

Mechanické a řezné vlastnosti běžných a produktivních vrtáků

Ondřej Svoboda

Bakalářská práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Ondřej Svoboda
Osobní číslo: T22039
Studijní program: B0788A270001 Procesní inženýrství
Forma studia: Prezenční
Téma práce: Mechanické a řezné vlastnosti běžných a produktivních vrtáků

Zásady pro vypracování

- zpracujte teoretickou řešení k tématu práce
- navrhněte experiment porovnávající běžné a produktivní šroubovitě vrtáky
- provedte experimentální testování při obrábění
- provedte mechanické testy vrtáků
- vypracujte technicko-ekonomickou analýzu

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

BÍLEK, Ondřej a LUKOVICS, Imrich. Výrobní inženýrství a technologie. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, 2014. ISBN 9788074544712.
GROOVER, Mikell P. Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems. SI version. International adaptation. Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte., 2019. ISBN 978-1-119-70642-7.
SEDLAK, Josef, Jan ZOUHAR, Stepan KOLOMY, Martin SLANY and Emil NECESANEK, 2023. Effect of high-speed steel screw drill geometry on cutting performance when machining austenitic stainless steel [online]. 7. June 2023. B.m.: Springer Science and Business Media LLC. Available at: doi:10.1038/s41598-023-36448-y

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2025**
Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2025**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 10. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení bakalářské práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – bakalářskou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na bakalářské práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá technologií vrtání jako jednou ze základních operací třískového obrábění. Teoretická část práce se zaměřuje na princip vrtacího procesu, konstrukci a rozdělení vrtacích nástrojů, jejich opotřebení a metody jeho sledování. Dále je popsáno využití vrtání napříč různými průmyslovými odvětvími a jeho propojení s ostatními technologickými operacemi. Praktická část je věnována experimentálnímu porovnání vlastností běžného typu šroubovitého vrtáku od několika výrobců, přičemž jsou hodnoceny zejména aspekty jako výdrž ostří a chování nástroje při zatížení.

Klíčová slova: vrtání, vrták, třískové obrábění, opotřebení nástroje, měření opotřebení, srovnání nástrojů, technologie obrábění

ABSTRACT

This bachelor's thesis focuses on drilling technology as one of the fundamental machining operations. The theoretical part deals with the principle of the drilling process, the construction and classification of drilling tools, tool wear, and methods for its evaluation. Furthermore, the use of drilling across various industrial sectors is discussed, as well as its integration with other machining operations. The practical part presents an experimental comparison of the properties of a common type of twist drill from different manufacturers, with an emphasis on tool life, hole quality, and tool behavior under load.

Keywords: drilling, drill, chip machining, tool wear, tool wear measurement, tool comparison, machining technology

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Ondřeji Bílkovi, Ph.D., za odborné vedení, cenné rady, připomínky a motivaci, které mi poskytl během zpracování této práce. Poděkování patří také panu Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D., za vstřícnost a odbornou pomoc při realizaci ohybové zkoušky. V neposlední řadě děkuji své rodině a blízkým za podporu a povzbuzení po celou dobu studia.

OBSAH

ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 VRTÁNÍ	13
1.1 PRINCIP TECHNOLOGIE	13
1.1.1 Pohyby při vrtání.....	14
1.2 PARAMETRY PRO VRTÁNÍ	15
1.2.1 Řezná rychlost.....	15
1.2.2 Otáčky nástroje.....	15
1.2.3 Posuv	15
1.2.4 Posuvová rychlost	16
1.2.5 Geometrie vrtáku.....	16
1.2.6 Příklady orientačních řezných podmínek při vrtání	16
1.3 STROJE VHODNÉ PRO TECHNOLOGII VRTÁNÍ	17
1.4 NÁSTROJE	18
1.4.1 Základní části vrtáku	18
1.4.2 Typy vrtáků podle konstrukce a použití.....	19
1.4.3 Materiály vrtáků	20
1.4.4 Volba nástroje dle aplikace	21
1.4.5 Volba nástroje dle materiálu obrobku	22
1.5 POVLAČOVÁNÍ VRTÁKŮ	23
1.5.1 Nejběžnější typy povlaků pro vrtáky	24
1.5.2 Výhody povlačování	25
1.5.3 Technologie nanášení povlaků	26
1.5.4 Aplikace povlačovaných vrtáků.....	27
1.6 INOVACE V TECHNOLOGII VRTÁNÍ	28
1.6.1 Termální vrtání.....	28
1.6.2 Laserové vrtání.....	29
2 OPOTŘEBENÍ NÁSTROJŮ	32
2.1 SPECIFIKA OPOTŘEBENÍ VRTÁKŮ	32
2.1.1 Mechanismy opotřebení vrtáků.....	33
2.1.2 Důsledky opotřebení vrtáků	34
2.1.3 Prevence opotřebení vrtáků.....	34
2.1.4 Aplikace v praxi	35
2.2 METODY MĚŘENÍ OPOTŘEBENÍ	35
2.2.1 Vizuální inspekce	35
2.2.2 Měření geometrických změn.....	36
2.2.3 Termální analýza	36
2.2.4 Sledování řezných sil	37
2.2.5 Metody bezdotykového měření.....	37
2.2.6 Digitální monitoring.....	38

3	SHRNUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI.....	39
II	PRAKTICKÁ ČÁST	40
4	CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI PRÁCE	41
4.1	POPIS EXPERIMENTU	41
4.1.1	Použité vrtáky a materiál	41
4.2	MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ VRTÁKŮ	44
4.2.1	Měření – Vrták 1	46
4.2.2	Měření – Vrták 2	49
4.2.3	Měření – Vrták 3	52
4.2.4	Měření – Vrták 4	55
4.3	NAMÁHÁNÍ VRTÁKŮ NA OHYB.....	58
5	DISKUZE O VÝSLEDČÍCH	62
	ZÁVĚR.....	64
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	65
	SEZNAM OBRÁZKŮ	71
	SEZNAM TABULEK.....	73
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	74

ÚVOD

Vrtání patří mezi nejrozšířenější technologické operace v oblasti třískového obrábění a je nezbytné při výrobě většiny strojírenských součástí. Jeho efektivita a kvalita však ve značné míře závisí na použitém nástroji, konkrétně na vrtáku. Vzhledem k široké dostupnosti šroubových vrtáků na trhu se nabízí otázka, do jaké míry se jednotlivé výrobky liší nejen cenou, ale především svými technickými vlastnostmi, životností a spolehlivostí.

Cílem této bakalářské práce je experimentálně porovnat běžně dostupné vrtáky stejné geometrie, pocházející od různých výrobců, a to jak z hlediska jejich chování při vrtání, tak i mechanické odolnosti při ohybovém zatížení. Získané výsledky mají za úkol poskytnout objektivní pohled na výkonnost jednotlivých nástrojů a posoudit jejich vhodnost pro různé typy aplikací, včetně domácího a průmyslového použití.

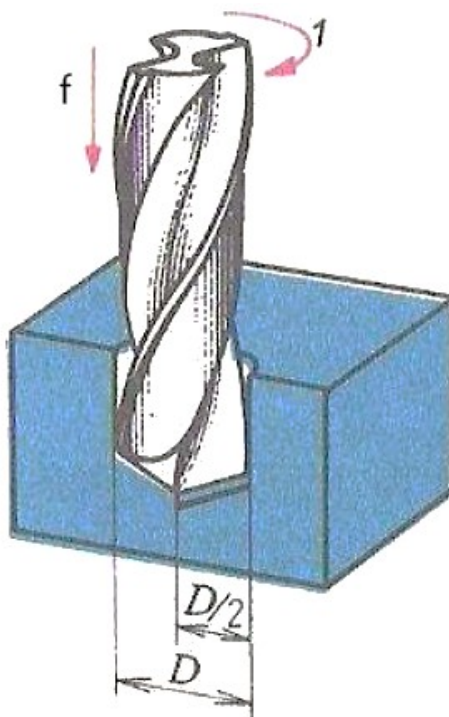
I TEORETICKÁ ČÁST

1 VRTÁNÍ

Vrtání je technologický proces, jehož cílem je vytvoření válcového otvoru do plného materiálu. Tento proces spadá do skupiny třískového obrábění, což znamená, že materiál je odebírán ve formě třísek pomocí mechanického nástroje. V případě vrtání je tímto nástrojem vrták, který vykonává rotační pohyb okolo své osy a zároveň se posouvá ve směru této osy do obrobku.

1.1 Princip technologie

Z hlediska kinematiky procesu je vrtání charakteristické kombinací rotačního a posuvného pohybu. Ve většině případů je rotační pohyb vykonáván nástrojem (vrtákem), zatímco posuv může být realizován buď nástrojem, nebo samotným obrobkem, případně kombinací obou. V praxi je častější varianta, kdy se vrták otáčí i posouvá, zatímco obrobek zůstává upevněn.



Obrázek 1 Pohyby vrtání (1– hlavní pohyb, f – posuv)

Zdroj: [1]

Během procesu dochází k odebírání materiálu na čele vrtáku – tedy na jeho aktivní pracovní ploše. Materiál je zde deformován, přetnut a přeměněn na třísky, které jsou následně odváděny směrem ven z otvoru prostřednictvím drážek na vrtáku. Vzhledem

k tomu, že vrták zasahuje do materiálu v celé své délce, je proces doprovázen vyšším třením a teplotní zátěží než například u soustružení nebo frézování.

Specifickým rysem vrtání je oblast takzvaného „mrtvého středu“ vrtáku, kde je obvodová rychlost prakticky nulová. V této zóně nedochází k účinnému řezání, ale spíše k tlačení materiálu, což zvyšuje řezné síly a tepelnou zátěž. Tato skutečnost činí vrtání náročným z hlediska chlazení a stability nástroje, zejména při větších hloubkách otvorů. [2]

Výsledkem vrtacího procesu je zpravidla válcový otvor s válcovou nebo kuželovou základnou, přičemž kvalita otvoru závisí na mnoha faktorech – například na přesnosti vedení vrtáku, stabilitě stroje, kvalitě upnutí a volbě řezných podmínek. Vrtání je v tomto směru často považováno za „hrubovací“ operaci, kterou lze následně zpřesnit pomocí vystružování, zahlubování nebo jiných dokončovacích metod. [2]

1.1.1 Pohyby při vrtání

Proces vrtání je tvořen základní kombinací pohybů, které zajišťují efektivní odebrání materiálu a vytvoření otvoru požadovaného tvaru a hloubky. Tyto pohyby lze rozdělit na hlavní a vedlejší:

- **Hlavní pohyb** – Tvořen rotačním pohybem vrtáku kolem vlastní osy. Tento pohyb zajišťuje řezání materiálu pomocí hlavních břitů nástroje. Směr otáčení je zpravidla pravotočivý, tedy ve směru hodinových ručiček.
- **Vedlejší (posuvový) pohyb** – Posuv vrtáku ve směru osy zajišťuje postupné pronikání nástroje do obrobku. Posuv může být plynulý nebo přerušovaný, v závislosti na technologii obrábění.
- **Výsledný pohyb** – Kombinací rotačního a posuvového pohybu vzniká šroubovicová trajektorie pohybu nástroje vůči obrobku. Tento pohyb je podmínkou tvorby třísek a odstraňování materiálu ve vrtané ose.
- **Pohyb obrobku** – Většinou je obrobek vůči nástroji v klidu, ale u některých strojů může konat posuvový nebo rotační pohyb (např. při vrtání na soustruhu).

V případě ručního vrtání může být posuv realizován silou obsluhy, zatímco u strojního vrtání je posuv zajištěn mechanicky nebo programově. Správná synchronizace otáček a posuvu je klíčová pro dosažení požadované kvality otvoru, minimalizaci opotřebení nástroje a zajištění plynulého odvodu třísek. [2]

1.2 Parametry pro vrtání

Úspěšné provedení vrtací operace závisí na vhodně zvolených technologických parametrech, které ovlivňují kvalitu výsledného otvoru, životnost nástroje i efektivitu celého procesu. Mezi základní parametry vrtání patří zejména řezná rychlost, otáčky, posuv, hloubka vrtání a geometrie řezného nástroje. [3]

1.2.1 Řezná rychlost

Řezná rychlost (v_c) udává rychlost pohybu řezné hrany vůči obrobku po obvodu vrtaného otvoru. Vyjadřuje se v metrech za minutu (m/min) a vypočítá se podle vztahu:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (1)$$

kde:

- d ... průměr vrtáku (mm)
- n ... otáčky (min^{-1})
- π ... Ludolfovo číslo ($\approx 3,1416$)

Optimální hodnota řezné rychlosti závisí na materiálu obrobku, druhu nástroje a použitém chlazení. Například u běžných konstrukčních ocelí se pohybuje mezi 20–40 m/min při použití HSS nástrojů, zatímco u karbidových nástrojů může přesahovat 100 m/min. [3]

1.2.2 Otáčky nástroje

Počet otáček (n) za minutu je přímo odvozen z řezné rychlosti a průměru vrtáku. Správné nastavení otáček je klíčové pro zajištění dostatečného odvodu třísek a zabránění nadměrnému zahřívání. Při vyšších otáčkách se doporučuje intenzivní chlazení a použití nástrojů s povlakem. [3]

1.2.3 Posuv

Posuv (f) udává posun nástroje za jednu otáčku a vyjadřuje se nejčastěji v mm/ot. Má zásadní vliv na velikost odebírané třísky a tím i na zatížení nástroje. Příliš malý posuv může vést k tření místo řezání, zatímco příliš velký posuv zvyšuje riziko zalomení nástroje a hrubého povrchu.

Typické hodnoty posuvu pro běžné vrtání:

- Ø 5 mm HSS vrták: 0,05–0,15 mm/ot
- Ø 10 mm HSS vrták: 0,15–0,30 mm/ot
- Ø 20 mm a více: 0,30–0,50 mm/ot (dle materiálu a typu vrtáku) [3]

1.2.4 Posuvová rychlost

Vyjadřuje rychlost posuvu nástroje (v_f) v mm/min a vypočítá se jako:

$$v_f = f \cdot n \quad (2)$$

kde:

- f ... posuv na otáčku
- n ... počet otáček

Tato veličina se používá zejména při programování CNC strojů. [3]

1.2.5 Geometrie vrtáku

Geometrické parametry vrtáku mají zásadní vliv na chování při vrtání, tvorbu třísky a stabilitu procesu. Nejvýznamnějšími úhly jsou:

- **Úhel hřbetu** (6–12°) – Umožňuje volný pohyb nástroje za řeznou hranou.
- **Úhel čela** (od –5° do +30°) – Určuje agresivitu řezu a ovlivňuje odvod třísek.
- **Úhel stoupání šroubovice** (20–35°) – U běžných vrtáků se pohybuje okolo 30°; vyšší úhly pro měkké materiály, nižší pro tvrdé.
- **Úhel mezi hlavními břity (vrcholový úhel)** – Standardně 118°, pro tvrdší materiály až 135°. [4]

1.2.6 Příklady orientačních řezných podmínek při vrtání

- **Konstrukční ocel (např. ČSN 11 373) + HSS vrták** – řezná rychlost: 25–30 m/min; posuv: 0,1–0,3 mm/ot; běžné univerzální vrtání, vhodné i pro sloupové vrtačky
- **Nerezová ocel + karbidový vrták s povlakem TiAlN** – řezná rychlost: 40–60 m/min; posuv: 0,1–0,25 mm/ot; náročnější obrábění, nutné chlazení, vhodné pro CNC

- **Hliník + HSS vrták (leštěné drážky)** – řezná rychlost: 80–120 m/min; posuv: 0,15–0,4 mm/ot; snadno obrobitelný materiál, pozor na lepení třísek
- **Šedá litina + karbidový vrták** – řezná rychlost: 90–110 m/min; posuv: 0,2–0,4 mm/ot; možnost obrábění nasucho, vhodné pro sériovou výrobu
- **Kompozit CFRP + diamantový vrták** – řezná rychlost: 100–200 m/min; posuv: 0,05–0,15 mm/ot; citlivý materiál, nutné zabránit delaminaci, bez chlazení [3; 5]

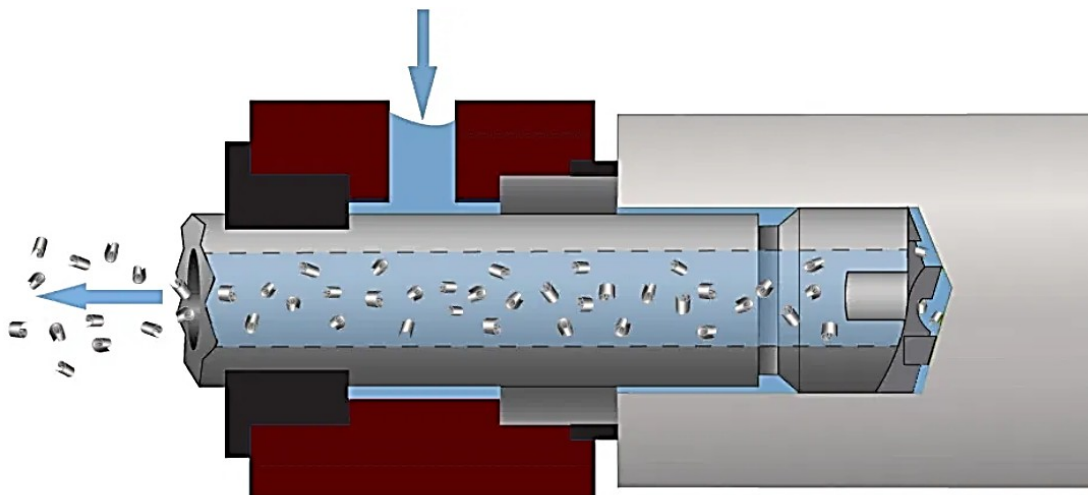
1.3 Stroje vhodné pro technologii vrtání

Vrtání může být realizováno na široké škále strojního vybavení v závislosti na požadované přesnosti, rozsahu výroby a charakteru obrobku. Volba vhodného stroje má zásadní vliv na kvalitu obrábění, produktivitu i možnost integrace dalších operací.

Ruční vrtačky – Tyto stroje se využívají především v údržbě, montáži a v menších dílnách, kde není vyžadována vysoká přesnost ani opakovatelnost. Jsou vhodné pro vrtání do měkkých materiálů a v případech, kdy je potřeba flexibilita a jednoduché přenášení stroje. Jejich použití je však omezeno ručním vedením nástroje, což může negativně ovlivnit přesnost a kvalitu otvoru. [6]

Stojanové (sloupové) vrtačky – Tyto vrtačky se používají pro přesnější vrtací operace a umožňují pevné uchycení jak obrobku, tak nástroje. Díky tuhé konstrukci stroje, stabilnímu vedení vřetene a možnosti regulace otáček jsou vhodné pro malosériovou až středně sériovou výrobu. Jsou často vybaveny svěráky nebo pracovním stolem s možností přestavení a naklápění. [6]

CNC obráběcí stroje – Moderní CNC vrtačky a frézovací centra představují vysoce produktivní řešení pro přesné a opakovatelné vrtání složitých tvarů a rozměrově náročných otvorů. Vrtání je zde často kombinováno s dalšími technologickými operacemi, jako je zahlubování, vystružování, závitování nebo frézování ploch, což umožňuje komplexní obrábění součástí v jednom upnutí. CNC stroje jsou rovněž schopny automaticky měnit nástroje, upravovat řezné podmínky a kompenzovat odchylky během obrábění. [6]



Obrázek 2 Hlubkové vrtání pomocí systému BTA

Zdroj: [7]

Speciálním využitím CNC strojů je hluboké vrtání, tedy tvorba otvorů s hloubkou přesahující pětinasobek průměru nástroje. Pro tyto operace se využívá technologie **BTA (Boring and Trepanning Association)**, která umožňuje přívod chladicí kapaliny vně nástroje a odvod třísek skrz jeho dutinu. Díky tomu lze bezpečně a efektivně obrábět i velmi hluboké otvory bez rizika přehřátí nebo ucpání. Typickým příkladem jsou motorové bloky, hřídele nebo hydraulické válce, kde je vyžadována vysoká přesnost a kvalita povrchu. [8]

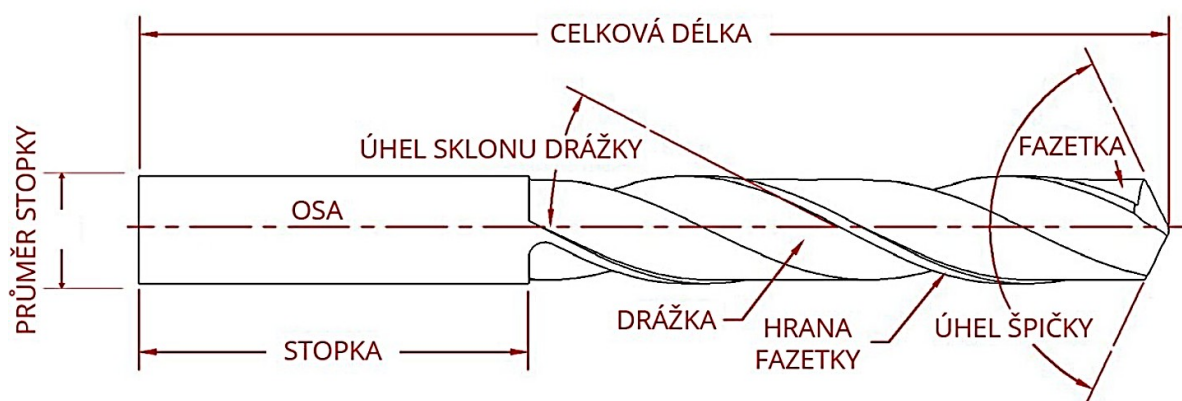
1.4 Nástroje

Vrtáky jsou klíčovými nástroji pro vrtání a jejich správná volba je zásadní pro dosažení požadované kvality obrábění, produktivity a životnosti nástroje. Konstrukce vrtáku je navržena tak, aby umožňovala efektivní odstraňování materiálu ve formě třísek a zároveň zajišťovala přesnost otvoru. Vrták se skládá z několika základních částí, včetně špičky, břitů, spirálových drážek, stopky a povrchové úpravy. [8]

1.4.1 Základní části vrtáku

- **Špička vrtáku** – Slouží k navedení nástroje do materiálu. Běžný vrcholový úhel je 118° , pro tvrdší nebo houževnaté materiály se používá větší úhel, obvykle 135° , který snižuje riziko opotřebení a lámání.
- **Břity** – Provádějí řezný pohyb. Hlavní břity odstraňují materiál, zatímco pomocné (vedlejší) břity zajišťují stabilitu.

- **Spirálové drážky** – Umožňují odvod třísek z místa řezu a mohou zároveň vést chladicí kapalinu.
- **Stopka** – Část nástroje určená k upnutí do sklíčidla nebo vřetene. Může být válcová, kuželová (např. Morseův kužel) nebo šestihranná.
- **Povrchová úprava** – Zvyšuje otěruvzdornost a snižuje tření. Nejčastěji používané jsou povlaky TiN, TiAlN nebo DLC. [8; 9]



Obrázek 3 Náčrt vrtáku s popisem částí

Zdroj: [10]

1.4.2 Typy vrtáků podle konstrukce a použití

V praxi se používá široká škála vrtáků, které se liší podle konstrukce, geometrie a účelu použití:

- **Šroubovité vrtáky (spirálové)** – Nejpoužívanější typ pro všeobecné obrábění. Vhodné pro kovy, plasty i dřevo.
- **Dělové vrtáky** – Určeny pro hluboké vrtání ($L/D > 10$). Disponují přímými drážkami a vnitřním přívodem chladicí kapaliny.
- **Korunkové (vystředěné) vrtáky** – Slouží k vrtání velkých průměrů s menším výkonovým zatížením. Využívají se například v konstrukčním nebo stavebním průmyslu.
- **Stupňovité vrtáky** – Umožňují vytvoření více průměrů nebo zahloubení v jednom pracovním kroku. Často využívány v elektroinstalačních prvcích nebo při výrobě tenkostěnných plechů.

- **Kónické vrtáky** – Vhodné pro postupné rozšiřování otvorů nebo vytváření kuželových děr.
- **Diamantové vrtáky** – Určené pro obrábění extrémně tvrdých a abrazivních materiálů, např. keramiky, skla, uhlíkových kompozitů či kameniny.
- **Vrtáky s výměnnou břitovou destičkou** – Používané jsou především ve výrobě s vysokými nároky na ekonomiku a rychlou výměnu ostří. [8; 9; 10]



Obrázek 4 Vrták s výměnnou břitovou destičkou

Zdroj: [11]

1.4.3 Materiály vrtáků

Výběr materiálu vrtáku je zásadní pro zajištění efektivního obrábění, dosažení požadované kvality otvoru a optimalizaci životnosti nástroje. Mezi nejpoužívanější materiály vrtáků patří:

- **Rychlořezná ocel (HSS)** – Vrtáky z rychlořezné oceli se vyznačují dobrou houževnatostí a schopností odolávat rázovému zatížení, což je činí vhodnými pro univerzální použití. Nejčastěji se používají pro obrábění běžných konstrukčních ocelí, litin a měkčích neželezných slitin. Povrchová úprava, jako je např. nitrid titanu, výrazně zvyšuje odolnost vůči opotřebení a snižuje tření mezi nástrojem a obrobkem.
- **Slinutý karbid** – Tento materiál je charakteristický vysokou tvrdostí, žáruvzdorností a odolností proti opotřebení, což jej předurčuje pro obrábění tvrdých a žárupevných kovů. Karbidové vrtáky umožňují použití vyšších řezných rychlostí a delší životnost

při zachování přesnosti otvoru. Vzhledem ke své křehkosti jsou však vhodné především pro stabilní pracovní podmínky bez přerušení řezu.

- **Cermety, CBN a PCD** – představují kombinaci keramických a kovových materiálů a nacházejí uplatnění především při dokončovacích operacích. CBN (kubický nitrid bóru) se používá pro obrábění velmi tvrdých kalených ocelí, kde by běžné nástroje selhávaly. PCD (polykrystalický diamant) je určen pro obrábění neželezných kovů, kompozitů a abrazivních plastů, kde vyniká extrémní tvrdostí a dlouhou životností.
- **Diamant** – nejtvrdší nástrojový materiál a používá se především při obrábění křehkých, tvrdých a abrazivních materiálů, jako jsou keramika, sklo, uhlíkové kompozity nebo desky plošných spojů. Jeho vynikající odolnost proti opotřebení umožňuje precizní a dlouhodobé použití, avšak diamant není vhodný pro obrábění železných kovů, kde dochází k degradaci materiálu vlivem chemické reakce za zvýšených teplot. [8; 9]

1.4.4 Volba nástroje dle aplikace

Správný výběr vrtáku pro konkrétní aplikaci závisí na kombinaci několika klíčových faktorů, které je nutné vzájemně vyhodnotit.

Důležitým hlediskem je **požadovaná hloubka otvoru**. Pro běžné otvory postačí standardní spirálové vrtáky, zatímco při hlubokém vrtání (např. nad 10ti násobek průměru) je nutné využít dělové vrtáky s vnitřním chlazením a speciální geometrií pro spolehlivý odvod třísek. [9]

Na přesnosti výsledného otvoru se významně podílí použití vhodného nástroje ve fázi předvrtání. Při požadavku na vyšší rozměrovou a tvarovou přesnost se doporučuje **použití středícího vrtáku**, který stabilizuje náběh nástroje a minimalizuje vychýlení vrtaného otvoru. [9]



Obrázek 5 Středící vrták

Zdroj: [12]

Zohlednit je nutné i **dostupný výkon stroje a systém upínání**, zejména u výkonnostně slabších zařízení nebo při obrábění komplikovaných součástí. Nedostatečné upnutí může vést ke kmitům, excentricitě a snížení životnosti nástroje. [9]

V neposlední řadě je důležité brát v úvahu **požadavky na povrchovou úpravu vrtáku**, které ovlivňují tření, tvorbu nárůstků a tepelnou zátěž. Kvalitní povlaky jako TiN, TiAlN nebo DLC mohou významně přispět ke stabilitě procesu a zvýšení produktivity výroby. [9]

1.4.5 Volba nástroje dle materiálu obrobku

Volba vhodného vrtáku je úzce spjata s materiálem obrobku, protože každý materiál se při vrtání chová odlišně. Zohlednit je nutné nejen jeho tvrdost, ale také houževnatost, tepelnou vodivost a tendenci k tvorbě nárůstků nebo delaminaci.

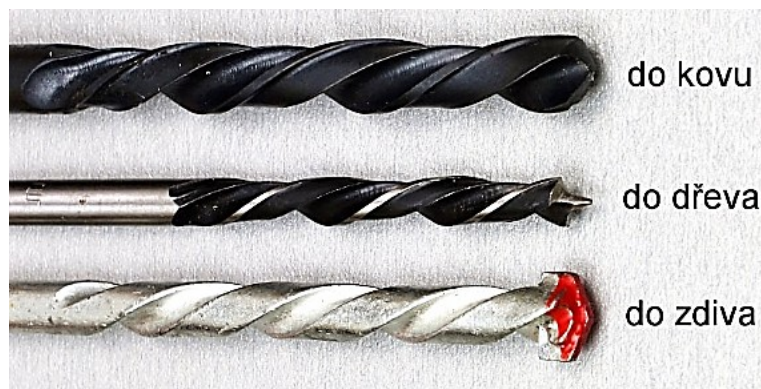
Pro běžné **konstrukční oceli a litiny** se používají vrtáky z rychlořezné oceli (HSS), případně s povlaky TiN nebo TiAlN, které zvyšují odolnost proti otěru a zlepšují řezné podmínky. V případě obrábění **nerezových ocelí** nebo **kalených materiálů** jsou vhodnější nástroje ze slinutého karbidu, které umožňují vyšší řezné rychlosti a lépe odolávají vysokému zatížení. [13]

Při obrábění **hliníku a neželezných kovů** je důležité zajistit hladký odvod třísek a minimalizovat tření. Používají se vrtáky s leštěnými šroubovicemi, ostrým úhlem čela a často bez povlaku, případně s DLC povlakem, který snižuje tendenci materiálu lepit se na břit. [13]

Pro **plasty** je charakteristická náchylnost k natavování a deformaci při nadměrném zahřívání. Vhodné jsou vrtáky s větším úhlem čela, velmi ostrými břity a nižšími otáčkami. Důležitá je také volba vhodného přítlaku, aby nedošlo k roztržení materiálu. [13]

Při obrábění **kompozitních materiálů a laminátů** je nutné zabránit delaminaci vrstev. Používají se speciálně broušené vrtáky nebo nástroje s diamantovým ostrím (PCD), které zajišťují čistý řez bez trhání vláken. [13]

Pro **sklo, keramiku, kameninu a další křehké materiály** se využívají diamantové vrtáky nebo tvrdokovové nástroje v kombinaci s chlazením vodou. Vrtání se provádí při nízkých otáčkách a s minimálním přítlakem, aby nedošlo k prasknutí obrobku. [13]



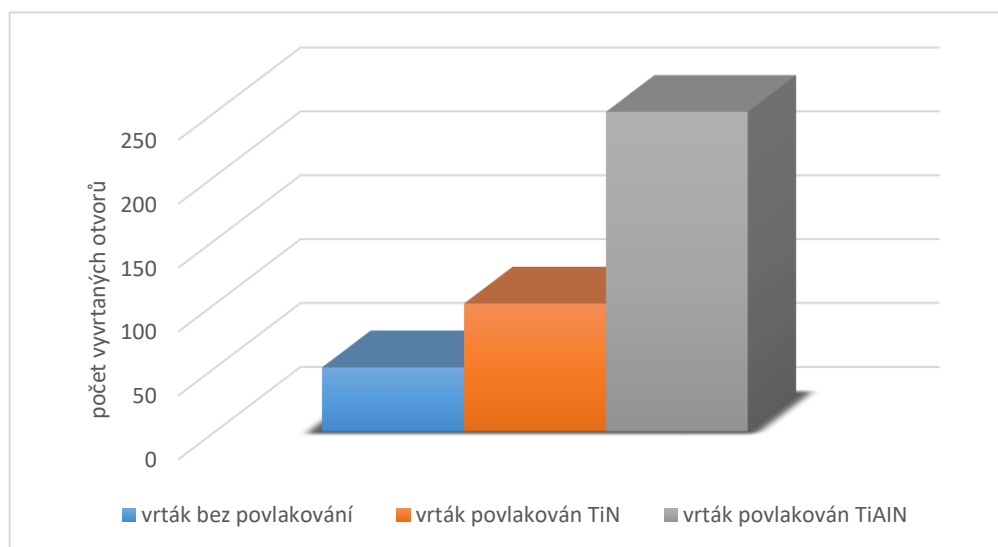
Obrázek 6 Příklady vrtáků podle materiálu obrobku

Zdroj:[14]

1.5 Povlakování vrtáků

Povlakování vrtáků je moderní technologie, která výrazně zvyšuje výkonnost, odolnost a životnost nástrojů. Povlakování spočívá v nanesení tenké vrstvy speciálního materiálu na povrch vrtáku, což zlepšuje jeho mechanické, tribologické a chemické vlastnosti. [15]

Tato vrstva, typicky o tloušťce několika mikrometrů, pomáhá minimalizovat tření mezi nástrojem a obrobkem, zvyšuje tvrdost a odolnost vůči opotřebení a zlepšuje tepelnou stabilitu během obrábění. [15]



Obrázek 7 Porovnání výkonnosti při vrtání

Zkoušený vrták: HSS DIN 338, průměr vrtáku: 6 mm, vrtaná hloubka: 15 mm, vrtaný materiál: 1.2379, pevnost materiálu: 800 N/mm², chlazení: emulze 5%

Zdroj: [16]

Hlavní funkcí povlaků je prodloužení životnosti nástroje a umožnění vrtání při vyšších řezných rychlostech, což zvyšuje produktivitu a snižuje celkové náklady na výrobu. Díky povlakování mohou vrtáky lépe odolávat extrémním podmínkám, jako je vysoká teplota, abrazivní opotřebení a chemické reakce mezi nástrojem a obrobkem. [17]

1.5.1 Nejběžnější typy povlaků pro vrtáky

Nitrid titanu (TiN) je tradiční a velmi rozšířený povlak s charakteristickou zlatou barvou. Vyznačuje se vysokou tvrdostí, dobrou přílnavostí a schopností snižovat tření mezi nástrojem a obrobkem. Je vhodný pro vrtání běžných materiálů, jako jsou oceli, litiny a hliník. Díky své univerzálnosti je hojně používán v sériové i kusové výrobě. Nevýhodou může být nižší tepelná odolnost ve srovnání s novějšími typy povlaků. [18; 19]

Karbid titanu (TiC) nabízí ještě vyšší tvrdost než TiN, což z něj činí velmi vhodný povlak pro obrábění abrazivních a tvrdých materiálů. Je odolný proti mechanickému poškození a poskytuje vysokou rozměrovou stabilitu. Typicky se používá při vrtání litiny, kompozitů a kalených materiálů. Jeho nižší houževnatost však omezuje použití v aplikacích s proměnlivým zatížením. Vhodný je především pro stabilní podmínky a nižší vibrace. [19; 20]

Nitrid titanu a hliníku (TiAlN) je moderní víceprvkový povlak určený pro aplikace s vysokým teplotním zatížením. Při vyšších teplotách vytváří ochrannou vrstvu oxidu hlinitého, která zlepšuje tepelnou odolnost a snižuje oxidaci. Je ideální pro vysokorychlostní vrtání a obrábění bez použití chladicí kapaliny. Často se uplatňuje při obrábění ocelí, nerezových materiálů a slitin titanu. Má tmavě šedou až fialovou barvu a velmi vysokou tvrdost. [18; 19]

Diamantové povlaky dosahují extrémní tvrdosti a výjimečné odolnosti proti opotřebení. Používají se hlavně při obrábění velmi tvrdých nebo abrazivních materiálů, jako jsou keramika, grafit, sklo nebo kompozity s uhlíkovými vlákny. Díky minimálnímu tření se snižuje tvorba tepla a zlepšuje kvalita povrchu. Nevýhodou je omezená chemická stabilita při obrábění železných kovů. Využití nachází především ve speciálních aplikacích s vysokými nároky. [19; 21]

Chromnitrid (CrN) se vyznačuje vynikající odolností vůči oxidaci, korozi a chemickému namáhání. Má vyšší houževnatost než TiN, což z něj činí dobrou volbu pro obrábění pod vlivem agresivních prostředí. Používá se zejména v chemickém, potravinářském a farmaceutickém průmyslu. Nabízí rovnováhu mezi tvrdostí a pružností,

a tím zvyšuje životnost nástroje v náročných provozních podmínkách. Barva povlaku je stříbřitě šedá. [19; 22]



Obrázek 8 Příklady povlakovaných vrtáků HSS

Zdroj: [23]

1.5.2 Výhody povlakování

Povlakované vrtáky představují významný pokrok v oblasti nástrojové techniky, jelikož přinášejí řadu klíčových výhod jak z hlediska výkonnosti, tak i ekonomiky výroby. Nejzásadnější přínos spočívá v prodloužení životnosti nástroje, které může být díky aplikaci vhodného povlaku až desetinásobné oproti nepovlakovaným nástrojům. Tím se významně snižuje četnost výměny vrtáků a zároveň se prodlužují výrobní cykly bez přerušení, což zvyšuje celkovou produktivitu. [9; 17]

Další podstatnou výhodou je možnost použití vyšších řezných rychlostí a posuvů, protože povlak snižuje tření mezi nástrojem a obráběným materiálem. Výsledkem je kratší doba obrábění, vyšší stabilita procesu a snížení opotřebení nástroje i při náročnějších pracovních podmínkách. Redukce tření zároveň vede ke snížené tvorbě tepla v oblasti řezu, což minimalizuje riziko přehřátí, deformace nástroje a zhoršení kvality povrchu otvoru. [15]

Další výhodou je snížení spotřeby chladicích a mazacích kapalin. Některé moderní typy povlaků, jako například TiAlN, umožňují efektivní suché obrábění, což snižuje ekologickou zátěž a náklady na provoz. Povlaky rovněž zvyšují chemickou a tepelnou odolnost nástroje,

což je klíčové při obrábění náročných materiálů, jako jsou nerezové oceli, slitiny titanu, kompozity nebo litina. [24; 17]

Povlakované vrtáky lépe odolávají abrazivnímu a adheznímu opotřebení, které je běžné při obrábění tvrdších nebo lepivých materiálů. Tato vlastnost zajišťuje stabilní řezné podmínky i při obrábění v náročném prostředí, například v automobilovém, leteckém nebo energetickém průmyslu. [13; 17]

Díky těmto vlastnostem přispívá povlakování nástrojů nejen ke zlepšení výkonu, ale také ke snížení celkových výrobních nákladů, prodloužení intervalů údržby a vyšší spolehlivosti výrobních operací. Kombinace uvedených výhod činí povlakované vrtáky nedílnou součástí moderního a efektivního obrábění. [24]

1.5.3 Technologie nanášení povlaků

Povlaky na vrtáky se nanášejí pomocí specializovaných technologií, které umožňují vytvoření tenké, rovnoměrné a funkčně účinné vrstvy na povrchu nástroje. Dvě nejčastěji používané metody jsou fyzikální depozice z plynné fáze (PVD – Physical Vapor Deposition) a chemická depozice z plynné fáze (CVD – Chemical Vapor Deposition). [17; 25]

PVD je moderní a široce rozšířená technologie, která umožňuje nanášení velmi tenkých vrstev (v řádu jednotek mikrometrů) při relativně nízkých teplotách, typicky mezi 300–600 °C. Díky tomu je vhodná i pro nástroje z materiálů citlivých na vysoké teploty, jako je rychlořezná ocel (HSS). Princip spočívá v tom, že materiál určený pro povlak (např. titan, hliník, chrom) je v uzavřené vakuové komoře buď odpařen nebo rozprášen (například metodou naprašování nebo obloukového výboje). Následně dochází ke kondenzaci tohoto materiálu na povrchu nástroje, čímž vzniká kompaktní povlak se silnou přilnavostí. Výsledkem je tvrdá a odolná vrstva, která snižuje tření, zvyšuje životnost nástroje a umožňuje použití vyšších řezných rychlostí. [17; 25]

CVD je metoda využívající chemickou reakci plynné směsi s povrchem nástroje, při které vzniká požadovaný povlak. Tento proces probíhá při vyšších teplotách, obvykle mezi 800–1100 °C, což umožňuje tvorbu velmi tvrdých a odolných vrstev, jako je karbid titanu (TiC) nebo nitrid křemíku (Si₃N₄). Díky vysoké teplotě dosahuje povlak výborné přilnavosti a rovnoměrného pokrytí i u složitějších geometrií. Nevýhodou je riziko negativního ovlivnění vlastností základního materiálu vrtáku (např. pokles houževnatosti nebo tvrdosti) vlivem žhání při vysokých teplotách. Proto je CVD vhodnější pro nástroje z karbidů nebo jiných teplotně stabilních materiálů. [25; 26]

Výběr mezi metodami PVD a CVD závisí na konkrétní aplikaci, požadavcích na výkon nástroje, typu povlaku a základním materiálu vrtáku. V moderní praxi se často využívají i hybridní technologie nebo vícevrstvé kombinace, které spojují výhody obou metod – vysokou tvrdost, přilnavost i tepelnou stabilitu. [25]



Obrázek 9 Pec na povlakování nástrojů

Zdroj: [27]

1.5.4 Aplikace povlakovaných vrtáků

Povlakované vrtáky nacházejí uplatnění ve všech oblastech průmyslu. V automobilovém průmyslu se používají pro vrtání kalených materiálů nebo slitin titanu. V leteckém průmyslu jsou nezbytné pro obrábění kompozitů a pokročilých slitin s vysokou pevností. V energetice se povlakované vrtáky využívají při výrobě turbín a dalších součástí vystavených extrémnímu zatížení. Ve výrobě elektroniky se používají pro přesné mikroobrábění. [28]

Povlakování vrtáků je klíčovou technologií pro moderní obrábění, která zajišťuje vyšší produktivitu, snížení nákladů a lepší kvalitu obrábění. Výběr vhodného povlaku závisí na obráběném materiálu, pracovních podmínkách a požadovaných vlastnostech otvorů. Díky neustálému vývoji povlakovacích technologií se otevírají nové možnosti pro zvyšování výkonu a efektivity nástrojů, což je zásadní pro konkurenceschopnost v průmyslu. [17; 28]

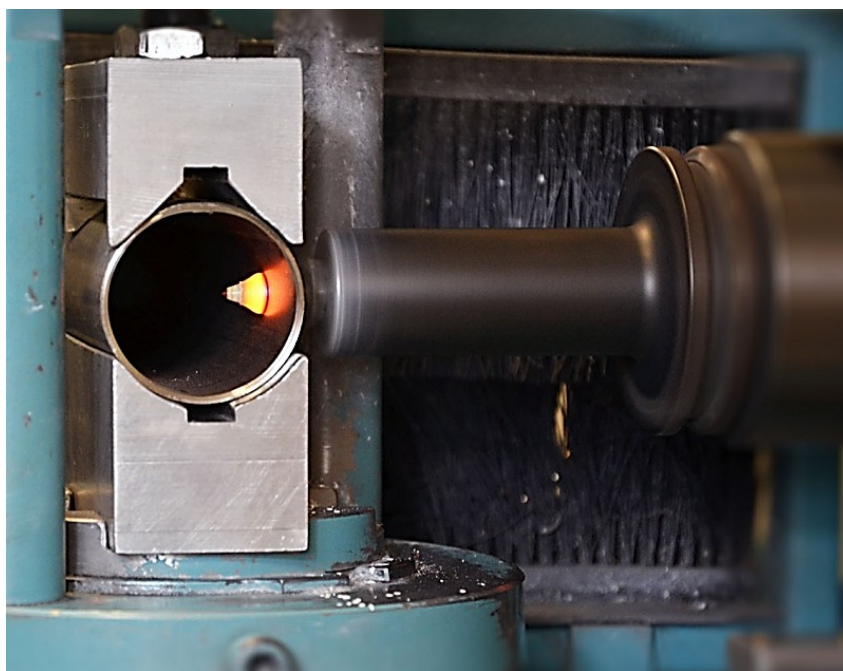
1.6 Inovace v technologii vrtání

Strojírenství neustále směřuje k inovacím a optimalizaci výrobních procesů, což se promítá i do vývoje moderních metod vrtání. Tomu se děje i v případě vrtání. Stále se vyvíjí nové způsoby a metody, díky kterým se celý proces výroby zjednodušuje a zefektivňuje.

1.6.1 Termální vrtání

Termální vrtání, známé také jako frikční vrtání nebo flow drilling, představuje moderní bezodpadovou technologii vytváření otvorů v kovových materiálech. Princip této metody spočívá ve využití tepla vznikajícího třením speciálního nástroje, kterým je kuželovitý vrták vyrobený ze slinutého karbidu nebo jiného materiálu s vysokou tvrdostí. Tento nástroj je během procesu vystaven vysokým otáčkám (obvykle v rozmezí 1500 až 4000 ot/min) a zároveň je přitlačován na povrch materiálu. [29]

Vlivem tření se materiál v místě kontaktu plastifikuje, tedy změkne, aniž by došlo k jeho odstranění formou třísek. Vrták proniká do materiálu a současně jej tvaruje. Materiál je vytlačován směrem nahoru a dolů od povrchu, čímž vzniká tzv. límec (bushing) s podstatně zvýšenou tloušťkou stěny v oblasti otvoru. Tento zesílený límec následně umožňuje například snadné závitování, čímž se výrazně zvyšuje pevnost šroubových spojů v tenkostěnných materiálech. [29; 30]



Obrázek 10 Vrták pro termální vrtání do oceli

Zdroj: [31]

Výhodou termálního vrtání je především eliminace třísek, což znamená nejen čistější pracovní prostředí, ale také vyšší efektivitu výroby bez nutnosti následného čištění nebo přepracování dílů. Dále tato technologie snižuje riziko vzniku trhlin nebo jiného poškození okrajů otvoru, které jsou běžné u tradičních vrtacích metod. Díky tomu je termální vrtání mimořádně vhodné zejména pro výrobu konstrukcí z tenkostěnných profilů, například v automobilovém průmyslu, výrobě nábytku, konstrukci rámců kol nebo v oblasti leteckého průmyslu.

Při termálním vrtání je zásadní správná volba otáček, přítlaku, a především materiálu nástroje. Proces je optimální pro materiály jako je nízkouhlíková ocel, nerezová ocel, hliník, mosaz a měď. U velmi tvrdých slitin je potřeba zohlednit zvýšenou náročnost na výkon stroje a kvalitu nástroje. [29; 32]

Technologie termálního vrtání má také určité limity. Zejména při obrábění velmi tlustých materiálů (nad cca 5 mm) není tato metoda efektivní. Dále je potřeba zajistit dostatečné chlazení nástroje a v některých případech následnou úpravu otvoru (například kalibraci límce). [29]

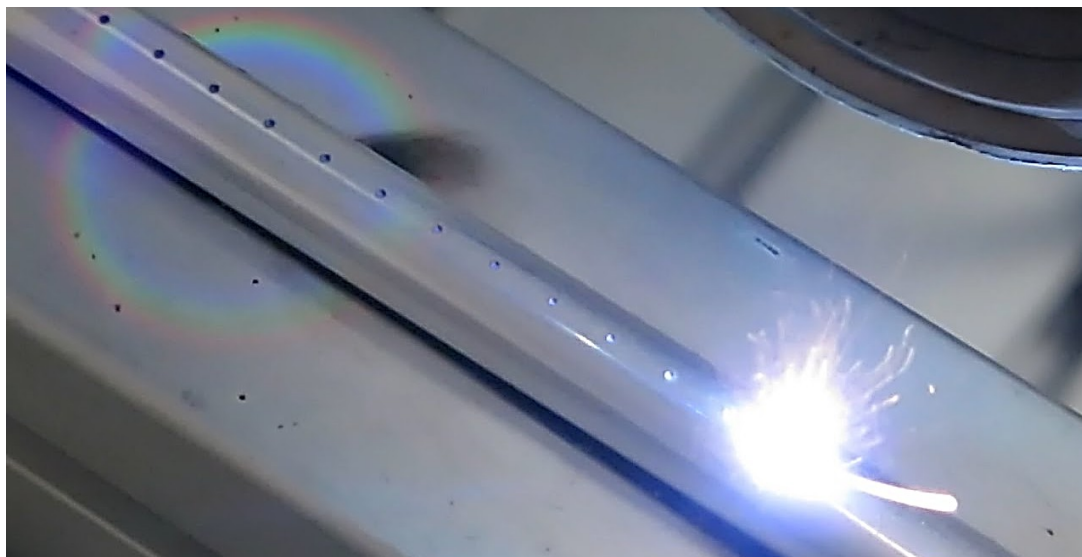
Významným představitelem komerčního využití této technologie je firma Flowdrill, která dodává specializované nástroje a zařízení pro různé průmyslové aplikace. Odborné studie, například přehled publikovaný na platformě ScienceDirect, potvrzují vysokou účinnost termálního vrtání, jeho mechanickou výhodnost a perspektivu širšího průmyslového využití. [29]

Celkově lze termální vrtání považovat za inovativní technologii, která významně rozšiřuje možnosti výroby otvorů do ocelových i jiných kovových materiálů, a to s důrazem na kvalitu, pevnost a efektivitu procesu. [29]

1.6.2 Laserové vrtání

Laserové vrtání je pokročilá technologie, která využívá vysoce koncentrovaný paprsek koherentního světla k přesnému a rychlému vytváření otvorů v různých materiálech. Jde o proces, který probíhá bezkontaktně, čímž se eliminuje mechanické zatížení obrobku, snižuje opotřebení nástrojů a zvyšuje preciznost opracování. Nejčastěji se laserové vrtání používá v leteckém, automobilovém, hodinářském nebo lékařském průmyslu, kde jsou kladeny vysoké nároky na přesnost, opakovatelnost a kvalitu povrchu. [33; 34]

Princip laserového vrtání spočívá v rychlém ohřevu malé oblasti materiálu laserovým paprskem. Při dostatečně vysoké hustotě energie dojde k roztavení, popřípadě až odpaření materiálu (tzv. ablace), což má za následek vznik otvoru. V případě kovů se často využívá kombinace tavení a následného proudění vzniklých plynů, které roztavený materiál vyfouknou z místa opracování (tzv. *blow-off* proces).



Obrázek 11 Laserové vrtání

Zdroj: [35]

Laserové vrtání se dělí podle způsobu provedení na:

- **Jednopulzní vrtání** (single-pulse drilling) – Jediný laserový pulz vytvoří otvor, typicky o velmi malém průměru.
- **Vícepulzní vrtání** (multi-pulse drilling) – Otvor je postupně hlouben více pulzy, což umožňuje větší kontrolu nad hloubkou a geometrií otvoru.
- **Vrtání s kontinuálním paprskem** (continuous-wave drilling) – Jsou méně běžné a vhodné spíše pro větší otvory nebo řezání.

Technologie využívá několik typů laserových zdrojů:

- **Nd:YAG (neodymový laser)** – Je vhodný pro většinu kovových materiálů a pracuje buď v pulzním, nebo kontinuálním režimu.
- **Vláknové lasery** – Poskytují vynikající kvalitu paprsku a vysokou účinnost a jsou vhodné pro vysokorychlostní aplikace.

- **CO₂ lasery** – Používají se především pro zpracování nekovových materiálů (plasty, sklo, keramika).

Významné výhody laserového vrtání zahrnují:

- vysokou přesnost a opakovatelnost procesu,
- minimální tepelně ovlivněnou oblast (HAZ), což je důležité zejména u tenkých plechů,
- možnost vrtání velmi malých otvorů (v mikrometrovém měřítku),
- schopnost obrábět složité geometrie a šikmé nebo zakřivené povrchy,
- snadnou integraci do automatizovaných výrobních systémů.

Laserové vrtání se hojně využívá např. při výrobě chladicích otvorů v turbínových lopatkách, mikrootvorů v lékařských implantátech, v přesné výrobě vstřikovačů paliva nebo v elektronickém průmyslu pro vrtání tištěných spojů. [33; 34; 36]

Nevýhodou této metody je především vysoká pořizovací cena laserového systému, nároky na chlazení a bezpečnost provozu (ochrana zraku a ovládání rozptylu záření). Také může docházet k tvorbě rozstříku roztaveného materiálu kolem otvoru, což si může vyžádat následné čištění. [34; 37]

Laserové vrtání je i přesto považováno za průlomovou metodu především pro aplikace, kde tradiční mechanické vrtání selhává, nebo kde je požadována maximální přesnost, rychlost a čistota procesu. S rozvojem vláknových a ultrakrátkopulzních laserů lze očekávat další rozšíření této technologie i v oblasti obrábění běžných strojírenských materiálů, jako je konstrukční ocel či nerezová ocel. [33; 34]

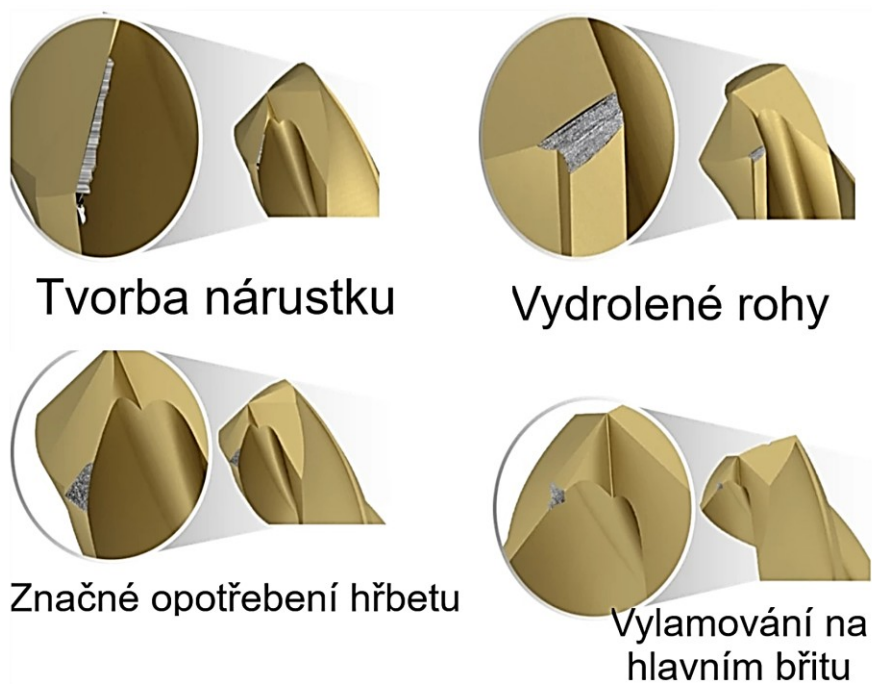
2 OPOTŘEBENÍ NÁSTROJŮ

Vrtáky patří mezi nejpoužívanější nástroje při třískovém obrábění a jsou zvláště náchylné k různým formám opotřebení. Vlivem mechanických sil, tření a teplot dochází k postupné degradaci jejich břitů a funkčních ploch.

2.1 Specifika opotřebení vrtáků

Při vrtání jsou nástroje vystaveny kombinaci mechanických, tepelných a chemických vlivů, které ovlivňují jejich životnost, funkčnost i výslednou kvalitu obrábění. Porozumění mechanismům opotřebení je základem pro efektivní řízení výrobního procesu a prodloužení životnosti nástrojů.

Jako nástroje pro třískové obrábění podléhají opotřebení způsobenému mechanickými, tepelnými a chemickými vlivy. Tyto faktory zásadně ovlivňují životnost nástroje, kvalitu vrtaných otvorů a efektivitu výrobního procesu. Porozumění mechanismům opotřebení je klíčové pro optimalizaci procesu a prevenci poruch.



Obrázek 12 Příklady opotřebení vrtáku

Zdroj: [38]

Opotřebení může vznikat jak při okamžitém zatížení, tak postupně během dlouhodobého používání. Jeho rychlost závisí na mnoha faktorech, jako je materiál obrobku,

geometrie vrtáku, řezné podmínky a chlazení. Identifikace typu opotřebení umožňuje zavést vhodná preventivní opatření a prodloužit životnost nástroje. [39]

2.1.1 Mechanismy opotřebení vrtáků

Abrazivní opotřebení vzniká mechanickým působením tvrdých částic obrobku, které narušují povrch břitů vrtáku. Tento typ opotřebení je běžný při obrábění litiny, kompozitů a dalších abrazivních materiálů. Dochází k postupnému obrušování ostří, což vede ke zvýšení řezných sil, zahřívání nástroje a snížení kvality vrtaných otvorů. [38; 40; 41]

Adhezní opotřebení nastává, když se částice obrobku přichytávají na břity vrtáku. To je typické při vrtání měkkých kovů, jako je hliník či měď. Vzniklá vrstva přichyceného materiálu může způsobovat nepravidelné opotřebení, přehřívání a zhoršení kvality povrchu otvorů. [38; 41]

Difuzní opotřebení je důsledkem chemických reakcí mezi materiálem nástroje a obrobku při vysokých teplotách. Atomová výměna mezi povrchy způsobuje oslabení vrtáku a ztrátu jeho tvrdosti, což negativně ovlivňuje životnost nástroje. [38; 40; 41]

Tepelné opotřebení nastává při dlouhodobém vystavení nástroje vysokým teplotám, což vede ke změnám mikrostruktury a snížení mechanické odolnosti. Nedostatečné chlazení a nevhodné řezné parametry mohou tento jev významně urychlit. [38; 40; 41]



Obrázek 13 Příklad tepelné hřebenové trhliny

Zdroj: [39]

Únavové opotřebení souvisí s opakovaným cyklickým zatížením během vrtacího procesu. Mikrotrhliny, které se v materiálu vrtáku tvoří, vedou k jeho postupné degradaci a ke vzniku lomů. [38; 41]

2.1.2 Důsledky opotřebení vrtáků

Opotřebení vrtáků se negativně projevuje na přesnosti otvorů, kvalitě povrchu a stabilitě celého obráběcího procesu. Ztráta ostrosti břitů vede ke zvýšeným řezným silám, které mohou způsobit deformaci obrobku, přehřátí nástroje a snížení jeho životnosti. Typickými příznaky opotřebení jsou:

- zvýšená teplota v místě řezu
- hlučnější chod nástroje
- zvětšený průměr otvoru
- zhoršená drsnost povrchu otvoru
- nepravidelné otřepy nebo deformace výstupní hrany

V průmyslové praxi tyto jevy vedou ke zvyšování výrobních nákladů, prodloužení cyklových časů a vyšší četnosti výměn nástrojů. Zejména v sériové výrobě je tak klíčové zavádění preventivních opatření. [39; 40]

2.1.3 Prevence opotřebení vrtáků

Efektivní strategie proti nadměrnému opotřebení vrtáků zahrnují:

Optimalizace řezných podmínek – Řezná rychlost, posuv a hloubka řezu by měly být přizpůsobeny jak materiálu obrobku, tak geometrii a materiálu vrtáku. Překročení doporučených hodnot vede k nadměrnému teplu a zrychlení opotřebení. [38; 39]

Použití chladicích kapalin – Aplikace chladiva výrazně snižuje tření a odvádí teplo ze zóny řezu, což prodlužuje životnost nástroje. U moderních systémů se využívá vnitřní chlazení přímo skrze tělo vrtáku. [38; 40]

Vrstvení ochranných povlaků – Povlaky jako TiN (nitrid titanu), TiAlN (nitrid titanu a hliníku) nebo CrN (nitrid chromu) zvyšují tvrdost povrchu nástroje a jeho odolnost vůči opotřebení, teplotám a oxidaci. Umožňují také vyšší řezné rychlosti. [39; 40]

Pravidelná kontrola a údržba nástrojů – Včasné přebroušení břitů a výměna opotřebovaných nástrojů pomáhá udržet kvalitu výroby. V některých výrobních provozech se uplatňuje prediktivní údržba založená na sledování opotřebení pomocí snímačů a CNC monitoringu. [38; 40]

Použití adaptivního řízení – Pokročilé řídicí systémy sledují průběh vrtání v reálném čase a upravují parametry tak, aby bylo dosaženo maximální efektivity při minimálním opotřebení nástroje. [38; 40]

2.1.4 Aplikace v praxi

V automobilovém průmyslu se klade důraz na precizní vrtání otvorů pro ložiska, čepy a další funkční prvky, u nichž je nutné udržet úzké tolerance. Opotřebení vrtáku zde přímo ovlivňuje montážní přesnost a životnost komponent. V letectví se laserové nebo speciálně povlakované vrtáky používají pro vrtání titanu, nerezových slitin a kompozitů, kde je kromě odolnosti rozhodující i minimální poškození okolního materiálu. [17; 34]

S rozvojem nových materiálů a konstrukčních řešení (např. vícevrstvé kompozity nebo tvrzené oceli) roste význam moderních nástrojových materiálů a pokročilých strategií vrtání. Z tohoto důvodu je sledování a řízení opotřebení vrtáků jedním z klíčových faktorů udržitelné a efektivní strojírenské výroby. [39]

2.2 Metody měření opotřebení

Měření opotřebení nástrojů je nezbytné pro zajištění kvality obrábění, optimalizaci výrobních procesů a plánování údržby. Existuje několik metod, které umožňují analyzovat stupeň opotřebení a jeho vliv na funkčnost nástroje.

2.2.1 Vizuální inspekce

Vizuální kontrola je nejjednodušší a nejběžnější metodou měření opotřebení. Provádí se pomocí optických nástrojů, jako jsou lupy nebo mikroskopy, které umožňují zkoumat povrch nástroje a identifikovat viditelné změny, jako jsou opotřebované břity, praskliny nebo deformace. Tato metoda je rychlá a ekonomická, ale neposkytuje kvantitativní údaje o míře opotřebení. [42]

2.2.2 Měření geometrických změn

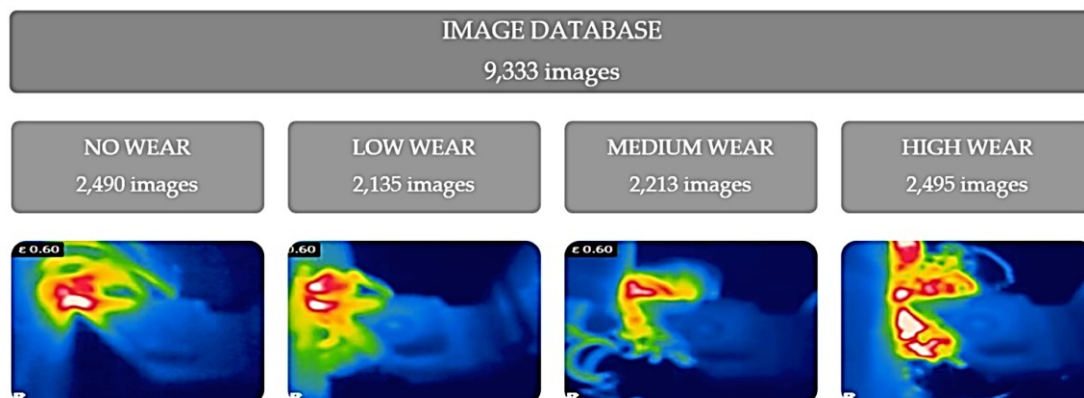
Měření změn v geometrii nástroje je jednou z nejpřesnějších metod hodnocení opotřebení. Provádí se pomocí specializovaných měřicích zařízení, jako jsou dotykové nebo bezdotykové profiloměry, souřadnicové měřicí stroje (CMM) nebo optické systémy. Tyto přístroje umožňují detailní snímání tvaru a rozměrů vrtáku, přičemž dokážou detekovat i velmi malé úbytky materiálu na řezných hranách, špičce či dalších kritických oblastech nástroje.[42]

Naměřené hodnoty lze následně porovnat s původní geometrií nástroje a vyhodnotit tak míru opotřebení. Tato data slouží nejen k vyhodnocení aktuálního stavu, ale i k predikci zbývající životnosti nástroje. Výhodou této metody je vysoká přesnost a opakovatelnost, avšak vyžaduje dostatečně přesné vybavení a často i časově náročnější přípravu měření. Uplatnění nachází zejména při kontrole nástrojů ve výrobních procesech s důrazem na kvalitu a dlouhodobou stabilitu obráběcího procesu. [42]

2.2.3 Termální analýza

Termální analýza je jednou z metod nepřímého sledování opotřebení, která využívá měření teplotních změn na povrchu nástroje během obrábění. Vznik tepla při řezání je běžný jev, ale výrazné zvýšení teploty může signalizovat nadměrné opotřebení, nesprávné řezné podmínky nebo nedostatečné chlazení. [43]

Pomocí termálních kamer nebo integrovaných senzorů lze teplotu sledovat v reálném čase, a tím včas identifikovat kritické stavy nástroje. Tyto systémy umožňují zásah dříve, než dojde k výraznému poškození nástroje nebo obrobku. Termální monitoring se tak stává důležitým prvkem prediktivní údržby, zejména u náročných nebo bezobslužných výrobních procesů. Jeho výhodou je bezkontaktní princip měření a možnost integrace do automatizovaných systémů řízení. [43]



Obrázek 14 Příklad měření zatížení nástroje v praxi termální kamerou

Zdroj: [43]

2.2.4 Sledování řezných sil

Řezné síly se zvyšují úměrně s opotřebením nástroje, protože otupený vrták klade větší odpor při pronikání do materiálu. Tento nárůst může vést k přetížení stroje a snížení kvality obrábění. Z toho důvodu jsou na moderních CNC strojích instalovány senzory, které průběžně sledují velikost sil působících na nástroj. [44]

Získaná data slouží k včasné detekci potřeby výměny nástroje a přispívají k plynulému a bezpečnému průběhu obráběcího procesu. Monitorování řezných sil je důležitým prvkem prediktivní údržby, zejména v sériové výrobě. [44]

2.2.5 Metody bezdotykového měření

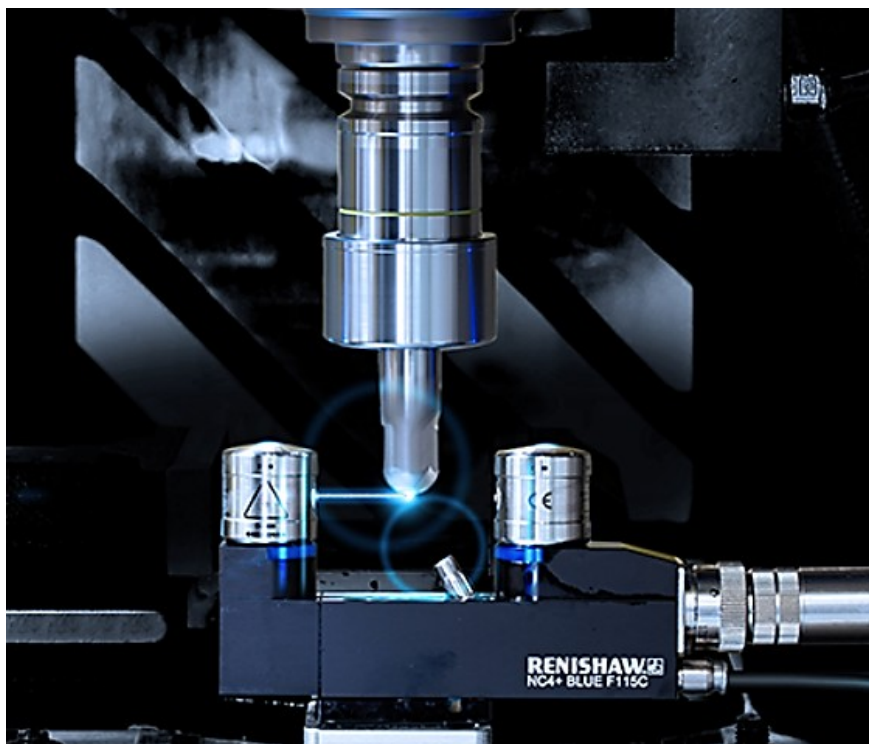
Bezdotykové technologie, jako je laserové skenování nebo ultrazvukové měření, představují moderní přístup ke sledování opotřebením nástrojů. Laserové skenování umožňuje velmi přesné snímání tvaru povrchu a odhalení i drobných změn v geometrii vrtáku, zatímco ultrazvuk je citlivý na vnitřní defekty nebo trhliny vznikající v důsledku únavy materiálu. [45]

Tyto metody nevyžadují přímý kontakt s nástrojem, čímž eliminují riziko poškození měřeného objektu. Díky své vysoké přesnosti jsou vhodné zejména pro detailní diagnostiku a výzkumné účely. Nevýhodou však zůstává jejich vyšší pořizovací cena a složitější obsluha, což omezuje jejich využití především na specializovaná pracoviště nebo laboratoře. [45]

2.2.6 Digitální monitoring

Moderní CNC stroje jsou dnes běžně vybaveny pokročilými systémy pro digitální monitorování nástrojů. Tyto systémy sledují klíčové parametry během obrábění, jako je teplota, vibrace, řezné síly nebo akustické emise, a dokážou automaticky vyhodnocovat míru opotřebení nástroje v reálném čase. [46]

Na základě těchto údajů může stroj obsluze signalizovat potřebu výměny nástroje, nebo v automatizovaném provozu sám upravit řezné podmínky či nástroj vyměnit. To výrazně přispívá k efektivnímu řízení údržby, zvyšuje stabilitu procesu a snižuje riziko poruchy nástroje během výroby. [46]



Obrázek 15 Automatizovaná nástrojová sonda

Zdroj: [47]

Součástí těchto systémů mohou být i automatizované nástrojové sondy, které přímo měří rozměrové změny nástroje nebo detekují náhlé odchylky ve výkonu. Takové systémy se využívají především v sériové a hromadné výrobě, kde je klíčové minimalizovat prostoje a maximalizovat využití strojního času. Měření opotřebení je zde zásadní nejen pro zajištění kvality výroby, ale i pro optimalizaci nákladů. Kombinace různých metod monitorování a měření tak poskytuje komplexní přehled o stavu nástroje a umožňuje přesné plánování jeho výměny nebo regenerace. [47]

3 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI

Teoretická část práce se zaměřuje na technologii vrtání v kontextu různých metod třískového obrábění, jejich principů, nástrojů a moderních inovací.

Popsán je základní princip vrtání, konstrukce a typologie vrtáků, včetně materiálů a povlakování, které zvyšuje jejich životnost a výkonnost. Dále se práce věnuje moderním metodám jako je termální a laserové vrtání, které přinášejí vyšší efektivitu a přesnost zejména v průmyslových aplikacích.

Významná část je věnována opotřebení vrtáků – jeho příčinám, důsledkům, preventivním opatřením a způsobům měření. Rozebírá se vliv abrazivního, adhezního, difuzního, únavového a tepelného opotřebení na funkci nástroje a kvalitu otvoru. Zmíněny jsou moderní metody monitoringu a měření opotřebení, které přispívají ke zvyšování produktivity a udržitelnosti výroby.

II PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI PRÁCE

Teoretická část bakalářské práce je zaměřena na objasnění klíčových pojmů a souvislostí týkajících se technologie vrtání. Podrobně popisuje faktory, které je nutné zohlednit při realizaci této technologické operace – včetně různých typů vrtání, použití vrtáků s odlišnými vlastnostmi a povlaky, i problematiky opotřebení nástrojů. Pozornost je věnována nejen příčinám a projevům opotřebení, ale i jeho detekci, prevenci a možnostem nápravy.

Praktická část práce je zaměřena na experimentální porovnání běžných šroubových vrtáků se stejnými geometrickými parametry, avšak pořízených od různých výrobců či dodavatelů. Navržené experimenty byly optimalizovány s cílem co nejvíce přiblížit reálným podmínkám použití a získat relevantní a opakovatelné výsledky pro další technické vyhodnocení.

4.1 Popis experimentu

Cílem experimentu bylo porovnat běžné šroubovitě vrtáky stejné geometrie, zakoupené od různých výrobců, z hlediska jejich chování při vrtání. V rámci zkoušek byly sledovány základní projevy opotřebení a posuzována kvalita vytvořených otvorů při zatížení odpovídajícím běžným podmínkám v praxi.

4.1.1 Použité vrtáky a materiál

V rámci úvodního záměru byly pro experiment zvoleny běžně dostupné spirálové vrtáky do oceli s válcovou stopkou dle normy DIN 338, které se běžně používají jak v domácích podmínkách, tak i v průmyslové praxi. Všechny testované nástroje byly vyrobeny z materiálu HSS (rychlořezná ocel), bez jakéhokoli povlakování či dalších úprav ovlivňujících jejich vlastnosti. Všechny vrtáky měly shodné geometrické rozměry – průměr 5 mm, celkovou délku 86 mm a pracovní délku 52 mm.

Pro srovnání byly vybrány čtyři různé značky HSS vrtáků uvedeného průměru. U jednotlivých vzorků byly sledovány rozdíly ve vzhledu, deklarovaných parametrech a pořizovací ceně.

První vrták (dále jako **Vrták 1**) pochází od značky Parkside, zakoupená v obchodě Lidl. Vrták má zlatou barvu, což běžně odpovídá standardnímu povlaku TiN (nitrid titanu). Pro účely experimentu byl proto klasifikován jako HSS nástroj s pravděpodobným TiN

povlakem. Vzhledem k omezenému výběru bylo nutné zakoupit celou sadu, jejíž cena činila 49,90 Kč.

Druhý vrták (dále jako **Vrták 2**) sada byla zakoupen v hobby marketu OBI. Jedná se o černěný vrták HSS pocházející od rakouského výrobce, opět dodávané v sadě šesti kusů. Cena celé sady činila 49 Kč.

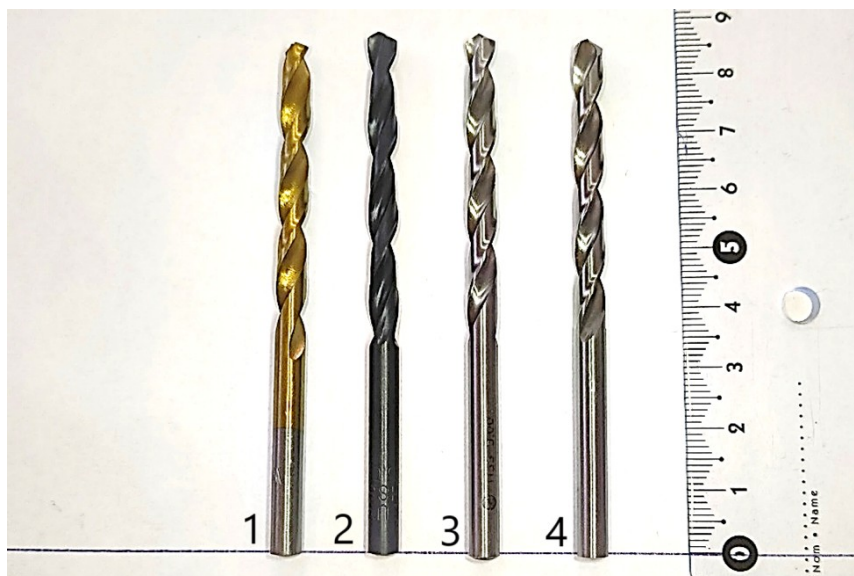
Třetí vzorek (dále jako **Vrták 3**) byl pořízen u firmy Kovonástroje s. r. o. ve Zlíně. Ze dvou dostupných variant (černý a vybrušovaný typ) byl pro testování zvolen vybrušovaný stříbrný vrták, a to z důvodu minimalizace shodného původu s černým typem z OBI. Cena za jeden kus byla 28 Kč.

Poslední vrták (dále jako **Vrták 4**) byl zakoupen u firmy ZPS – Frézovací nástroje a. s. Vrták stříbrné barvy odpovídal požadovaným parametrům a byl zvolen jako referenční vzorek vyšší kvality. Cena jednoho kusu činila 27 Kč.

Tabulka 1 Shrnutí vrtáků

	Vrták 1	Vrták 2	Vrták 3	Vrták 4
výrobce	Parkside	OBI Group Sourcing GmbH	česká výroba	ZPS-FN a.s.
materiál	ČSN 17 347	válcovaná řezná ocel	HSS	HSS
povlak	TiN	černěno	-	-
oblast použití	pro kovové plechy, lehké kovy, barevné kovy	do kovu – měď, hliník, zinek	šedé a tvárné litiny, oceli, bronz, hliník a jejich slitiny	vrtání a obrábění ocelí, litin, hliníku, mědi a jejich slitin
průměr (mm)	5	5	5	5
celková délka (mm)	84,5	86	86	86
délka řezné části (mm)	56	56	52	52
cena za ks (CZK+DPH)	8,40	8,20	28	27
dop. rozsah řez. podm.	$v_c = 20-30 \text{ m/min}$ $f = 0,1-0,2 \text{ mm/ot}$	$v_c = 15-25 \text{ m/min}$ $f = 0,11 \text{ mm/ot}$	$v_c = 25-30 \text{ m/min}$ $f = 0,1-0,125 \text{ mm/ot}$	$v_c = 30 \text{ m/min}$ $f = 0,1-0,125 \text{ mm/ot}$

Zdroj: [5; 48; 49; 50; 51]



Obrázek 16 Použité vrtáky

Zdroj: vlastní

Kromě samotných nástrojů bylo pro realizaci experimentu nutné zajistit i vhodný materiál, do kterého budou vrtáky obrábět. Na základě dohody byla zvolena pásovina z konstrukční oceli S355JR (dříve označovaná dle ČSN jako 11 523) s průřezem 80×30 mm. Tento materiál byl dodavatelem předem nařezán na polotovary délky 110 mm, které byly následně upraveny pro účely upnutí.

Do těchto polotovarů bylo nutné vytvořit otvory pro šrouby M6 se zápusťnou hlavou, aby bylo možné je bezpečně připevnit k měřicímu zařízení během experimentu. Výroba těchto otvorů probíhala vrtáním a frézováním pomocí CNC stroje DMU 50 v dílnách Fakulty aplikované informatiky.

DMU 50 3. generace je kompaktní 5osé CNC obráběcí centrum s pojezdy $650 \times 520 \times 475$ mm. Naklápěcí stůl se otáčí v rozsahu -35° až $+110^\circ$ a unese obrobky do 300 kg. Vřeteno dosahuje až 20 000 ot/min, standardní zásobník pojme 30 nástrojů. Díky přesnosti pod $6 \mu\text{m}$ je vhodný pro náročné aplikace. [52]



Obrázek 17 Vrtání děr do polotovaru s chladicí emulzí

Zdroj: vlastní

4.2 Měření mechanických vlastností vrtáků

Prvním porovnáním vlastností vrtáků bylo změření a vyhodnocení jejich mechanických vlastností. Jednalo se o použití zvolených vrtáků při vrtání děr do polotovarů CNC strojem a pak následné zachycení řezných sil v průběhu procesu a také finální pohledová kontrola vzhledu po vrtání. Pro zachycení řezných sil bylo použito měřící zařízení firmy Kistler, přesněji **dynamometr 9129A**, které umožňovalo sledování průběhu programu obrábění přímo na obrazovce počítače. Dynamometr byl připevněn k otočnému obráběcímu stolu CNC a propojen s počítačem kabelem vedoucím do speciálního adaptéru.

Dynamometr Kistler 9129A měří síly ve třech osách (F_x , F_y , F_z) až do ± 10 kN. Využívá piezoelektrické snímače pro přesné sledování řezných sil při obrábění. Je odolný vůči chladicím kapalinám. [53]

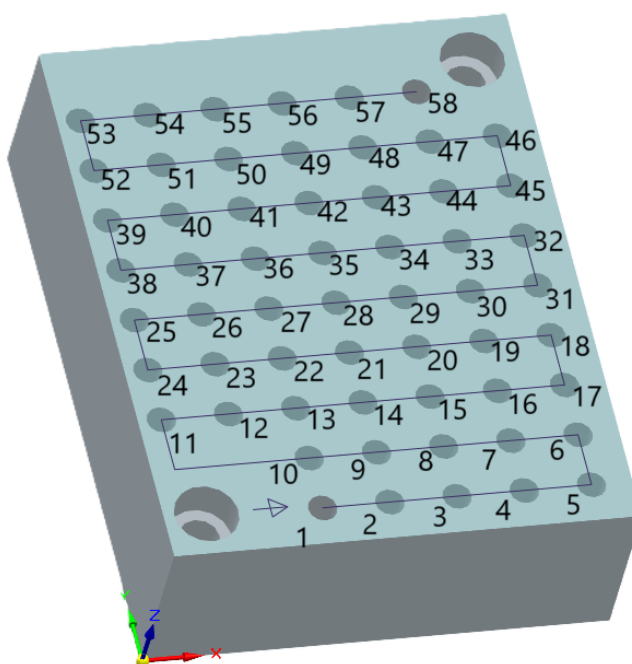
Před spuštěním měření bylo potřeba stanovit si řezné podmínky pro samotné obrábění. Při stanovování podmínek bylo zapotřebí brát v potaz mnoho různých faktorů, jak je vysvětleno v teoretické části. Hlavními kritérii byl materiál obrobku, typ a materiál vrtáku a v neposlední řadě samotný průměr vrtáku. Řezné podmínky byly převzaty z údajů dostupných na stránkách výrobců vrtáků 3 a 4 a z technických tabulek nalezených v oborových diskusních fórech. Tyto informace sloužily jako výchozí podklad, který byl

následně upraven technickým odhadem tak, aby stanovené podmínky co nejlépe odpovídaly zamýšlenému experimentálnímu zatížení a umožnily získání relevantních výsledků.

Řezné podmínky byly stanoveny:

- $v_c = 25 \text{ m/min}$
- $f = 0,1 \text{ mm}$
- bez chladicí emulze

Dalším důležitým krokem bylo vytvoření programu pro vrtání. Pracovalo se s možností, že hodnoty získané z obrábění jednoho polotovaru nebudou stačit a bude potřeba použít dva na jeden vrták, ale nakonec dvou nebylo zapotřebí. Po několika simulacích a technických odhadech, zohledňující celkovou obrobitelnou plochu polotovaru, mezery mezi dírami a také díry s upínacími šrouby, se docílilo programu vrtání s 58 dírami, s odhadovanou délkou 10 minut, které ovšem neprocházejí celým polotovarem, aby nedošlo k poškození měřicí desky.



Obrázek 18 Grafické zobrazení dráhy vrtáku

Zdroj: vlastní

Šipka ukazuje směr trajektorie a číslice jednotlivé pořadí. Před jeho spuštěním a prvním měřením byla provedena ještě zkouška programu, těsně nad plochou polotovaru, kvůli

potvrzení správného naprogramování dráhy, která se musela vyhnout všem kritickým místům.



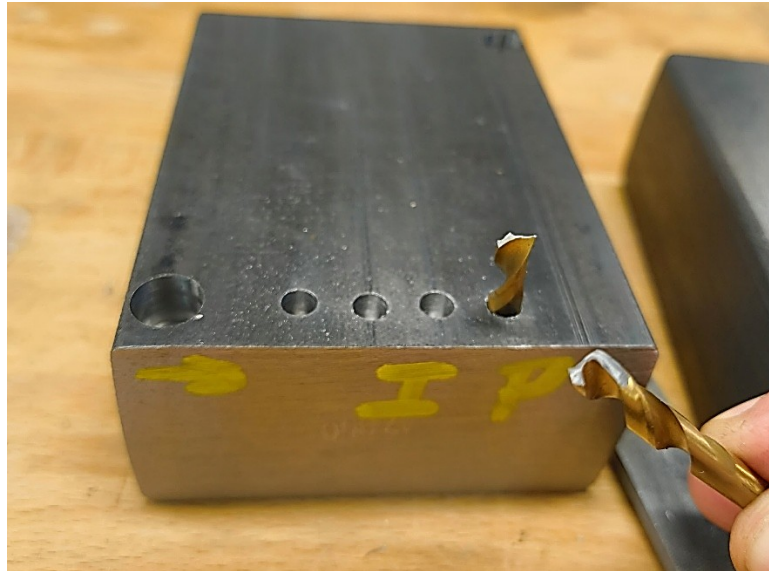
Obrázek 19 Dynamometrické zařízení Kistler

Zdroj: vlastní

4.2.1 Měření – Vrták 1

Před zahájením samotného obrábění bylo nutné vložit zvolený nástroj do zásobníku a zároveň jej zavést do systému stroje. Následně byla provedena kalibrace a změření délky vrtáku. Všechny vrtáky byly upnuty na stejnou délku, aby nedošlo ke zkreslení naměřených hodnot. Před spuštěním obráběcího programu byla rovněž provedena kontrola správného upnutí obrobku a nástroje, včetně ověření rozměrů a souřadnic polotovaru.

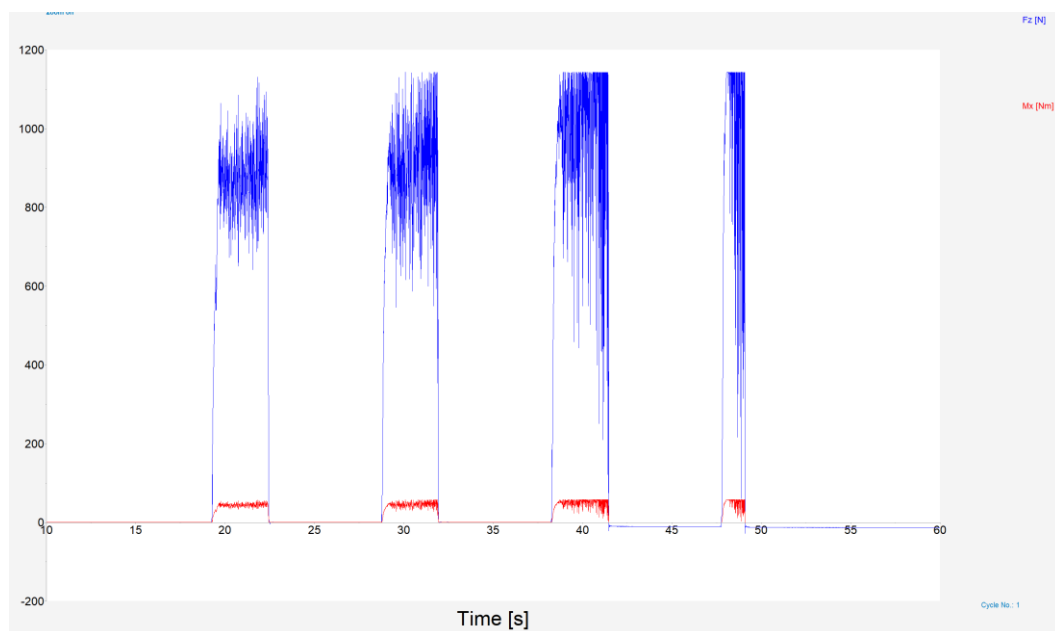
Po přípravě pracovního prostředí bylo spuštěno měření a následně i samotný program pro vrtání. Proces byl pečlivě monitorován, aby bylo možné v případě náhlého selhání nástroje ihned ukončit obrábění. Již od prvního vrtu byly zaznamenány vysoké hodnoty řezných sil. Po druhém otvoru se začal z místa řezu ozývat výrazný hluk, naznačující možné poškození nástroje. K jeho porušení skutečně došlo při vrtání čtvrté, nedokončené díry, a to za doprovodu výrazného hluku. Následně byl proces obrábění i záznam měření okamžitě ukončen.



Obrázek 20 Výsledek vrtání vrtákem 1

Zdroj: vlastní

Při následné kontrole bylo zjištěno, že došlo ke zlomení vrtáku přibližně v polovině jeho délky. Z průběhu obrábění je patrné postupné vychýlení nástroje z dráhy, které může souviset s jeho narůstajícím opotřebením. Pravděpodobnou příčinou selhání bylo nadměrné vnitřní pnutí v kombinaci s nedostatečnou kvalitou ostření. Tato domněnka je podpořena i vysokými hodnotami řezných sil zaznamenanými během měření. Na stěně obrobku byla vyznačena dráha obrábění pomocí šipky pro lepší vizuální orientaci.

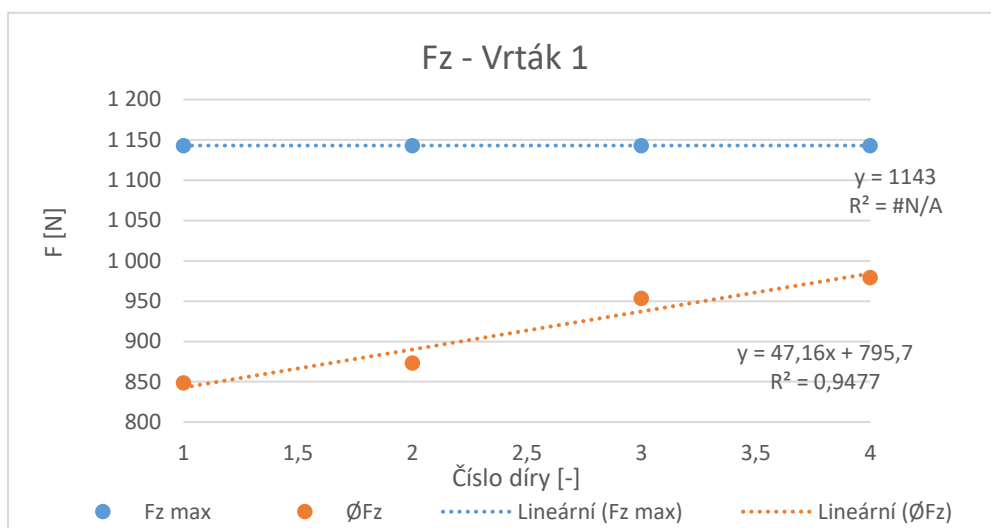


Obrázek 21 Vrtání vrtákem 1– graf z dynamometru

Zdroj: vlastní

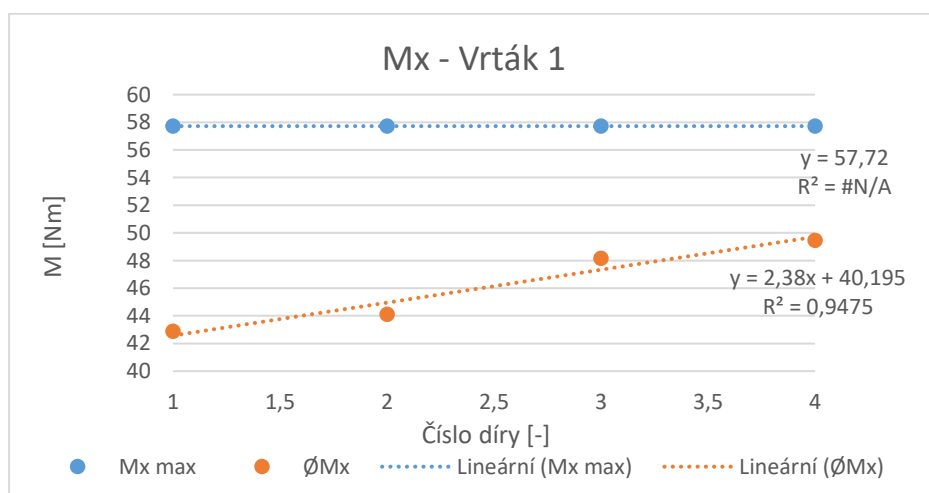
Naměřená data z měřicí desky byla pomocí specializovaného softwaru převedena do grafické podoby, která znázorňuje průběh jednotlivých vrtů a odpovídající hodnoty řezných sil. Na vodorovné ose (X) je vynesena čas v sekundách, na svislé ose (Y) pak velikost síly v newtonech. Modrá křivka představuje sílu F_z působící ve směru osy Z, tedy ve svislém směru kolmo na povrch obrobku. Červená křivka znázorňuje moment M_x působící vzhledem k ose X.

Z grafu je patrné, že při vrtání první díry dosahovala síla F_z hodnoty přibližně 900 N. U následných otvorů však síla výrazně překročila nastavený rozsah měření, čímž došlo k přesahu grafické stupnice, a proto není možné přesně určit maximální dosažené hodnoty.



Obrázek 22 Graf zobrazující F_z vrtáku 1

Zdroj: vlastní



Obrázek 23 Graf zobrazující M_x vrtáku 1

Zdroj: vlastní

V grafech je použita lineární spojnice trendu, která nejlépe vystihuje naměřené hodnoty, což potvrzuje i vysoká hodnota koeficientu determinace (R^2). Tento typ spojnice je vzhledem k malému počtu bodů vhodnou volbou. U hodnot F_z max nebylo možné stanovit R^2 , neboť všechny body mají stejnou hodnotu, a lineární regrese v tomto případě ztrácí smysl. Trend je dále popsán rovnicí spojnice.

Tabulka 2 Naměřené hodnoty – Vrták 1

Č. díry	1	2	3	4
F_z max (N)	1 143	1 143	1 143	1 143
$\bar{F}_z$ (N)	848,7	873,1	953,5	979,1
M_x max (Nm)	57,72	57,72	57,72	57,72
$\bar{M}_x$ (Nm)	42,87	44,1	48,16	49,45

Zdroj: vlastní

Výsledkem prvního měření jsou hodnoty uvedené v předchozí tabulce. Označení „max“ představuje nejvyšší zaznamenanou hodnotu dané veličiny, zatímco symbol $\bar{F}_z$ označuje průměrnou hodnotu síly vypočtenou z průběhu vrtání jednoho otvoru. Maximální hodnoty síly i momentu jsou ve všech případech shodné, což je způsobeno překročením horní hranice měřicí stupnice grafu – konkrétní extrémní hodnoty tedy nelze přesně určit.

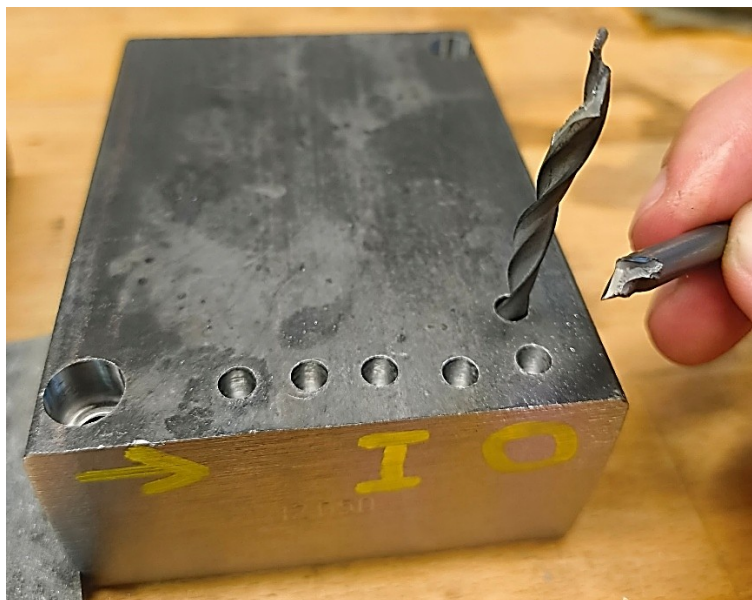
Z průměrných hodnot lze pozorovat trend postupného nárůstu jak řezné síly, tak momentu, což souvisí s narůstajícím opotřebením nástroje. Hodnoty momentu se mění v menší míře než hodnoty síly, což lze částečně přičíst i proměnné délce momentového ramene v průběhu procesu.

4.2.2 Měření – Vrták 2

Po upnutí nového vrtáku do sklíčidla bylo nutné nástroj zaregistrovat v systému CNC stroje a uložit jej na příslušnou pozici v nástrojovém zásobníku. Následně byla provedena kalibrace a proměření celkové a pracovní délky vrtáku.

Po spuštění obráběcího programu byl průběh vrtání zpočátku podobný jako u prvního experimentu. Naměřené hodnoty řezných sil z měřicí desky byly u prvních tří děr nižší než v předchozím případě. Po této fázi však došlo ke změně akustického projevu nástroje – vrták začal vydávat výrazně hlasitější zvuk, což signalizovalo jeho zvýšené opotřebení. Vizualní kontrolou bylo možné pozorovat změnu barvy povrchu nástroje z původní černé na zesvětlenou šedou, což může být důsledkem nadměrného zahřívání a následné degradace povrchové úpravy.

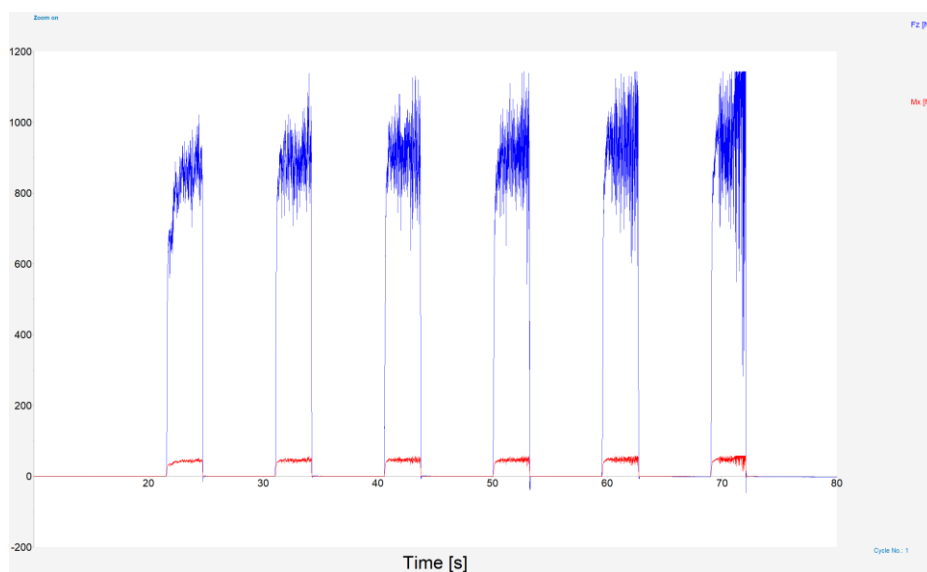
Vrtání pokračovalo až do šesté díry, kdy došlo k náhlému snížení hluchnosti, což bylo doprovázeno porušením vrtáku. Nejednalo se o klasické zlomení, ale spíše o torzní selhání – pracovní část nástroje se ukroutila těsně u oblasti upnutí.



Obrázek 24 Výsledek vrtání vrtákem 2

Zdroj: vlastní

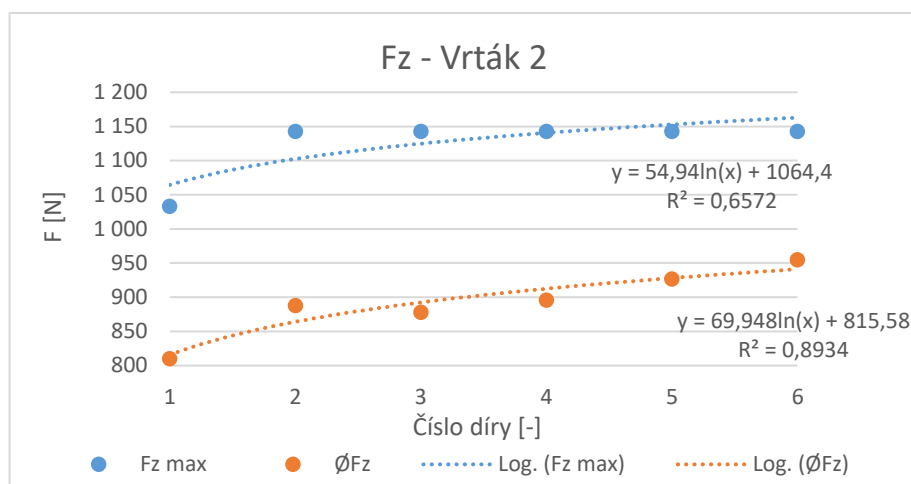
Po odšroubování materiálu z upínací desky bylo zřetelné, že vrták byl deformován ohybem nejvíce u čtvrté díry, ale také u dalších zhotovených děr bylo vidět vychýlení nástroje z naprogramované dráhy.



Obrázek 25 Vrtání vrtákem 2 – graf z dynamometru

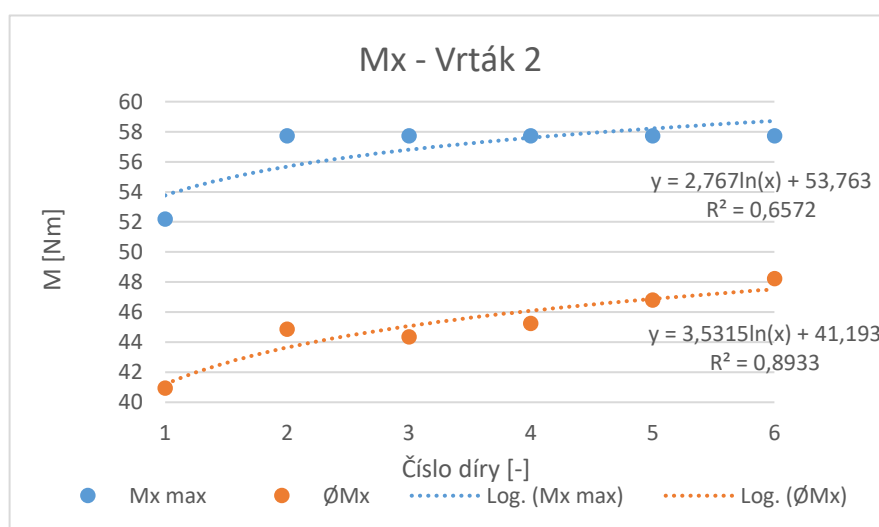
Zdroj: vlastní

Z grafického záznamu měření lze odhadnout počáteční hodnotu síly F_z u první vyvrtané díry přibližně v rozmezí 800 až 900 N. V průběhu následujících dvou vrtů je patrný pozvolný nárůst této síly, což ukazuje na postupné opotřebení nástroje. Od třetího vrtu však došlo k výraznému zvýšení řezné síly, která následně přesáhla měřitelné rozmezí přístroje, obdobně jako tomu bylo u vrtáku 1.

Obrázek 26 Graf zobrazující F_z vrtáku 2

Zdroj: vlastní

V grafu lze pozorovat nižší hodnota $F_z \text{ max}$ první díry v porovnání se zbytkem vrtů. Při pohledu na hodnoty $\emptyset F_z$ se dá sledovat očekávaný pozvolný nárůst hodnot s vyšším počtem vyvrtaných děr.

Obrázek 27 Graf zobrazující M_x vrtáku 2

Zdroj: vlastní

Pro grafy vrtáků 2, 3 a 4 byla jako nejvhodnější zvolena logaritmická spojnice trendu, jež nejlépe odpovídá průběhu dat s vyšším počtem měřených hodnot.

Na grafickém záznamu momentu M_x lze pozorovat obdobný trend jako u síly F_z , a to jak z hlediska maximálních, tak průměrných hodnot. S rostoucím počtem vyvrtaných otvorů dochází k postupnému zvyšování hodnot momentu, což souvisí s narůstajícím opotřebením nástroje a zvýšeným odporem materiálu při obrábění.

Tabulka 3 Naměřené hodnoty – Vrták 2

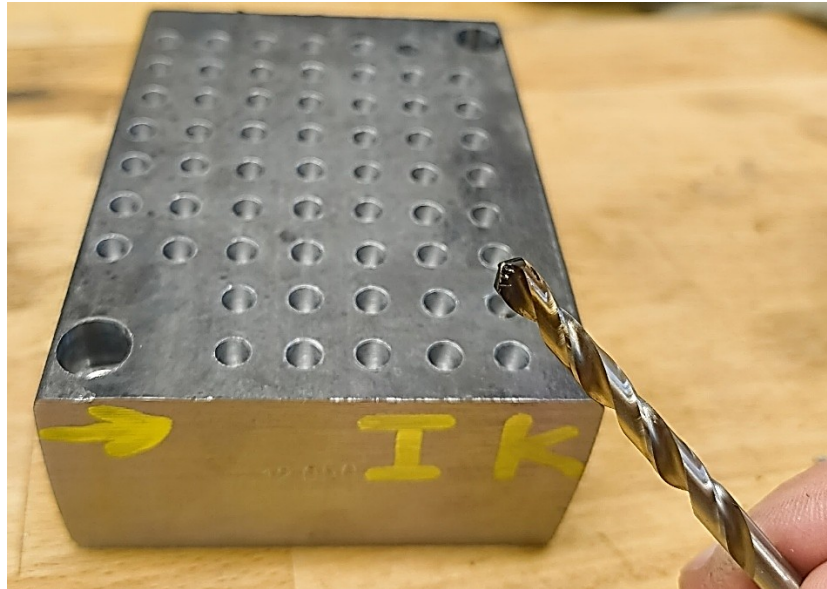
Č. díry	1	2	3	4	5	6
$F_z \text{ max (N)}$	1 033	1 143	1 143	1 143	1 143	1 143
$\bar{F}_z \text{ (N)}$	810,3	888,1	878,2	895,8	926,6	954,7
$M_x \text{ max (Nm)}$	52,18	57,72	57,72	57,72	57,72	57,72
$\bar{M}_x \text{ (Nm)}$	40,93	44,85	44,35	45,24	46,8	48,22

Zdroj: vlastní

Hodnoty uvedené v tabulce potvrdily a zpřesnily odhady získané z grafických záznamů. Lze zde rovněž sledovat drobné odchylky od jinak postupně rostoucí tendence, například v případě průměrné hodnoty $\bar{F}_z$ u třetího vrtu, což může být způsobeno krátkodobou změnou v chování nástroje nebo nepravidelností v materiálu obrobku.

4.2.3 Měření – Vrták 3

Po důkladném očištění pracovního prostoru a upínací desky byl Vrták 3 vložen do zásobníku stroje, následně kalibrován a přeměřen. Již před spuštěním měření se předpokládalo, že výsledky se budou výrazně lišit od předchozích dvou případů. Tento předpoklad se po spuštění programu potvrdil – obrábění vrtákem 3 probíhalo znatelně tišeji a bez komplikací, přičemž bylo úspěšně vyhotoveno všech 58 naprogramovaných otvorů. Po celou dobu nebyly zaznamenány žádné chyby, a to jak během samotného vrtání, tak ani v záznamu dat dynamometrem.

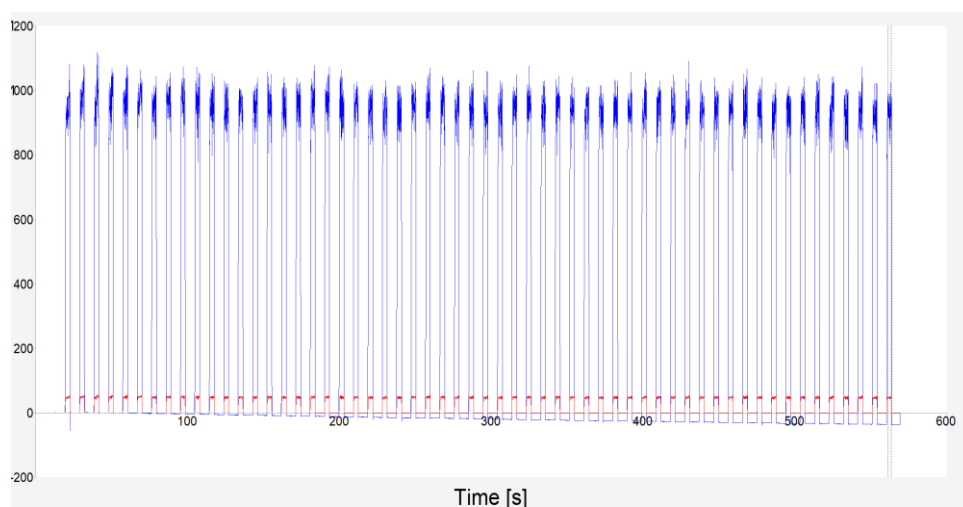


Obrázek 28 Výsledek vrtání vrtákem 3

Zdroj: vlastní

Po pohledové kontrole obrobku a vyvrtaných děr byly ohodnoceny jako kvalitní a žádná viditelná porušení nebyla vidět. To se nedá říct o vrtáku 3, jehož špička je viditelně spálená vznikem velkého množství tepla za působení nadměrného tření vrtáku a stěny díry z důvodu nepoužití chladicí emulze.

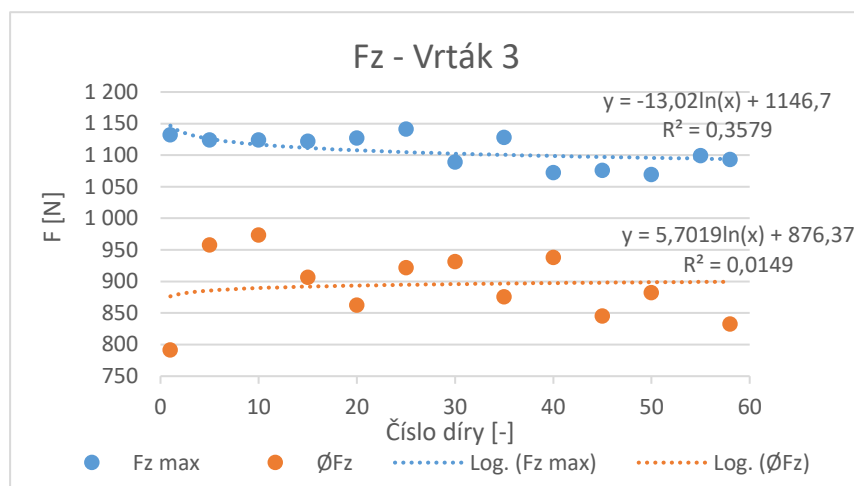
Při bližším prozkoumání jednoho čelního břitu nástroje je možné pozorovat díru po odlomené části břitu, což může být způsobeno přílišným pnutím v čele nástroje nebo zvětšujícím se vnějším opotřebením.



Obrázek 29 Obrábění vrtákem 3 – graf z dynamometru

Zdroj: vlastní

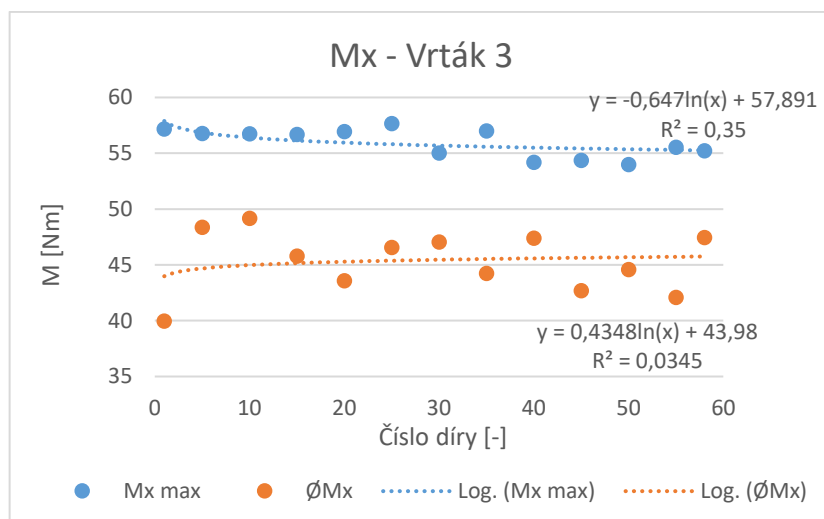
Z grafického záznamu dynamometru lze průměrnou hodnotu síly F_z odhadnout na přibližně 900 až 1000 N. Naměřené hodnoty působí celkově stabilně, s pouze drobnými odchylkami. V části grafu pod časovou osou se však objevují záporné hodnoty síly F_z , což lze pravděpodobně vysvětlit postupným snižováním zatížení měřicí desky v důsledku úbytku materiálu během obrábění. Pokud by se tyto absolutní hodnoty zahrnuly do výsledků, bylo by možné pozorovat mírně vzestupný trend naměřených sil.



Obrázek 30 Graf zobrazující F_z vrtáku 3

Zdroj: vlastní

Vzhledem k velkému množství získaných dat byla pro tvorbu grafu vybrána každá pátá hodnota, doplněná o první a poslední měření (Tabulka 4). Na první pohled se hodnoty jeví jako stabilní a pohybují se v úzkém rozmezí. Výraznější odchylky lze přičíst postupnému úbytku materiálu během vrtání, což ovlivnilo zatížení měřicí desky. Tento efekt se u předchozích vrtáků neprojevil, jelikož byly vyvrtány pouze jednotky děr.



Obrázek 31 Graf zobrazující Mx vrtáku 3

Zdroj: vlastní

Obdobně jako u grafu Fz se i tady hodnoty Mx max drží blízko lineární křivce trendu. U průměrných hodnot je viditelné větší rozptýlení hodnot od spojnice trendu, a to jak u Fz tak i u Mx.

Tabulka 4 Naměřené hodnoty použité pro grafy – Vrták 3

Č. díry	1	5	10	15	20	25	30
Fz max (N)	1 132	1 124	1 124	1 122	1 127	1 141	1 089
ØFz (N)	791	958	973,2	906,5	863	921,9	931,4
Mx max (Nm)	57,2	56,8	56,74	56,67	56,9	57,64	55,02
ØMx (Nm)	40	48,4	49,15	45,79	43,6	46,56	47,05
Č. díry	35	40	45	50	55	58	
Fz max (N)	1 128	1 072	1 076	1 069	1 099	1 093	
ØFz (N)	875,3	938	845	882	832,5	939	
Mx max (Nm)	56,99	54,2	54,4	54	55,53	55,2	
ØMx (Nm)	44,22	47,4	42,7	44,6	42,07	47,4	

Zdroj: vlastní

V tabulce, i když je jen částí všech získaných hodnot, jsou přehledně vidět nepatrné změny maximálních hodnot Mx a Fz a také různorodost hodnot průměrných.

4.2.4 Měření – Vrták 4

Jako poslední proběhl experiment za použití vrtáku 4. Od počátku plánování experimentu byl tento vrták, kvůli pozitivním recenzím firmy ZPS, co se kvality týče, odhadován jako jeden z nejlepších a bylo předpokládáno, že to potvrdí i výsledky měření.

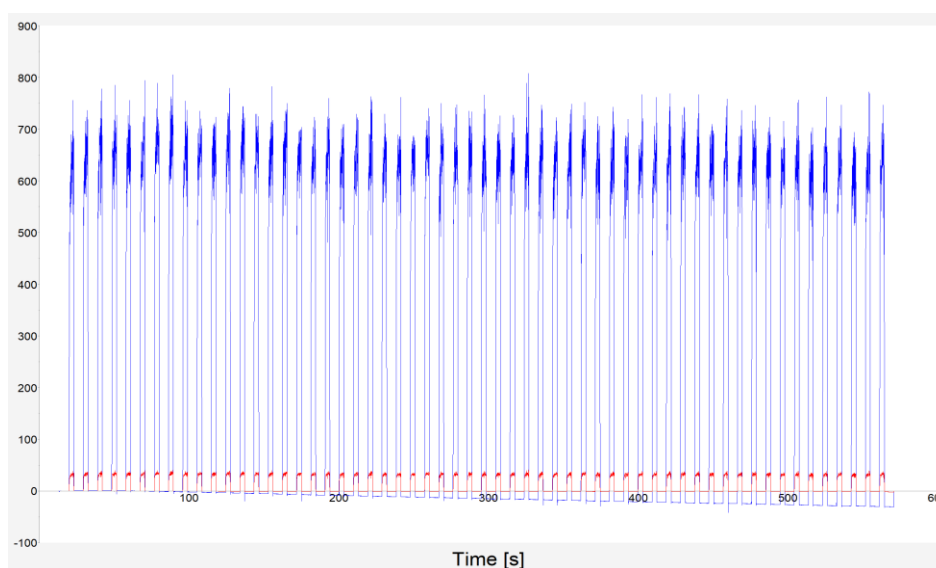
Po vložení a kalibraci nástroje bylo spuštěno měření a obráběcí program.



Obrázek 32 Výsledek vrtání vrtákem 4

Zdroj: vlastní

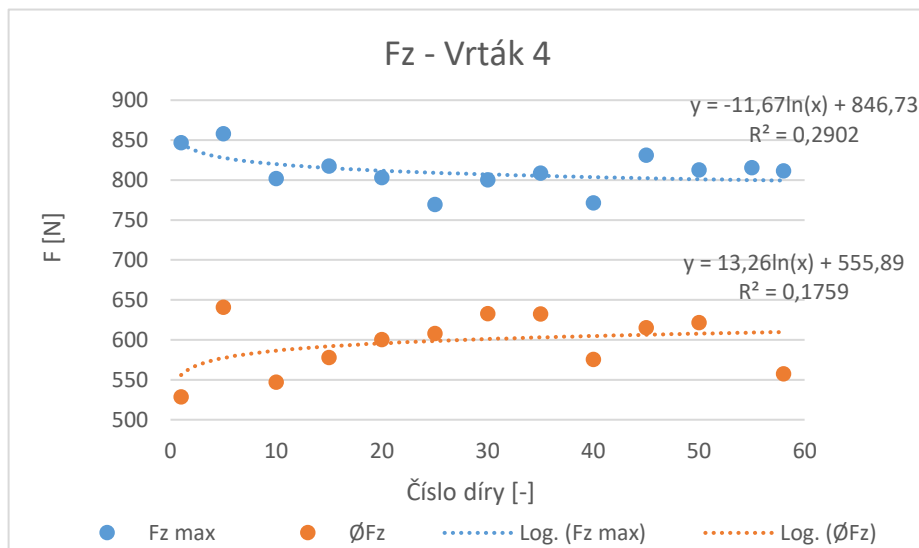
Obrábění pomocí vrtáku 4 probíhalo s nejnižší hlučností ze všech testovaných nástrojů a bez jakýchkoli komplikací. Všechny 58 naprogramovaných děr bylo vyvrtáno s vysokou přesností a vizuálně dobrou kvalitou. Na čelní části vrtáku je patrné mírné zabarvení způsobené zvýšenou teplotou, avšak v menší míře než u vrtáku 3. Při kontrole nebyly zjištěny žádné známky poškození, jako jsou ulomené části břitů, změny geometrie nebo jiné mechanické vady.



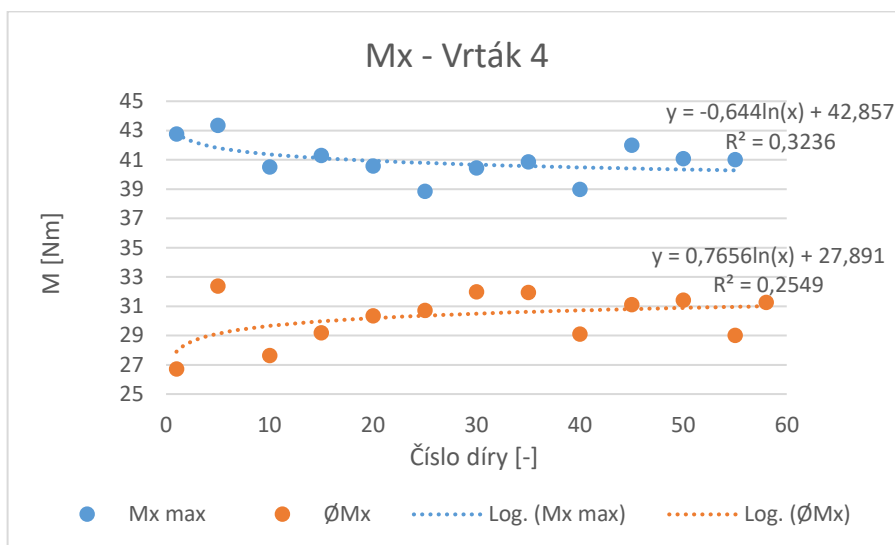
Obrázek 33 Vrtání vrtákem 4 – graf z dynamometru

Zdroj: vlastní

V porovnání s předchozími grafy řezných sil je okamžitě viditelná změna hodnot na svislé ose a tím pádem také přibližná velikost hodnot F_z . Lze odhadovat, že hodnoty $\emptyset F_z$ se budou pohybovat kolem čísel 600 až 700 N.

Obrázek 34 Graf zobrazující F_z vrtáku 4

Zdroj: vlastní

Obrázek 35 Graf zobrazující M_x vrtáku 4

Zdroj: vlastní

Na grafech je přehledně vidět přibližná linearita hodnot, a tedy úzké rozmezí, ve kterém se hodnoty F_z a M_x pohybují. V porovnání s předešlými grafy vrtáku 3 je možné zaznamenat rapidní pokles maximálních i průměrných hodnot, což vypovídá o kvalitě výroby i dokončovacích operacích při výrobě vrtáku.

Tabulka 5 Naměřené hodnoty použité pro grafy – Vrták 4

Č. díry	1	5	10	15	20	25	30
Fz max (N)	847	858,2	802,1	817,5	803,2	769,3	800,4
ØFz (N)	528,7	640,9	547	577,8	600,5	608,1	632,9
Mx max (Nm)	42,76	43,34	40,51	41,28	40,57	38,85	40,43
ØMx (Nm)	26,7	32,36	27,62	29,18	30,33	30,71	31,97
Č. díry	35	40	45	50	55	58	
Fz max (N)	808,9	771,4	831,3	812,8	815,7	811,4	
ØFz (N)	632,4	575,6	615,3	621,6	557,4	618,5	
Mx max (Nm)	40,86	38,97	41,99	41,06	41,21	41	
ØMx (Nm)	31,94	29,08	31,09	31,4	29,01	31,25	

Zdroj: vlastní

Tabulka zachycuje konkrétní hodnoty řezných sil, které byly následně využity pro sestavení grafů znázorňujících vývoj řezných sil v závislosti na počtu vyvrtaných děr. Hodnoty jsou vzájemně velmi blízké, což poukazuje na stabilní průběh procesu po celou dobu obrábění.

4.3 Namáhání vrtáků na ohyb

Dalším měřením pro zjištění nejlepších vlastností bylo konkrétně napětí v ohybu vrtáků. Pro měření napětí v ohybu byl použit univerzální zkušební stroj **ZwickRoell Z020** s maximální zkušební silou 20 kN. Zařízení umožňuje zkoušky v tahu, tlaku i ohybu a je ovládáno softwarem testXpert. Celkové rozměry zkušebního stroje jsou 2012 × 630 mm, pracovní šířka činí 420 mm a hmotnost přibližně 150 kg. [54]

K provedení zkoušky bylo nezbytné využít speciální přípravek ve tvaru profilu „L“. V jeho základně byl zhotoven otvor pro upevnění ke zkušebnímu zařízení šroubem, zatímco ve svislé části byl vytvořen otvor o průměru 5 mm určený pro zasunutí zkušebního vrtáku.



Obrázek 36 Sestava zkušebního stroje

Zdroj: vlastní

Principiálně šlo o jednoduchou zkoušku, kdy byl vrták vložen do přípravku tak, aby odpovídal upnutému vrtáku při obrábění. To znamená, že délka upnuté části byla 30 mm. Poté byl na špičku vrtáku vyvíjen tlak trnem, což způsobovalo deformaci vrtáku a poté i jeho zlomení. Průběh a nahrávání celého procesu měření bylo řízeno zmíněným programem testXpert.

Před měřením bylo nutné pečlivě upnout přípravek i trn k lyžinám stroje. Před zahájením zkoušky bylo nezbytné zadat do softwaru všechna klíčová kritéria, jako jsou rozměry vrtáku, typ namáhání a maximální hloubku zasunutí trnu. U každého vloženého vrtáku bylo nutné ověřit délku upínané části, která měla činit 30 mm. Teprve poté bylo možné přistoupit k provedení ohybové zkoušky.

Tabulka 6 Hodnoty získané z ohybové zkoušky

	E [lo mod]	Síla při 0.2% plastické deformace	F [lo max]	dL při F [lo max]	F [lo lom]	dL lom.	d [lo 0]	S [lo 0]
Čís.	[GPa]	[N]	[N]	[mm]	[N]	[mm]	[mm]	[mm ²]
Vrták 4	40,2	-	403	13,8	403	13,8	5	19,63
Vrták 3	39,8	358	404	16,2	403	16,2	5	19,63
Vrták 2	17,9	-	102	7,1	97,1	7,1	5	19,63
Vrták 1	20,2	151	191	20,7	-	-	5	19,63

Zdroj: vlastní

Díky softwaru byly změřeny následující hodnoty. Modul pružnosti **E [lo mod]** vyjadřuje tuhost materiálu v pružné oblasti a je udáván v jednotkách GPa. **Síla při 0,2% plastické deformaci** odpovídá mezi kluzu $R_{p0.2}$. Maximální dosažená síla **F [lo max]** představuje mezní pevnost materiálu, přičemž odpovídající průhyb je zaznamenán jako **dL při F [lo max]**. Síla při lomu **F [lo lom]** označuje okamžik přetržení vzorku, jehož konečný průhyb je zaznamenán jako **dL lom**. Dále byl stanoven počáteční průměr zkušební části **d [lo 0]** a výchozí průřezová plocha vzorku **S [lo 0]**.



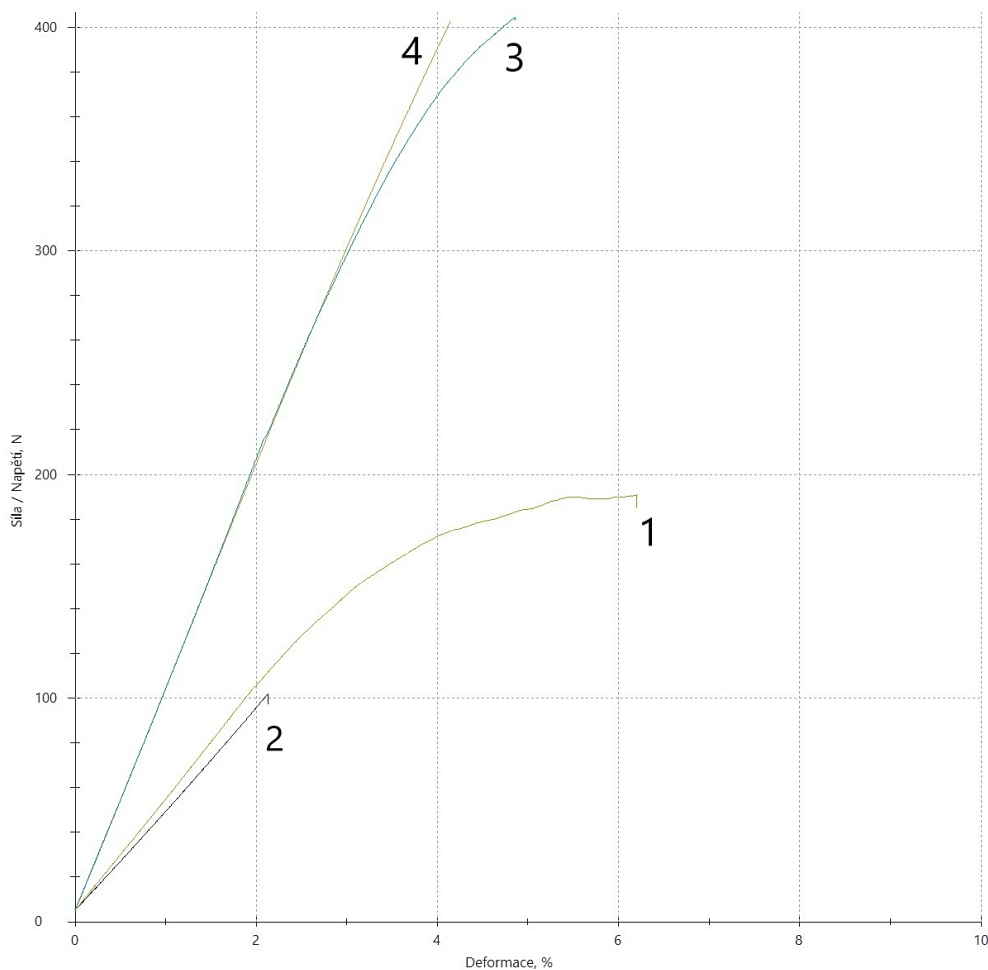
Obrázek 37 Vrtáky po jejich namáhání na ohyb

Zdroj: vlastní

Naměřené výsledky odpovídaly očekáváním. Nejvyšší hodnotu modulu pružnosti vykázal Vrták 4, přičemž Vrták 3 dosáhl jen o čtyři desetiny nižší hodnoty. S velikostí modulu pružnosti souvisí i maximální dosažená síla před porušením vzorku. Místo lomu se ve většině případů nacházelo v blízkosti oblasti upnutí, což bylo vzhledem k charakteru namáhání předpokládáno.

Za určitý výjimečný se případ lze považovat Vrták 1, který se během zatěžování nezlomil. Nejvyšší síla působící na tento vzorek dosáhla hodnoty 191 N, přičemž při této zátěži došlo k posunutí namáhaného bodu až o 20,7 mm. Vzhledem k nastaveným podmínkám zkoušky, konkrétně omezení maximálního posunu trnu, nebylo možné pokračovat v deformaci až do lomu. Po odstranění zatížení byla na vrtáku patrná trvalá deformace.

Toto chování může souviset s nižší pevností materiálu ve srovnání s ostatními vzorky nebo s přítomností povrchového povlaku TiN. K ověření těchto předpokladů by bylo vhodné provést další analýzy, například pomocí spektrometrie nebo jiných materiálových testů.



Obrázek 38 Graf průběhu namáhání na ohyb

Zdroj: vlastní

5 DISKUZE O VÝSLEDČÍCH

Všechna provedená měření během experimentu poskytla důležité informace a hodnoty potřebné pro porovnání a vyhodnocení zkušebních vrtáků.

Tabulka 7 Shrnující tabulka experimentu

	Vrták 1	Vrták 2	Vrták 3	Vrták 4
cena za ks [Kč]	8,40	8,20	28	27
počet vyvrtaných děr	3	5	58	58
nejvyšší síla σ_F [N]	979,1	954,7	981	654,7
cena za díru [Kč]	2,80	1,64	0,48	0,47
nejvyšší síla namáhání v ohybu [N]	191	101	404	403

Zdroj: vlastní

V tabulce jsou uvedeny vybrané hodnoty naměřené a vypočtené v rámci celého experimentu. Hypotéza formulovaná v počáteční fázi plánování byla do určité míry potvrzena, a to zejména z hlediska pořadí vrtáků podle jejich mechanických a funkčních vlastností. Během testování však došlo i k několika neočekávaným výsledkům, například v počtu vyvrtaných otvorů u vrtáků 1 a 2 nebo v pružnosti vrtáku 1.

Naopak vrtáky 1 a 2 jsou z hlediska kvality na nižší úrovni, což se projevilo vyšší pravděpodobností lomu a kratší životností. Tyto typy jsou však běžně dostupné a často volené z důvodu nižší ceny a dostupnosti v sadách. S ohledem na výsledky experimentu lze jejich použití doporučit spíše pro měkké konstrukční oceli a méně náročné aplikace.

Na základě komplexního vyhodnocení lze označit Vrták 4 za nejkvalitnější ze všech testovaných vzorků. Vzhledem k jeho vlastnostem je vhodný nejen pro sériovou výrobu, ale také pro náročnější domácí použití, a to i s ohledem na poměr výkon/cena, který se ukázal být velmi příznivý. Vrták 3 rovněž dosahoval srovnatelných parametrů, a proto jej lze považovat za vhodnou alternativu.

Zkouška namáhání na ohyb odhalila významné rozdíly v chování jednotlivých vrtáků při mechanickém zatížení mimo osu. Zatímco většina vrtáků při testu praskla, vrták 1 prokázal vyšší míru pružnosti a odolal lomu, čímž naznačil nižší křehkost materiálu. Tento výsledek může souviset s jeho složením nebo tepelným zpracováním, zároveň však může znamenat nižší tuhost při vrtání. Zkouška tak doplnila celkové hodnocení nástrojů o další užitečný pohled na jejich mechanickou odolnost.

Při zpracování grafických výstupů byly použity spojnice trendu, které napomáhají lepší interpretaci měřených hodnot. V případě vrtáků 2, 3 a 4 byla zvolena logaritmická spojnice trendu, jež navzdory méně výraznému průběhu nejlépe vystihovala charakter dat. Obecně platí, že přesnost těchto trendů by mohla být zvýšena rozšířením rozsahu měření, zpřesněním podmínek testování a optimalizací vstupních parametrů.

Z pohledu autora se jako nejvhodnější varianta jeví Vrták 4. Přestože jeho pořizovací cena může některé uživatele odradit, výsledky experimentu jednoznačně ukázaly, že při dodržení správných řezných podmínek představuje tento vrták efektivní a dlouhodobě výhodnou investici. Kromě výborného poměru mezi výkonem a životností vynikal také stabilním chováním při zátěži, a proto lze jeho použití doporučit i v náročnějších provozních podmínkách.

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se věnovala technologii vrtání, a to jak z teoretického, tak praktického hlediska. V úvodní části byly popsány principy vrtání, konstrukce vrtáků, řezné podmínky, opotřebení nástrojů a moderní technologie, jako je termální nebo laserové vrtání. Zvláštní pozornost byla věnována také významu povlakování vrtáků a jeho vlivu na životnost a výkon nástroje.

V praktické části proběhlo experimentální porovnání několika běžně dostupných vrtáků stejného průměru. Měření probíhala jak při samotném procesu vrtání, tak i pomocí ohybové zkoušky, která umožnila vyhodnotit mechanické vlastnosti nástrojů. Cílem bylo přiblížit se běžné praxi a ověřit chování vrtáků v podmínkách odpovídajících skutečnému použití.

Výsledky měření ukázaly rozdíly mezi jednotlivými nástroji a přispěly k lepšímu pochopení jejich vlastností. Práce tak nabízí přehledný pohled na to, co vše ovlivňuje výběr vhodného vrtáku pro konkrétní aplikaci.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] VEPŘEK, Petr. *Tváření za studena*. Online. 2016. Dostupné také z: <https://www.ssrs.cz/data/files/vrtani-celkove-dokonale-k6ok5r6zo7.pdf>.
- [2] *Podstata vrtání*. Online. STEELTEC.CZ. 2021. Dostupné z: <https://www.steeltec.cz/podstata-vrtani/>. [cit. 2025-05-10].
- [3] HALAJ, Peter. *Optimální otáčky při vrtání*. Online. HERMANTOOLS.CZ. 2024. Dostupné z: <https://www.hermantools.cz/blog/optimalni-otacky-pri-vrtani?page=all>. [cit. 2025-05-10].
- [4] *Geometrie břitů vrtáků*. Online. TumliKOVO.cz. 2010. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/geometrie-britu-vrtaku/>. [cit. 2025-05-10].
- [5] *Doporučené řezné podmínky vrtáků*. Online. TumliKOVO.cz. 2011. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/doporucene-rezne-podminky-vrtaku/>. [cit. 2025-05-10].
- [6] *T-A Průvodce použitím VBD*. Online. M&V spol.s r.o., divize STIMZET. 2015. Dostupné z: https://stimzet.cz/AMEC_WEB/data_amec/amec_tech_pruvodce_pouziti.html. [cit. 2025-05-05].
- [7] *BTA Drilling system*. Online. In: BTA BORE. 2024. Dostupné z: <https://www.btabore.co.uk/>. [cit. 2024-12-17].
- [8] *Co je CNC vrtání: Typy, proces a klíčové techniky?* Online. Want.net. 2024. Dostupné z: <https://want.net/cs/what-is-cnc-drilling-types-process-key-techniques/>. [cit. 2025-05-05].
- [9] *Vrtáky – Vrtací nástroje*. Online. Gühring. 2024. Dostupné z: <https://guehring.com/cs/products/drilling-tools/>. [cit. 2025-05-05].
- [10] *Vrtáky: jak se v nich vyznat*. Online. Alza.cz. 2021. Dostupné z: <https://www.alza.cz/vrtaky-jak-se-v-nich-vyznat>. [cit. 2024-12-17].
- [11] *Nástroje na vrtání*. Online. ELUC. 2015. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/lekce/nastroje-na-vrtani>. [cit. 2025-05-09].
- [12] *Středící vrták vybrušovaný, tvar A, 60°*. Online. Naradionline.cz. 2025. Dostupné z: <https://www.naradionline.cz/stredici-vrtak-vybrusovany-tvar-a-60.html>. [cit. 2025-05-09].

- [13] TECHNIKA A TRH. *Frézování a vrtání houževnatých materiálů*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.technikaatrh.cz/obrabeni/frezovani-a-vrtani-houzevnatych-materialu>. [cit. 2024-12-15].
- [14] *Vrtáky a vrtání: co by měl každý začínající kutil vědět 1*. Online. KUTIL.CZ. 2016. Dostupné z: <https://www.kutil.cz/vyber-naradi/vrtaky-a-vrtani-co-by-mel-kazdy-zacinajici-kutil-vedet-1/>. [cit. 2025-05-09].
- [15] STROJAŘSKÁ BIBLE. *Povlakování*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.strojarskabible.cz/povlakovani/>. [cit. 2024-12-15].
- [16] *PVD povlakování nástrojů STIMZET*. Online. M&V, SPOL. S.R.O. STIMZET. 2023. Dostupné z: https://www.stimzet.cz/data/povlakovani_cz.html. [cit. 2024-12-17].
- [17] MMSPEKTRUM. *Povlakování a životnost nástroje*. Online. 2010. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/povlakovani-a-zivotnost-nastroje>. [cit. 2024-12-15].
- [18] *Přehled sférického prášku ze slitiny niklu a titanu*. Online. Metal 3DP. 2025. Dostupné z: <https://met3dp.com/cz/niti-powder-overview/>. [cit. 2025-05-05].
- [19] *Jak vybrat správné povlakování nástroje?* Online. BO-IMPORT. 2025. Dostupné z: <https://www.bo-import.cz/jak-vybrat-spravne-povlakovani-nastroje-p1146061/>. [cit. 2025-05-05].
- [20] *Prášek karbidu titanu*. Online. Metal 3DP. 2025. Dostupné z: <https://met3dp.com/cz/titanium-carbide-powder-20240117/>. [cit. 2025-05-05].
- [21] *BALDIA*. Online. Oerlikon.com. 2025. Dostupné z: <https://www.oerlikon.com/balzers/cz/cs/portfolio/balzers-surface-solutions/povlaky-na-bazi-pvd-a-pacvd/baldia/>. [cit. 2025-05-05].
- [22] *CrN-based coatings*. Online. Oerlikon.com. 2025. Dostupné z: <https://www.oerlikon.com/balzers/us/en/portfolio/balzers-surface-solutions/pvd-and-pacvd-based-coating-solutions/balinit/crn-based-coatings/>. [cit. 2025-05-05].
- [23] NAGYPÁL, Herman. *Vrtáky HSS: jak se zorientovat?* Online. In: HERMAN. 2023. Dostupné z: <https://www.hermantools.cz/blog/vrtaky-hss-jak-se-zorientovat>. [cit. 2025-05-01].

- [24] MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Frézování a vrtání houževnatých materiálů*. Online. 2013. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/technicke-novinky/frezovani-a-vrtani-houzevnaty-ch-materialu>. [cit. 2024-12-15].
- [25] *PVD coating or CVD coating? How to choose?* Online. WT CARBIDE. 2024. Dostupné z: <https://www.carbide-cutting.com/new/PVD-coating-CVD-coating.html>. [cit. 2025-05-05].
- [26] SOUSA, Victor F. C. a SILVA, Francisco J. G. Recent Advances in Turning Processes Using Coated Tools—A Comprehensive Review. Online. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2075-4701/10/2/170>. [cit. 2024-12-15].
- [27] *Pvd povlakování*. Online. Protechline.cz. 2019. Dostupné z: <https://www.protechline.cz/pvd-povlaky/>. [cit. 2024-12-17].
- [28] SANDVIK COROMANT. *Cutting tool materials*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/materials/cutting-tool-materials>. [cit. 2024-12-15].
- [29] GAO; Jianjun; Zhiwei LIU a, Wen MA. Thermal drilling processing on sheet metals: A review. Online. *Discover Mechanical Engineering*. 2019, roč. 2019, č. 2, s. 193-205. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S258884041930006X>. [cit. 2025-04-29].
- [30] R. Kumar a, N. Rajesh Jesudoss Hynes. Prediction and optimization of surface roughness in thermal drilling using integrated ANFIS and GA approach. Online. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2018, roč. 2020, č. 23, s. 30-41. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221509861831721X>. [cit. 2025-04-30].
- [31] EUROBYT CB. *Vrták pro termální vrtání do oceli*. Online. 2025. Dostupné z: https://www.eurobyt-cb.cz/obchod/vrtak-pro-termalni-vrtani-do-oceli_3. [cit. 2025-04-29].
- [32] GUO, Haoming; CAO, Shengbin; LI, Lei a ZHANG, Xiaofeng. A review on the mainstream through-silicon via etching methods. Online. *Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies (Third Edition)*. 2022, roč. 2022, č. 3, Dostupné

z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1369800121005205>. [cit. 2025-05-01].

[33] *Laser Drilling*. Online. CMS LASER. 2025. Dostupné z: <https://cmslaser.com/capabilities/techniques/drilling/>. [cit. 2025-05-01].

[34] *Laserové vrtání*. Online. IPG Photonics Corporation. 2024. Dostupné z: <https://www.ipgphotonics.com/cs/solutions/laser-materials-processing/laser-drilling>. [cit. 2025-05-01].

[35] *Laserové vrtání*. Online. In: Lintech. 2021. Dostupné z: <https://www.lintech.cz/produkty/laserove-technologie/laser-podle-aplikace/laserove-vrtani/>. [cit. 2025-04-30].

[36] *Hlavní typy laserů používaných v průmyslu*. Online. Megablog.cz. 2013. Dostupné z: <https://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>. [cit. 2025-05-05].

[37] *Laser Drilling: Principles and Applications*. Online. FindLight. 2022. Dostupné z: <https://www.findlight.net/blog/laser-drilling-principles-and-applications/>. [cit. 2025-05-01].

[38] *Tipy a triky pro zabránění opotřebení či problémům u TK vrtáků*. Online. Ceratizit group. 2024. Dostupné z: https://cuttingtools.ceratizit.com/cz/cs/nastroje/vrtani/p_iru_ka/tipy-a-triky-tk-vrtaacutsky.html. [cit. 2024-12-17].

[39] *Příručka pro technology - Opotřebení se nevyhneme!*. Online. MM Průmyslové spektrum. 2012. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-opotrebeni-se-nevyhneme>. [cit. 2024-12-17].

[40] *Přehled základních projevů opotřebení nástrojů pro obrábění kovů*. Online. Secotools.cz. 2023. Dostupné z: <https://www.secotools.com/article/122073?language=cs>. [cit. 2025-05-05].

[41] *Opotřebení břitů*. Online. Sandvik.coromant.com. 2024. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/wear-on-cutting-edges>. [cit. 2025-05-05].

[42] Precise measurement of geometric and physical quantities in cutting tools inspection and condition monitoring: A review. Online. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2024, roč. 37,

č. 4, s. 23-53. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936123002868>. [cit. 2025-05-05].

[43] BRILI, N.; FICKO, M.; KLANČNIK, S. Automatic Identification of Tool Wear Based on Thermography and a Convolutional Neural Network during the Turning Process. Online. *Sensors*. 2021, roč. 21, č. 5, Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013620303150>. [cit. 2025-05-05].

[44] *Měření síly a posunutí*. Online. Kistler.com. 2023. Dostupné z: <https://www.kistler.com/CH/de/kraft-weg-messung/C00000111>. [cit. 2025-05-05].

[45] KADLEC, Karel. Bezdotykové snímače provozních veličin – přednosti a omezení (část 1). Online. *AUTOMA*. 2016, roč. 2016, č. 11, s. 1-10. Dostupné z: https://www.automa.cz/cz/casopis-clanky/bezdotykove-snimace-provoznich-velicin-prednosti-a-omezeni-cast-1-2016_11_0_9184/. [cit. 2025-05-05].

[46] *Komplexní kontrola procesu s ToolScope*. Online. Ceratizit group. 2023. Dostupné z: <https://cuttingtools.ceratizit.com/cz/cs/reseni-nastroju/toolscope.html>. [cit. 2025-05-05].

[47] *Nástrojové sondy a detektory poškozeného nástroje*. Online. Renishaw. 2024. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/cs/nastrojove-sondy-a-detektory-poskozeneho-nastroje--6079>. [cit. 2024-12-17].

[48] *Sada vrtáků PBS3 A3*. Online. Lidl.cz. -. Dostupné z: https://www.lidl.cz/p/parkside-sada-vrtaku-pbs3-a3/p100387249001?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=sho-sea_brd_base-all_notset_ao_shop_nf_sl_ao_p-google.brand-low&utm_content=164411875103&utm_term&cid=21560873891&gad_source=1&gad_campaignid=21560873891&gbraid=0AAAAAC6dGCTv5LpyfXINamJxfugvAlJqF&gclid=Cj0KCQjwoNzABhDbARIsALfY8VOAs-8aIHeCwEMfLDiX2Ad16n7Hf6yuOcXXCnJ8pvuzz8U58dpeecEaAs4gEALw_wcB. [cit. 2025-05-10].

[49] *ELLIX Sada vrtáků do kovu SDS-Plus 6dílná*. Online. Obi.cz. -. Dostupné z: <https://www.obi.cz/vrtaky-do-kovu/ellix-sada-vrtaku-do-kovu-sds-plus-6dilna/p/5400239>. [cit. 2025-05-10].

[50] *Vrták do kovu 5,0 mm HSS DIN338, 338RNHSS*. Online. Kovonastroje.cz. -. Dostupné z: <https://www.kovonastroje.cz/vrtak-do-kovu-5-0-mm-hss-din338-338rnhss/>. [cit. 2025-05-10].

[51] *Vrtáky s válcovou stopkou, standard*. Online. Zps-fn.cz. -. Dostupné z: <https://www.zps-fn.cz/cz/e-shop/detail/vrtaky-s-valcovou-stopkou,-standard,-typ-n,-din-338,-rychlomezna-ocel-hss/>. [cit. 2025-05-10].

[52] *DMU 50 3. generace*. Online. Dmgmori.com. -. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/frezovani/petiose-frezovani/dmu/dmu-50>. [cit. 2025-05-10].

[53] *Multicomponent dynamometers, maximum forces up to 10 kN, cover plate 90x105 mm / 9129A*. Online. Kistler.com. -. Dostupné z: <https://www.kistler.com/INT/en/cp/multicomponent-dynamometers-9129a/P0000606>. [cit. 2025-05-10].

[54] BÁRTA, Martin. *Speciální zkouška tahem pryžových kompozitů*. Bakalářská práce. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně - Fakulta technologická, 2009.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Pohyby vrtání (1– hlavní pohyb, f – posuv).....	13
Obrázek 2 Hloubkové vrtání pomocí systému BTA.....	18
Obrázek 3 Nákres vrtáku s popisem částí.....	19
Obrázek 4 Vrták s výměnnou břitovou destičkou	20
Obrázek 5 Středící vrták	21
Obrázek 6 Příklady vrtáků podle materiálu obrobku.....	23
Obrázek 7 Porovnání výkonnosti při vrtání.....	23
Obrázek 8 Příklady povlakovaných vrtáků HSS	25
Obrázek 9 Pec na povlakování nástrojů.....	27
Obrázek 10 Vrták pro termální vrtání do oceli	28
Obrázek 11 Laserové vrtání.....	30
Obrázek 12 Příklady opotřebení vrtáku	32
Obrázek 13 Příklad tepelné hřebenové trhliny	33
Obrázek 14 Příklad měření zatížení nástroje v praxi termální kamerou.....	37
Obrázek 15 Automatizovaná nástrojová sonda	38
Obrázek 16 Použité vrtáky.....	43
Obrázek 17 Vrtání děr do polotovaru s chladicí emulzí	44
Obrázek 18 Grafické zobrazení dráhy vrtáku	45
Obrázek 19 Dynamometrické zařízení Kistler.....	46
Obrázek 20 Výsledek vrtání vrtákem 1	47
Obrázek 21 Vrtání vrtákem 1– graf z dynamometru	47
Obrázek 22 Graf zobrazující Fz vrtáku 1.....	48
Obrázek 23 Graf zobrazující Mx vrtáku 1	48
Obrázek 24 Výsledek vrtání vrtákem 2	50
Obrázek 25 Vrtání vrtákem 2 – graf z dynamometru	50
Obrázek 26 Graf zobrazující Fz vrtáku 2.....	51
Obrázek 27 Graf zobrazující Mx vrtáku 2	51
Obrázek 28 Výsledek vrtání vrtákem 3	53
Obrázek 29 Obrábění vrtákem 3 – graf z dynamometru	53
Obrázek 30 Graf zobrazující Fz vrtáku 3.....	54
Obrázek 31 Graf zobrazující Mx vrtáku 3	55
Obrázek 32 Výsledek vrtání vrtákem 4	56
Obrázek 33 Vrtání vrtákem 4 – graf z dynamometru	56
Obrázek 34 Graf zobrazující Fz vrtáku 4.....	57

Obrázek 35 Graf zobrazující Mx vrtáku 4	57
Obrázek 36 Sestava zkušebního stroje.....	59
Obrázek 37 Vrtáky po jejich namáhání na ohyb	60
Obrázek 38 Graf průběhu namáhání na ohyb	61

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Shrnutí vrtáků	42
Tabulka 2 Naměřené hodnoty – Vrták 1	49
Tabulka 3 Naměřené hodnoty – Vrták 2.....	52
Tabulka 4 Naměřené hodnoty použité pro grafy – Vrták 3	55
Tabulka 5 Naměřené hodnoty použité pro grafy – Vrták 4	58
Tabulka 6 Hodnoty získané z ohybové zkoušky	59
Tabulka 7 Shrnující tabulka experimentu	62

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

BTA	Boring and Trepanning Association (Sdružení pro vyvrtávání a výhrubování)
CBN	Kubický nitrid bóru
CMM	Coordinate Measuring Machine (souřadnicový měřicí stroj)
CNC	Computerized Numerical Control (počítačem řízené obrábění)
CrN	Nitrid chromu
CVD	Chemical Vapor Deposition (chemická depozice z plynné fáze)
d,D	Průměr vrtáku [mm]
d ₀	Počáteční průměr vzorku při ohybu [mm]
dL	Průhyb při zatížení [mm]
DLC	Diamond-Like Carbon (uhlíkový povlak s diamantovými vlastnostmi)
DMU	Deckel Maho Universal (typ CNC obráběcího stroje)
E	Modul pružnosti [GPa]
f	Posuv na otáčku [mm/ot]
F [lom]	Síla při lomu [N]
F [max]	Maximální síla při ohybu [N]
F _z	Řezná síla ve směru osy Z [N]
HAZ	Heat Affected Zone (tepelně ovlivněná oblast)
HSS	High-Speed Steel (rychlořezná ocel)
L	Délka vrtáku [mm]
M _x	Krouticí moment v ose X [Nm]
n	Počet otáček [min ⁻¹]
PCD	Polycrystalline Diamond (polykrystalický diamant)
PVD	Physical Vapor Deposition (fyzikální depozice z plynné fáze)
R ²	Koeficient determinace

Si_3N_4	Nitrid křemíku
S_0	Počáteční průřezová plocha vzorku [mm^2]
TiAlN	Nitrid titanu a hliníku
TiC	Karbid titanu
TiN	Nitrid titanu
v_c	Řezná rychlost [m/min]
v_f	Posuvová rychlost [mm/min]
π	Ludolfovo číslo ($\sim 3,1416$) [–]
$\varnothing$	Průměr nebo průměrná hodnota [–]