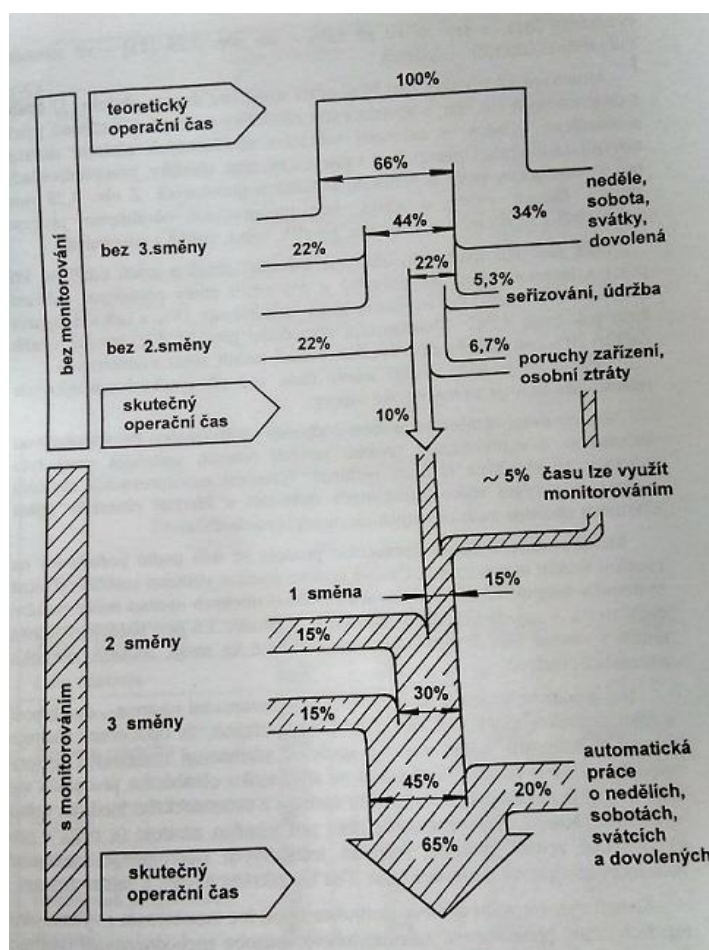
Moderní monitorovací systémy se nezabývají pouze sledováním opotřebení, ale umožňují také data shromažďovat, vyhodnocovat a porovnávat. Mohou tak na základě dat řídit a upravovat řezné podmínky (měnit řeznou rychlost, rychlost posuvu, řídit přísun chladicího média) a mohou tak ukončit právě probíhající operaci, zabránit tak havárii stroje a vzniku škod. Tyto systémy slouží pro monitorování obráběcího procesu jako celku a monitorovací systém je složen z několika částí. [7]

Monitorovací metody měření mohou být ovlivněny následující faktory:

- Odchod třísek z místa řezu (navíjení na obrobek i nástroj, zničení nebo poškození snímače)
- Procesní kapaliny
- Vibrace a chvění stroje
- Doba odezvy, která bývá dlouhá
- Nízká citlivost a měnící se fyzikální vlastnosti materiálu obrobku
- Metody měření nejsou aplikovatelné pro měnící se podmínky řezání [1]

2.2 Monitorování a jeho optimalizace

V případě strojů s programovým řízením, které jsou vybaveny dostatečnými zásobníky nástrojů, umožňují monitorovací systémy práci strojů bez dozoru obsluhy. V těchto případech je možné dosáhnout výrazného zvýšení efektivního výrobního času, a sice o 10% až 65% ve srovnání s obráběním bez těchto systémů. Viz obr. 15. [6] [1]



Obrázek 15 Využitelnost teoretického operačního času [6]

Z obr. 15 je také zřejmé, že stroje vybavené monitorovacím systémem, dostatečnými zásobníky nástrojů, automatickou výměnou nástrojů, možností jejich nahrazení za nové a v neposlední řadě manipulace se samotnými obrobky, umožňují, oproti strojům bez monitorování, automatickou práci o nedělích, svátcích a dovolených. Dále můžeme uvažovat úsporu času při ztrátách způsobených seřizováním strojů a jejich údržbou nebo například poruchami zařízení. [6]



2.3 Přímé metody měření opotřebení

Přímé metody jsou těžko aplikovatelné, jelikož plochy, které se v důsledku obrábění otupují, jsou nedostupné pro měřicí přístroje. Z toho důvodu je nutné obrábění přerušit, což ovlivňuje charakter otupení. Ve většině případů se musí nástroj sejmout z nožového držáku, což přináší změny podmínek obrábění při dalším upnutí a nastavení. Mezi přímé metody patří:

- Metoda váhová (hmotnostní)
- Metoda radioaktivních izotopů (radioizotopová)
- Metoda mikrometrická
- Metoda optická (stínová)

2.3.1 Metoda váhová

Míru opotřebení pro nás zde představuje úbytek hmotnosti řezného břitu. Tato metoda se nedá použít přímo při samotném procesu obrábění na obráběcím stroji. Je poměrně přesná a velikost opotřebení nám zde představuje váhový rozdíl oproti neopotřebovanému břitu. Problém může ovšem nastat v případě, že nejsou zvoleny optimální podmínky řezného procesu a na břitové destičce vzniká nárůstek. V tomto případě se nedá s úplnou přesností určit velikost opotřebení a výsledky jsou zkreslené. Tato metoda se používá výhradně u nástrojů s vyměnitelnými břitovými destičkami. [1]

Vzorec:
$$\Delta M = M1 - M2 \text{ [g]} \quad (2.1)$$

Kde: ΔM – je úbytek hmoty [g]

$M1$ – je hmotnost destičky před otupením [g]

$M2$ – je hmotnost destičky po otupení [g] [1]



2.3.2 Metoda radioaktivních izotopů

Je metodou, která určuje váhový úbytek břitové destičky v závislosti na čase. Umožňuje určit váhové úbytky v řádech až 10^{-3} mg. Proto ji v této kategorii považujeme za nejpřesnější. Využívá toho, že většina opotřebovaného materiálu břitu odchází třískou, zbytek zůstane na obrobené a neobrobené ploše, nebo odletí do ovzduší. [1]

Radioaktivním článkem je materiál nástroje a jeho aktivaci dosáhneme dvěma způsoby. Zavedením radioizotopu již při hutnickém procesu, nebo ozáření nástroje proudem neutronů v reaktoru.

Měření probíhá následovně. Odebereme stanovené množství třísky aktivním nástrojem. Poté se odebere vrstva z obrobené a neobrobené plochy řezu pomocí neaktivního nástroje. Oba vzorky se poté vloží do měřicího bloku, který je složen ze zkumavek a Geiger-Mullerových nebo scintilačních počítačů. Na základě aktivity třísek $I_{tř}$ (počet impulzů za minutu) je možné určit množství nástrojového materiálu, který ulpěl na tříске, ploše řezu a obrobené ploše. Pro stanovení tíhového úbytku je nutné znát specifickou aktivitu i_n v impulzech za minutu stanovenou stejným způsobem. [8]

Vzorec:
$$i_n = \frac{I_n}{M_n} \quad (2.2)$$

Kde: i_n - specifická aktivita nástroje

I_n - aktivita nástroje

M_n - zkoumané množství nástrojového materiálu

Pro hmotnost opotřebovaného materiálu platí [8]

Vzorec:
$$m_{\text{mat}} = \frac{I_{\text{tr}}}{i_n} \quad (2.3)$$

Kde: m_{mat} - hmotnost opotřebovaného materiálu

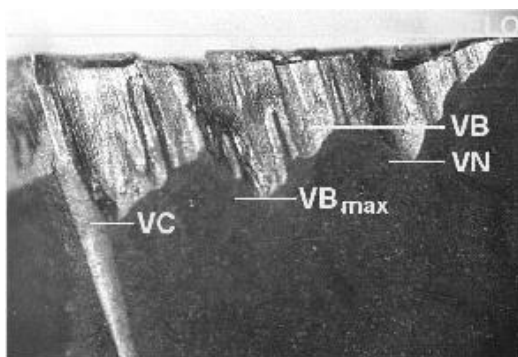
I_{tr} - aktivita třísek

Tato metoda patří mezi velmi zdraví nebezpečné a je při ní nutné dbát přísných bezpečnostních podmínek. [1]

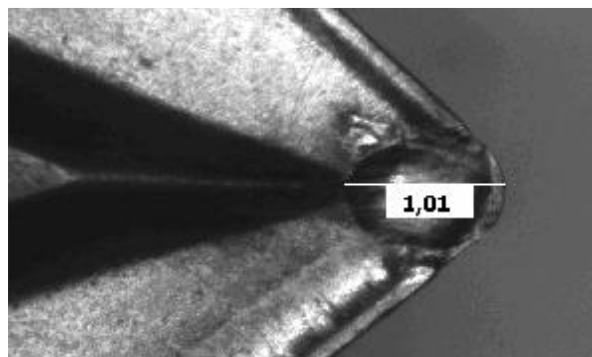
2.3.3 Mikrometrická metoda

Při použití této metody určujeme velikost opotřebování pomocí přímého měření lineárních rozměrů. Ty zjišťujeme nejčastěji za pomoci dílenských mikroskopů s křížovým stolem. Pro měření používáme číselníkové úchylkoměry, komparátory, apod. Tuto metodu nelze použít přímo při obrábění. [8]

Moderní software umožňují vyhodnocovat velikost opotřebování přímo online na mikroskopu, je však nutné nejprve zkalibrovat optiku na dané zvětšení. Kóty lze zaznamenávat přímo do obrazu, který lze uložit. [1]



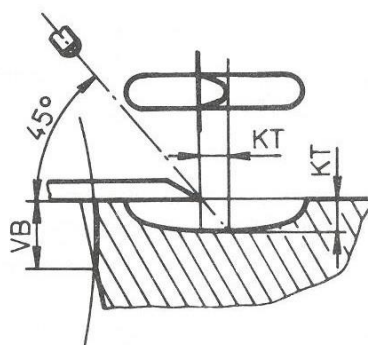
Obrázek 16 Opotřebování na hřbetě nástroje [1]



Obrázek 17 Měření opotřebování pomocí software IMPOR [1]

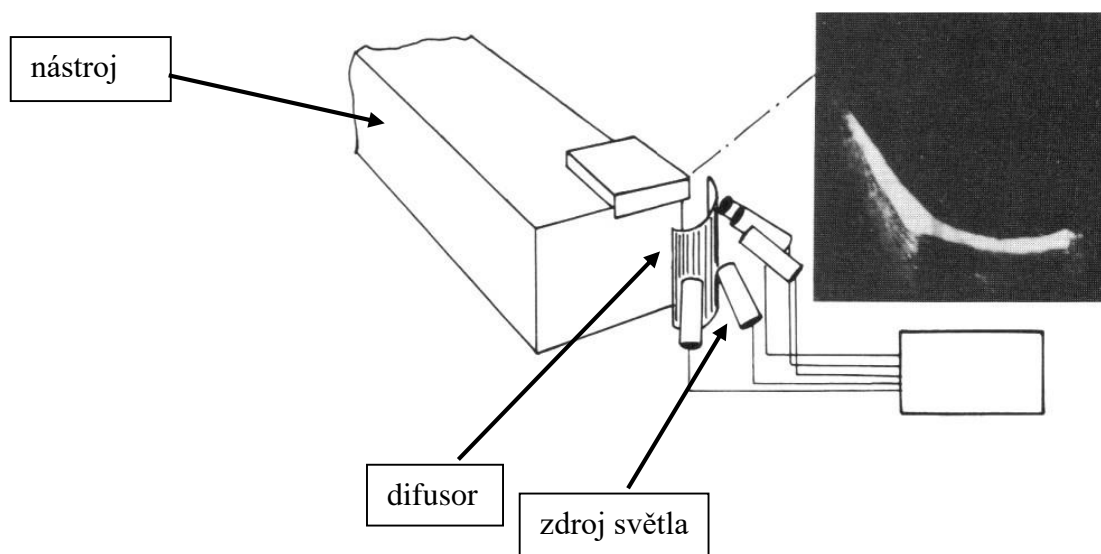
2.3.4 Optická (stínová) metoda

Umístíme-li ostrou hranu na čelo nástroje a osvítíme ji paprskem světla pod úhlem 45° , pak vzdálenost tečny ke stínu je rovna hloubce žlábků KT. Můžeme jí využívat tedy pro měření opotřebení ve tvaru žlábků.



Obrázek 18 Měření opotřebení ve tvaru žlábků [1]

Dále tuto metodu můžeme použít pro měření opotřebení na čele nástroje. Na čele nástroje je pomocí difusoru vytvořena charakteristická mřížka, kterou snímáme pomocí kamery, přičemž deformace mřížky souvisí s vytvářením kráteru na čele nástroje. [9]



Obrázek 19 Způsob osvětlení čela nástroje [1]

2.4 Metody monitorování opotřebení

Pro monitorování velikosti opotřebení se používají metody PŘÍMÉ a NEPŘÍMÉ. [1]

2.4.1 Přímé metody

2.4.1.1 Metoda nanesené odporové vrstvy

Funguje na principu změny elektrického odporu stykových ploch mezi obrobkem a nástrojem v závislosti na velikosti opotřebení. Je to tedy odporový obvod vytvořený na hřbetu nástroje, kde za pomoci změny odporu dokážeme monitorovat stav opotřebení. Určitou nevýhodou této metody je ovlivnění snímače změnou teploty při procesu obrábění. [11] [5]

2.4.1.1.1 Metoda odporové vrstvy s integrovanými senzory opotřebení

Princip spočívá na měření velikosti odporu mezi řeznou hranou a obráběným materiálem. Speciálně upravená břitová destička je upnuta v nástrojovém držáku, který je vybaven kontakty pro vedení elektrického proudu a společně s připojeným přístrojem pro měření elektrického odporu tvoří uzavřený okruh.

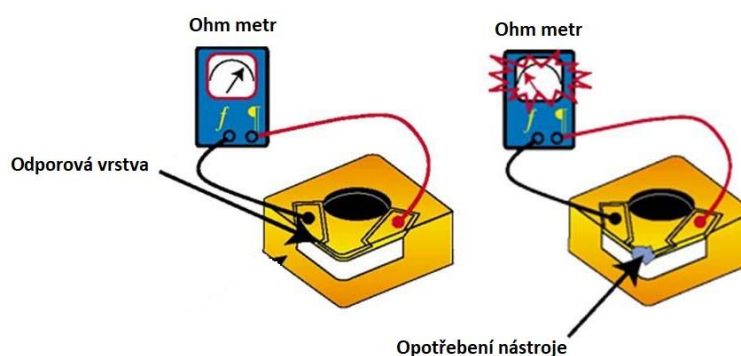


Obrázek 20 Břitová destička s nanesenou odporovou vrstvou [12]

Elektrický proud je veden povlakem, kterým je opatřena řezná hrana břitové destičky, která se v průběhu obrábění opotřebovává a tím pádem se ztenčuje tloušťka povlaku, díky tomu roste odpor a v případě úplného přerušení vrstvy bude hodnota odporu nekonečná, tedy neměřitelná. [12]

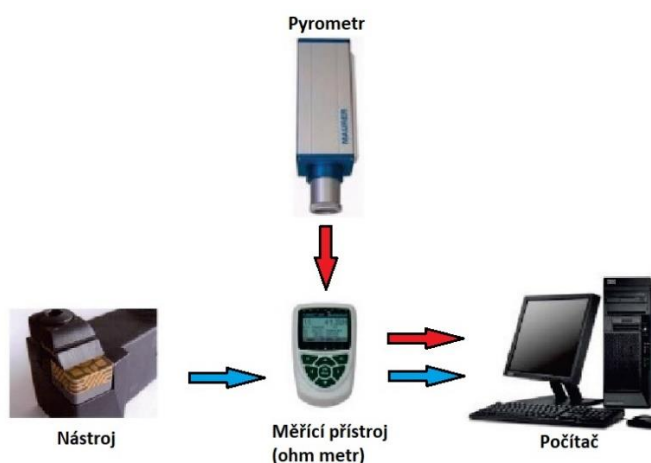


Obrázek 21 Nástrojový držák s kontakty - vlevo bez destičky, vpravo s destičkou [12]



Obrázek 22 Princip metody odporové vrstvy [12]

K ohm metru je většinou připojen pyrometr pro měření teploty na břit nástroje společně s počítačem pro zpracování všech naměřených hodnot.



Obrázek 23 Kompletní schéma metody [12]

Tato metoda je vhodná pro CNC stroje, flexibilní výrobní systémy a jiné typy automatizovaných výrobních linek. Tato metoda otevírá široké možnosti pro její jednoduchost a snadné požití. [12]

2.4.1.2 Pneumatická metoda

Je relativně jednoduchá a spolehlivá metoda, která měří úbytek břitové destičky ve směru kolmém k ploše řezu, nebo ve směru radiálním pneumatickým způsobem. Za pomoci snímače pro měření úbytku břitu ve směru kolmém k ploše řezu (viz Obr. 24) lze pro nůž s úhlem nastavení $H_r = 90^\circ$ odvodit vztah: [5]

$$\text{Vzorec: } VB = VB_o + K_m * VB_o^{0,81} \quad (2.4)$$

$$VB_o = (X_p - (L_p * f / \pi * D_o) - X_m) * (1 / \text{tg } \alpha_n) \quad (2.5)$$

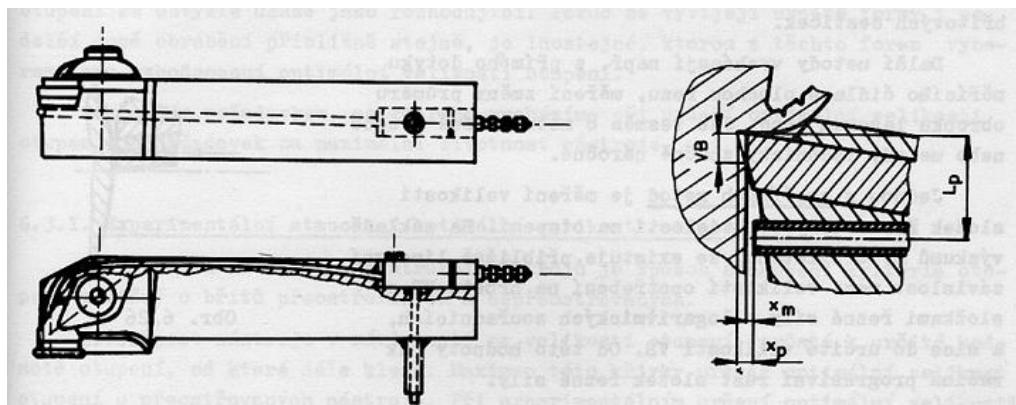
Kde: D_o - průměr obráběné plochy v mm

K_m - konstanta daná konstrukcí měřidla

f - posuv v mm

α_n - úhel hřbetu v $^\circ$

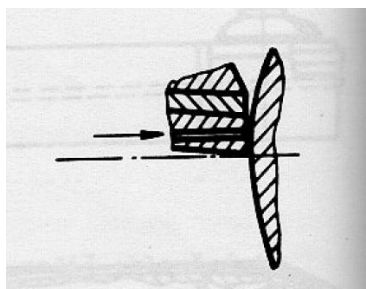
X_m - tato hodnota se určuje pro změřený tlak vzduchu z cejchovní křivky daného měřidla



Obrázek 24 Pneumatická metoda [5]

Pro účely měření používáme systém klapka – tryska se zvětšeným rozsahem, jelikož klasické systémy klapka – tryska mají příliš strmý tvar cejchovní křivky. [5]

Tato metoda prošla i určitou modifikací, kde je měřící tryska umístěna přímo ve výměnné břitové destičce (viz Obr. 25) a tím odpadá korekce daná vzdáleností L_p , kterou využíváme v předchozí metodě. Při použití této metody je však zapotřebí výroby speciálních břitových destiček. [5]

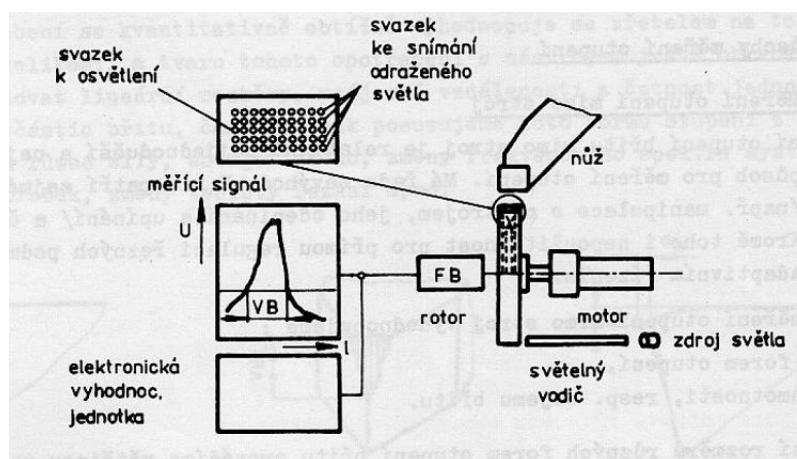


Obrázek 25 Metoda s tryskou v břitové destičce [5]

2.4.2 Nepřímé metody

2.4.2.1 Měření pomocí lupy s mikrometrickým šroubem

Využívá speciálního zařízení, které se v době, kdy se neobrábí, přesune k břitu nástroje a provede měření. Tato zařízení pracují většinou na principu optickém s elektronickým vyhodnocováním – např. TV systémem. Jako příklad lze uvést zařízení pracující na opticko-elektronickém principu – viz obr. 26.



Obrázek 26 Opticko-elektronický princip monitorování [5]

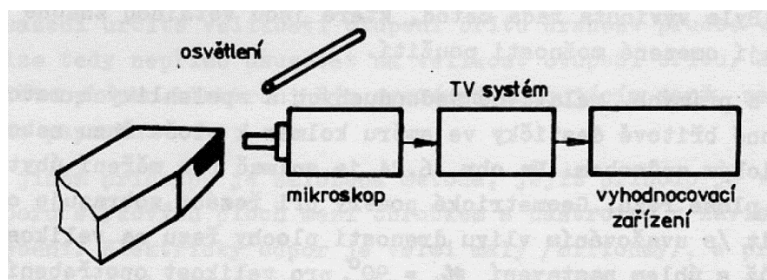
Kde: **FB** – fotobuňka

U – fotoelektrické napětí

Světlo je zde vedeno od světelného zdroje přes světelný vodič skleněnými vlákny, která jsou uložena v rotoru, a dopadá na plochu hřbetu. Zde sejmuté odražené světlo je vedeno středem rotujícího kotouče na fotobuňku. V závislosti na rychlosti otáčení a velikosti opotřebené plochy břitů bude určen časový průběh fotoelektrického napětí U .

Pro provozní použití je vhodné toto zařízení umístit přímo na stroj, např. pomocí otočného ramene. Jedná se o zařízení nákladné. [5]

Jako další v této kategorii, tedy zařízení, které se skládá z mikroskopu a elektronického zařízení je možné uvést – viz obr. 27, přístroj, jehož nejdůležitější složkou je televizní systém.



Obrázek 27 Opticko-elektronické zařízení s TV systémem [5]

Obraz plochy břitů je sejmuto mikroskopem a TV systémem, kde každá snímací řádka systému TV ukazuje šířku opotřebenosti na hřbetě v příslušném místě měření. [5]

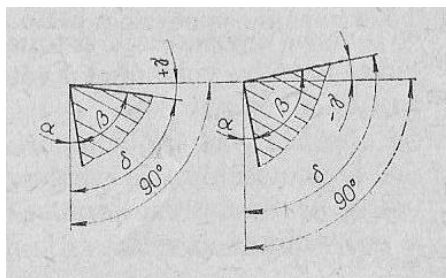
Tento systém pokládáme za vysoce přesný a spolehlivý, avšak velmi ekonomicky náročný.

2.4.2.2 Měření pomocí síly řezání a krouticího momentu

Při tomto způsobu měření vycházíme převážně z výkonu elektromotoru obráběcího stroje. Tuto metodu je vhodné používat pro měření sil působících mezi nástrojem a obrobkem. Tímto způsobem dokážeme předejít nadměrnému zatížení nástroje, které by vedlo k jeho poškození, nebo změně geometrie.

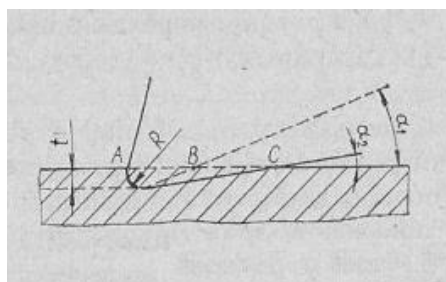
➤ Geometrie nástroje

Velikost síly, která působí mezi břitem nástroje a obrobkem je závislá na geometrii břitu nástroje. Zejména na úhlu β , čím je úhel větší, tím je větší odpor oddělování třísky. [13]



Obrázek 28 Geometrie břitu – úhel β [13]

Dále můžeme zmínit úhel hřbetu α , který značně ovlivňuje velikost tření, které vzniká pohybem hřbetu nástroje po řezné ploše. Čím je tento úhel větší, tím je větší styková plocha a tím větší je také tření. [13]



Obrázek 29 Geometrie břitu – úhel α [13]

Další důležitý úhel, který ovlivňuje síly mezi nástrojem a obrobkem je úhel nastavení hlavního břitu K , který taktéž ovlivňuje velikost řezného odporu. [13]

Tato metoda využívá skutečnosti, že s rostoucí velikostí opotřebení roste i řezný odpor. Díky změně opotřebení se změní i řezná síla, což vede k změně krouticího momentu, díky které můžeme vyhodnotit opotřebení, nebo celistvost nástroje.

Důležitým parametrem je zde elektrický proud v obvodu hnacího motoru, který je přímo úměrný krouticímu momentu.



Výhoda této nepřímé metody je v jednoduchosti provedení, ekonomické nenáročnosti a možnosti použití u veškerého obrábění. Nevýhodou je malá citlivost na změny opotřebení nástroje a slouží tak spíše pro určení katastrofického opotřebení nástroje. [2]

2.4.2.3 Monitorování pomocí tepla obráběcího nástroje

Tato metoda je založena na principu měření teploty, nejčastěji v kritickém místě na nástroji, nebo obrobku. Pomocí naměřené teploty můžeme monitorovat stav nástroje, nebo například i vhodnost obráběcích podmínek.

Kritériem opotřebení je tedy intenzita tepla v oblasti řezu. Můžeme ji měřit metodou průtoku tepla v nástroji, ten je definován teplotním rozdílem dvou bodů tělesa nástroje v blízkosti řezných hran. Při této metodě je potřeba speciálních zařízení. [14]

Dalším možným způsobem může být monitorování teploty v okolí řezu, při kterém využíváme metody založené na bezkontaktním měření teploty termokamerou. Nejlepším řešením tohoto měření je trvale upevněná termokamera, která je vhodně zaostřena na okolí řezu, nejlépe pak na samotný břit nástroje. Pravidelně poté pořizuje termální fotografie, nebo videa. Výsledky zaznamenané termokamerou jsou následně zaznamenány do počítače a vyhodnoceny vhodným softwarem. [14]

Cílem této metody je měření teploty v oblasti břitu nástroje, kde dosahuje nejvyšších teplot a zamezení tak nadměrnému opotřebení nástroje.

➤ **Teplu vzniklé při obrábění**

Většina operací, které jsou zaměřené na odebrání třísky, mají za následek přeměnu práce na teplo. Vzniklé teplo působí na řezné vlastnosti nástroje, ovlivňuje velikost tření atd.

Zdroje vzniku tepla můžeme rozdělit do těchto oblastí:

- Oblast střižné plochy
- Oblast čela nástroje
- Oblast hřbetu nástroje



Množství tepla, které vzniká při řezání, se musí rovnat množství tepla odvedeného z oblasti řezu. Musí tedy nastat tepelná bilance.

$$\text{Rovnice tepelné bilance: } Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_t + Q_o + Q_n + Q_p \quad (2.6)$$

Kde: Q_1 [J] – teplo vzniklé deformací v oblasti střižné plochy

Q_2 [J] – teplo vzniklé třením třísky v oblasti čela nástroje

Q_3 [J] – teplo vzniklé třením v oblasti hřbetu nástroje

Q_t [J] – teplo pohlcené třískou

Q_o [J] – teplo pohlcené obrobkem

Q_n [J] – teplo pohlcené nástrojem

Q_p [J] – teplo pohlcené okolím řezu [15]

Množství tepla pohlcené okolím řezu je závislé hlavně na tom, zda jsou při procesu používány provozní kapaliny. Tento způsob monitorování není vhodný při používání procesních kapalin, jelikož kapalina proces měření znesnadňuje. [14] [10]

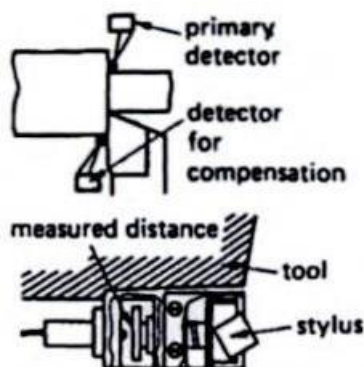
2.4.2.4 Měření mezery mezi obrobenou plochou a břitem nástroje

Kromě již výše uvedených, lze použít i následující metody. Tyto metody jsou založeny na změně velikosti vzdálenosti mezi obrobenou plochou a bodem na ostří břitu nástroje.

Tuto metodu můžeme provádět třemi hlavními způsoby:

- Elektricky
- Ultrazvukem
- Opticky

Elektricky: pomocí snímače, který se nachází na hlavním detektoru a je spojen s povrchem obrobku. Pokud opotřebení nástroje roste, snímač se posouvá směrem k ose nástroje a výstup dává informace o opotřebení. Kompenzační detektor slouží pro vymezení chyb způsobených teplotou řezání, nebo řeznými silami. [16]



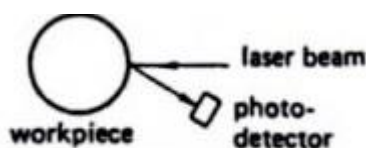
Obrázek 30 Elektrický způsob měření mezery mezi obrobkem a nástrojem [16]

Ultrazvukem: využívá ultrazvukových impulsů, které jsou vysílány směrem k obrobku, od něj odraženy zpět a detekovány přijímačem. Čím kratší je čas odrazu těchto impulsů, tím je velikost opotřebení větší.



Obrázek 31 Měření mezery pomocí ultrazvuku [16]

Opticky: soustava, která je uchycena na nožové hlavě, skládající se z laseru, čočky a fotodetektoru. Paprsek HeNe laseru je veden na obrobený povrch a jeho obraz pod úhlem 110° dopadá na fotodetektor. Toto měření je tedy založeno na principu pohybu obrazu na fotodetektoru, který vyjadřuje opotřebení nástroje, které se projeví změnou od nastaveného úhlu. Bod laseru, který je opticky zvětšen se nachází 0,4mm pod břitem nástroje. [16]



Obrázek 32 Měření mezery pomocí HeNe laseru [16]

2.4.2.5 Měření zvuku

Metoda využívající vyhodnocování pomocí mikrofону, který se umísťuje v blízkosti nástroje, např. na nožovou hlavu. Nevýhodou této metody je akustický hluk, který vzniká v prostředí, kde je stroj umístěn, proto je metoda vhodnější při použití na strojích opatřených ochrannými kryty. Výhodou této metody je v porovnání s ostatními metodami, ekonomická nenáročnost a díky malým rozměrům měřicího senzoru není ovlivněn proces obrábění.

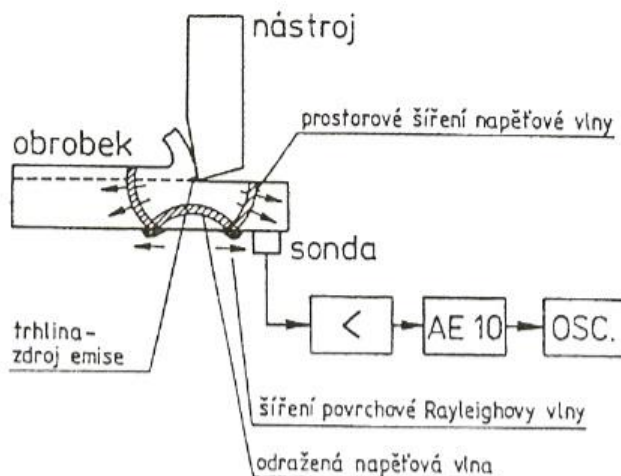
Může být použito např. i akcelerometru, který je umístěn též v blízkosti nástroje a snímá zvukové vibrace vznikající třením hřbetu nástroje o obrobek. Výsledné hodnoty nám dávají informace o opotřebení nástroje. [18]

2.4.2.6 Monitorování akustických emisí

Tato metoda slouží k vyhodnocování zvukových vln vznikajících při obrábění. Tření nástroje o obrobek je nejvhodnějším zdrojem zvukových vln pro měření akustických emisí. [17]

Metoda se používá pro měření zvukové vlny, která je způsobena náhlým uvolněním energie a prochází materiálem. Velkou výhodou této metody je frekvenční rozsah, zvláště v oblasti ultrazvuku, který eliminuje vliv prostředí a vlastní kmity stroje, které leží právě ve slyšitelném pásmu zvukového spektra. Po zpracování signálu získáváme charakteristiku impulsů, amplitud, frekvence a dalších hodnot, které jsou vhodné pro sledování nástroje.

Druhy signálů akustických emisí rozdělujeme na dva základní: kontinuální (signály produkující ostrý, nebo opotřebovaný nástroj) a impulsní (od vznikajících třísek, nebo zlomeného nástroje). [17]



Obrázek 33 Schéma zařízení pro měření akustických emisí [17]

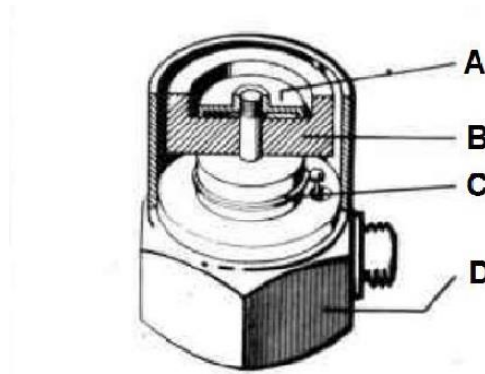
Metoda monitorování akustických emisí je jednou z perspektivních metod, která je neustále vyvíjena a vylepšována.

2.4.2.7 Monitorování prostřednictvím vibrací

Tato metoda spočívá ve vzájemném působení mezi vibracemi obráběcího stroje a opotřebováním nástroje. Vibrace jsou způsobeny opotřebováním nástroje, čím více je nástroj opotřebovaný, tím je vyvolaná vibrace vyšší. Problémem se v tomto případě stávají ostatní vibrace, které při procesu obrábění vznikají, takzvané „cizí“ vibrace, které považujeme za rušivý účinek. Frekvenční rozsah musí být zvolen podle metody obrábění. [8] [1]

➤ **Pomocí akcelerometru**

Pomocí piezoelektrického akcelerometru snímajícího vibrace. Nevýhodou je ovlivnění okolními vibracemi a hlukem.



Obrázek 34 Schéma piezoelektrického akcelerometru [19]

A – předpínací pružina, B – kmitající hmota, C – piezoelektrická destička, D - základna

➤ **Pomocí kyvadla**

Opotřebení je hodnoceno podle útlumu vibrací generovaných úderem pomocí kyvadlového kladívka. Pro snímání vibrací používáme tenzometry. Výhodou této metody je, že není závislá na řezných podmínkách.

➤ **Pomocí využívání kolísání otáček vřetene**

Opotřebení nástroje je vyhodnocováno především z oscilace řezné rychlosti, nebo otáček vřetene. Tato metoda je vhodná především pro identifikaci lomu nástroje. [1]



3. Závěr

Monitorování opotřebení a destrukce obráběcího nástroje je jednoznačně velmi důležitou částí výroby. Výrazně napomáhá ovlivnit jak kvalitu a rozměrové nepřesnosti výrobků, tak výpadky obráběcího procesu. Je tedy velmi významná i z ekonomického hlediska a přináší podniku pozitivní výsledky v hospodárnosti výroby. Moderní monitorovací systémy jsou vhodné hlavně pro velkosériovou výrobu, jelikož napomáhají k optimalizaci řezných podmínek a podílí se tak na zkrácení času jednotlivých operací.

Za hlavní nevýhodu používání těchto systémů můžeme považovat vysoké nároky na kvalifikaci jejich obsluhy. Obsluha musí mít dostatečné znalosti pro vhodné nastavení limitů obráběcího procesu, znalosti o používaném softwaru a také zkušenosti s obráběcím centrem, na kterém monitorování probíhá. Další nevýhodou se jeví vysoké pořizovací náklady.

Monitorování obráběcího procesu představuje jednu z oblastí, kde jsou však stále značné rezervy. Klíčovou oblastí je monitorování opotřebení a destrukce obráběcího nástroje. Přesto, že se v této oblasti hledají a realizují různé metody, nelze hovořit o tom, že tato oblast obrábění je vyřešena. Práce na monitorování opotřebení a destrukci obráběcího nástroje stále pokračují.

Bakalářská práce neobsahuje veškeré existující metody monitorování opotřebení a destrukce nástroje, ale je zaměřena na metody, které se v provozu běžně používají a jsou zaručené. Tato práce by tak mohla vytvářet vhodný podklad pro rozšíření v diplomové práci, která by se mohla soustředit i na ostatní metody, které jsou stále ve vývoji a podrobněji analyzovat tuto oblast obrábění.

Závěrem lze říci, že monitorování opotřebení je výrazným usnadněním provozu obrábění, napomáhá ke zvýšení efektivity obráběcího procesu a v současné době se již dostává do základní výbavy většiny moderních obráběcích center.



Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] ČEP, R., BRYCHTA, J., NOVÁKOVÁ, J., PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II - 1. díl* [online]. [cit. 2017-12-02] Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf
- [2] KRŮŽ, R., VÁVRA, P. *Strojírenská příručka. 7. svazek*, 1. vydání Praha: Scientia, 1996. 212s. ISBN 80-7183-024-0.
- [3] Zdroj obrázků: studijní materiál – *Opotřebenění nástroje*. [online]. [cit. 2017-12-05] Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz>
- [4] AB SANDVIK COROMAT-SANDVIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění – kniha pro praxe*. KUDELA, M. 1.vyd. Praha: Scientia 1997 ISBN 91-972299-4-6
- [5] MÁDL, J. *Experimentální metody v teorii obrábění*. ČVUT v Praze, 4. vydání, 1988
- [6] MÁDL, J., KVASNIČKA, I. *Optimalizace obráběcího procesu*. 1. vydání. Praha: ČVUT, 1998
- [7] DIMLA, E. *Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations*. 2000. vol. 40, issue 8, [online]. [cit. 2017-12-02] Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695599001224?via%3Dihub>
- [8] PŘIKRYL, Z., MUSÍLKOVÁ, R. *Teorie obrábění*. SNTL Praha, 1982.
- [9] ČEP, R., PETRŮ J. *Experimentální metody v obrábění*. ISBN 978-80-248-2533-5. 2011



- [10] MÁDL, J. *Teorie obrábění*. Ediční středisko ČVUT. 1990
- [11] ŽIŽKA, J. *Použití akustické emise ke sledování stavu řezného nástroje*. Liberec, 2003. ISBN 80-7083-687-1
- [12] SADÍLEK, M., KRATOCHVÍL, J., PETRŮ, J., ČEP, R., ZLÁMAL, T., STAČENKOVÁ, D. *Cutting tool wear monitoring with the use of impedance layers*. ISSN 1848-6339. [online]. [cit. 2017-12-06] Dostupné z: http://dspace5.vsb.cz/bitstream/handle/10084/106283/tv_21_2014_3_639_644.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [13] MAREK, V. *Geometrie břitu obecně*. [online]. [cit. 2017-12-12] Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/geometrie-britu-obecne/>
- [14] *Měření opotřebení nástrojů*. VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014.[online]. [cit. 2017-12-07] Dostupné z: http://home1.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_05.pdf
- [15] ŘÍČKA, J., BULLA, V. *Technologie obrábění*. SNTL, 1979.
- [16] CHO, H. *Opto-mechatronic systems handbook: techniques and applications*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2003, ISBN 0849311624
- [17] ŽIŽKA, J. *Použití akustické emise ke sledování stavu řezného nástroje*. Liberec: TU Liberec 2003, ISBN 80-7083-687-1
- [18] *Akustická emise*. Retage 2015. [online]. Dostupné z: [http://retegate.com/Akusticka_emise_\(AE\)](http://retegate.com/Akusticka_emise_(AE))



- [19] SERRIDGE, M., TORBEN, R. *Piezoelectric accelerometer and vibration preamplifier handbook*. 1987. [online]. [cit. 2017-12-20] Dostupné z: <https://www.bksv.com/media/doc/bb0694.pdf>



Seznam obrázků

Obrázek 1 Opotřebení hřbetu nástroje [3]	12
Obrázek 2 Opotřebení ve tvaru žlábků [3].....	12
Obrázek 3 Vydrolení ostří [3].....	13
Obrázek 4 Plastická deformace břitu [3]	13
Obrázek 5 Opotřebení ve tvaru rýhy [3].....	14
Obrázek 6 Opotřebení ve tvaru rýhy na vedlejším hřbetu [3]	14
Obrázek 7 Bodový (vlevo) a plošný styk abrazivního otěru [10].....	15
Obrázek 8 Intenzita otěru v závislosti na teplotě [10]	16
Obrázek 9 Difúze základních složek SK [10].....	16
Obrázek 10 Nově vznikající vrstvy [10].....	17
Obrázek 11 Hřebenovité trhlinky na břitu nástroje [3].....	18
Obrázek 12 Únavový lom nástroje [3].....	18
Obrázek 13 Lom břitu nástroje [3]	19
Obrázek 14 Technické příčiny nevyužití pracovního času [6]	20
Obrázek 15 Využitelnost teoretického operačního času [6]	22
Obrázek 16 Opotřebení na hřbetě nástroje [1] Obrázek 17 Měření opotřebení pomocí software IMPOR [1]	25
Obrázek 18 Měření opotřebení ve tvaru žlábků [1].....	26
Obrázek 19 Způsob osvětlení čela nástroje [1].....	26
Obrázek 20 Břítová destička s nanesenou odporovou vrstvou [12]	27
Obrázek 21 Nástrojový držák s kontakty - vlevo bez destičky, vpravo s destičkou [12].....	28
Obrázek 22 Princip metody odporové vrstvy [12].....	28
Obrázek 23 Kompletní schéma metody [12]	28
Obrázek 24 Pneumatická metoda [5].....	29
Obrázek 25 Metoda s tryskou v břítové destičce [5]	30
Obrázek 26 Opticko-elektronický princip monitorování [5]	30
Obrázek 27 Opticko-elektronické zařízení s TV systémem [5].....	31
Obrázek 28 Geometrie břitu – úhel β [13].....	32
Obrázek 29 Geometrie břitu – úhel α [13].....	32
Obrázek 30 Elektrický způsob měření mezery mezi obrobkem a nástrojem [16].....	35
Obrázek 31 Měření mezery pomocí ultrazvuku [16].....	35



Obrázek 32 Měření mezery pomocí HeNe laseru [16]	36
Obrázek 33 Schéma zařízení pro měření akustických emisí [17].....	37
Obrázek 34 Schéma piezoelektrického akcelerometru [19]	38