

Výroba přípravku pro cyklické zatěžování obráběcích nástrojů

Bc. Ondřej Tkadlec

Diplomová práce
2021



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Ondřej Tkadlec
Osobní číslo:	T19516
Studijní program:	N0788A270002 Výrobní inženýrství
Studijní obor:	Stroje a nástroje pro zpracování polymerů a kompozitů
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Výroba přípravku pro cyklické zatěžování obráběcích nástrojů

Zásady pro vypracování

1. Teoretický rozbor problematiky cyklického namáhání obráběcích nástrojů
2. Návrh přípravku pro cyklické zkoušky obráběcích nástrojů s vyměnitelným trnem
3. Konstrukce, výroba a realizace provozních zkoušek
4. Diskuze chování navrženého přípravku a obráběcích nástrojů při cyklickém zatěžování

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam doporučené literatury:

- KNOTEK, O., et al. Behaviour of CVD and PVD coatings under impact load. *Surface and Coatings Technology*, 1994, 68: 253-258.
- LEDRAPPIER, Florent, et al. Damage Phenomena Observed on PVD Coatings Submitted to Repeated Impact Tests. *Plasma Processes and Polymers*, 2007, 4.S1: S835-S839.
- BOUZAKIS, K.-D., et al. The inclined impact test, an efficient method to characterize coatings' cohesion and adhesion properties. *Thin Solid Films*, 2004, 469: 254-262.
- DOWLING, Norman E. *Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*. 3rd ed. Upper Saddle River, N.J.: Pearson/Prentice Hall, c2007, xvii, 912 s. ISBN 0131863126. Dostupné také z: <http://www.loc.gov/catdir/toc/fy0705/2006281523.html>

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

Datum zadání diplomové práce: **5. ledna 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **14. května 2021**

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

L.S.

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 1. dubna 2021

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou 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 autorského zákona mohu užit své dílo – diplomovou 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 diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové 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 diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tato diplomová práce je zaměřena na materiály řezných nástrojů a možnosti jejich povlakování, zejména pak zkoumání vlastností daných povlaků. V úvodní části je charakterizován obráběcí proces a řezné síly, které při něm vznikají a zatěžují obráběcí nástroj. Další část textu se věnuje samotným nástrojovým materiálům a na tu navazuje část o možnostech povlakování nástrojů. V práci jsou také uvedeny nejčastěji používané způsoby hodnocení vlastností povlaků. Poslední část se věnuje mechanickému zatížení nástroje, kde je popsána cyklická rázová zkouška, která poskytuje vstupní informace pro praktickou část této práce. V experimentální části je popsán návrh a konstrukce přípravku pro cyklickou rázovou zkoušku obráběcích nástrojů.

Klíčová slova: Proces obrábění, řezné síly, nástrojové materiály, únavová životnost povlaku, cyklická rázová zkouška

ABSTRACT

This diploma thesis is focused on the materials of cutting tools and the possibilities of their coating, especially the investigation of the properties of the coatings. The introductory part characterizes the machining process and the cutting forces that arise and load the machining tool. The next part of the text deals with the tool materials themselves and is followed by a section on the possibilities of coating tools. The work also presents the most commonly used methods of evaluating the properties of coatings. The last part deals with the mechanical loading of the tool, which describes the cyclic impact test, which provides input information for the practical part of this work. The experimental part describes the design and construction of a apparatus for cyclic impact testing of machine tools.

Keywords: Machining process, cutting forces, tool materials, fatigue life of the coating, cyclic impact test

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Ondřeji Bílkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady s připomínkami a čas, který mi poskytl při řešení této práce.

Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Milanovi Žaludkovi, Ph.D. za zprostředkování zátěžové zkoušky statické a dynamické na zkušebním stroji Zwick/Roell Vibrophore 100.

Taktéž děkuji panu doc. Ing. Jakobovi Javoříkovi, Ph.D. za pomoc při nastavování FEM analýzy v softwaru NX 12.

Mé poděkování také patří mé rodině za dlouhodobou podporu, kterou mi dodávali během celého studia.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 PROCES OBRÁBĚNÍ	11
1.1 NÁSTROJ A JEHO PRVKY	12
1.2 ŘEZNÉ SÍLY	14
1.3 OBROBITELNOST MATERIÁLU	16
1.4 ŘEZIVOST NÁSTROJE	17
1.5 SOUSTRUŽNICKÉ NÁSTROJE	18
2 NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY	20
2.1 RYCHLOŘEZNÉ OCELI	24
2.2 SLINUTÉ KARBIDY	24
2.2.1 Výroba slinutých karbidů	27
2.3 POVLAKOVANÉ SLINUTÉ KARBIDY	30
2.4 CERMETY	32
2.5 ŘEZNÁ KERAMIKA	32
2.6 SUPERTVRDÉ ŘEZNÉ MATERIÁLY	35
3 POVLAKOVÁNÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ	36
3.1 ÚPRAVA POVRCHU PŘED POVLAKOVÁNÍM	37
3.1.1 Úprava řezných hran	37
3.1.2 Chemické čištění	39
3.1.3 Čištění iontovým bombardem	39
3.2 METODA PVD	40
3.3 METODA CVD	42
3.4 VLASTNOSTI POVLAKŮ A JEJICH HODNOCENÍ	44
3.4.1 Optická emisní spektroskopie GD-OES	44
3.4.2 Měření tloušťky	45
3.4.3 Mikrotvrdost tenkých vrstev	46
3.4.4 Hodnocení adhezní vlastnosti	47
3.4.5 Tribologická zkouška	49
4 MECHANICKÉ ZATÍŽENÍ NÁSTROJE	50
4.1 ÚNAVA MATERIÁLU	51
4.1.1 Nízkocyklová únava	53
4.1.2 Vysokocyklová únava	56
4.2 DYNAMICKÉ RÁZOVÉ ZATÍŽENÍ POVLAKŮ	57
II PRAKTICKÁ ČÁST	64
5 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI	65

6	POUŽITÁ STROJNÍ ZAŘÍZENÍ.....	66
6.1	VÍCEÚČELOVÝ VYSOKOFREKVENČNÍ PULSÁTOR ZWICK/ROELL VIBROPHORE 100.....	66
6.2	OBRÁBĚCÍ CENTRUM DMG MORI DMU 50.....	67
7	NÁVRH UPÍNACÍHO PŘÍPRAVKU	68
7.1	PRVNÍ NÁVRH PŘÍPRAVKU	68
7.2	DRUHÝ NÁVRH PŘÍPRAVKU	73
7.3	POROVNÁNÍ A VOLBA KONKRÉTNÍHO NÁVRHU	75
8	VÝROBA DÍLŮ UPÍNACÍHO PŘÍPRAVKU	76
8.1	ZÁKLADOVÁ DESKA	76
8.2	UPÍNACÍ ADAPTÉR	81
8.3	ÚHLOVÉ KLÍNY.....	88
8.4	ZÁTĚŽOVÝ TLAČNÝ TRN.....	90
8.5	SESTAVENÍ VYROBENÉHO PŘÍPRAVKU	93
9	POPIS CHOVÁNÍ UPÍNACÍHO PŘÍPRAVKU.....	95
9.1	FEM SIMULACE.....	95
9.2	ZKUŠEBNÍ TEST POD STATICKÝM ZATÍŽENÍM.....	99
9.3	ZKUŠEBNÍ TEST POD CYKlickÝM ZATÍŽENÍM	102
9.4	DISKUZE CHOVÁNÍ UPÍNACÍHO PŘÍPRAVKU	104
	ZÁVĚR	106
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	107
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	113
	SEZNAM OBRÁZKŮ	117
	SEZNAM TABULEK.....	121
	SEZNAM PŘÍLOH.....	122

ÚVOD

Pro výrobu strojních komponentů je nejčastěji využívanou technologií obráběcí technologie, zejména pak frézování, soustružení a vrtání. Tyto technologické operace, ale i mnoho dalších operací s definovanou geometrií řezného nástroje, vytváří nový obrobek definovaného rozměru, tvaru a jakosti, tím že nástroj odebírá materiál ve formě třísek. K tomu je zapotřebí řezného nástroje s dostatečnou houževnatostí, tvrdostí, odolností proti opotřebení, řezivostí apod. Všechny potřebné vlastnosti by měl být nástroj schopný udržet i při zvýšených pracovních teplotách bez výrazných změn po dostatečně dlouhou dobu.

Obráběcí nástroje, nebo jejich řezné části jsou vyráběny z širokého sortimentu nástrojových materiálů, jenž se stále rozvíjejí a vylepšují. Tento rozvoj je spojen s rostoucím počtem těžkoobrobitelných konstrukčních ocelí, které se musí obrábět, ale také s modernizací výkonnějších obráběcích zařízení a taktéž s požadovanými nároky na kvalitu výsledného povrchu. Snahou výrobců řezných materiálů není objevení zcela nového převratného materiálu, ale spíše se snaží zdokonalit samotnou výrobní technologii a vymezit optimální oblast použití.

Výrazným přínosem ke zlepšení všech vlastností řezných nástrojů a jejich celkové produktivitě mají tenké vrstvy vytvořené pomocí povlakovací technologie. Samotný povlak o tloušťce pouze několika μm má mnohonásobně lepší vlastnosti než podkladový materiál, protože neobsahuje žádné pojivo. Konečné vlastnosti daného povlaku nezávisí jen na použitých materiálech, ale důležitým parametrem je systém rozhraní tenká vrstva – substrát. Stav této přechodové vrstvy je jednou z významných podmínek pro celkovou odolnost tenkých vrstev, protože zásadně ovlivňuje adhezi k podkladovému materiálu.

Podrobná charakteristika řezných materiálů a povlaků je tedy rozhodující pro optimalizaci řezného procesu a jeho ekonomického zhodnocení. Pro získání potřebných vlastností se provádí různé praktické ověřovací zkoušky. Samotná tvrdost povlaku, která je obecně považována jako hlavní kritérium při výběru povlaku, se jeví jako nedostatečný parametr pro úplné určení odolnosti a životnosti v pracovním prostředí. Proto byly k hodnocení únavové odolnosti nedávno vyvinuty cyklické rázové testy.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PROCES OBRÁBĚNÍ

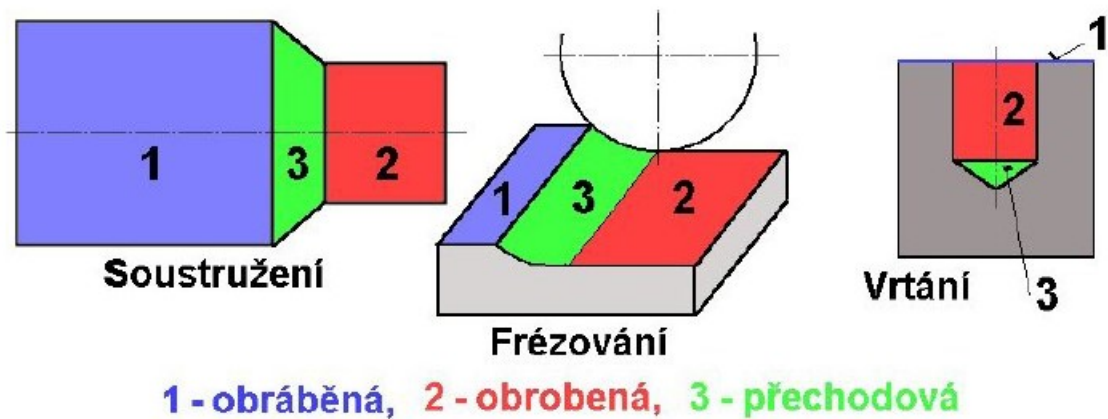
Technologický proces obrábění se zabývá a analyzuje vzájemné souvislosti a faktory obráběcího procesu jako souhrnné složky výrobního procesu strojních součástí. Obráběcí proces se uskutečňuje v obráběcím systému, který může být rozčleněn na subsystémy obráběcích strojů, řezných nástrojů, manipulačních přípravků a obráběcího prostředí. Předmětem obráběcího procesu je obrobek, který vzniká přetvořením z původního polotovaru do příslušného tvaru, rozměru a jakosti, za působení účinků mechanických, elektrických, chemických anebo jejich kombinací. [1]

Pojem obrábění může být definován jako technologický proces, při kterém řezná síla působí na řezný nástroj ve tvaru klínu, klín je vtlačován do povrchu polotovaru, kde dochází k úběru materiálu v podobě třísky při vzájemném pohybu polotovaru a nástroje. Tříška je odříznutá a zdeformovaná vrstva materiálu polotovaru, tento odpadní produkt obráběcího procesu může být dále využit a recyklován v hutní výrobě polotovarů. Při úběru materiálu vznikají značné síly a deformace. V průběhu malého časového okamžiku dochází v materiálu hned ke třem mezním stavům. Jako první mezní stav nastane pružná napjatost, poté dojde ke stavu plastické deformace, která vede ke vzniku třísky a jako poslední nastává lomové porušení při odchodu třísky z materiálu. [3]

Při obrábění dochází k úběru částic materiálu obrobku břitem nástroje. Samotný proces fyzikálně-mechanického oddělování materiálu obrobku se definuje jako *řezání*, respektive *řezný proces*. Řezný proces se na základě způsobu oddělování materiálu rozlišuje na *kontinuální* (soustružení, vyvrtávání, vrtání), *diskontinuální* (obrážení, hoblování) a *cyklický* (frézování, broušení). Skutečný řezný proces se odehrává za určitých řezných podmínek, které jsou součástí obráběcích podmínek. [1]

Výchozí polotovar, taktéž zvaný obrobek, jako předmět obráběcího procesu je z geometrického hlediska charakterizován *obráběnou, obrobenou a přechodovou* plochou *Obr. 1*. Obráběná plocha je část povrchu obrobku, která bude odstraňována obráběním, tedy přetvářena. Obrobená plocha je prioritním výstupem řezného procesu a z technologického hlediska je určena svými rozměry, tvarem, polohou, strukturou povrchu a vlastnostmi povrchové vrstvy. Tato plocha se také identifikuje souborem parametrů vztažených k jmenovité ploše, patří sem především úchylka rozměru, úchylka tvaru, úchylka polohy, struktura povrchu a vlastnosti povrchové vrstvy. Tyto parametry obecně souvisí se soustavou stroj-nástroj-obrobek-přípravky a s nastavenými hodnotami

řezných podmínek. Přechodová plocha je okamžitá část povrchu obrobku, která je vytvářena při obrábění působením ostří nástroje během zdvihu nebo otáčky nástroje nebo obrobku. [1, 2]

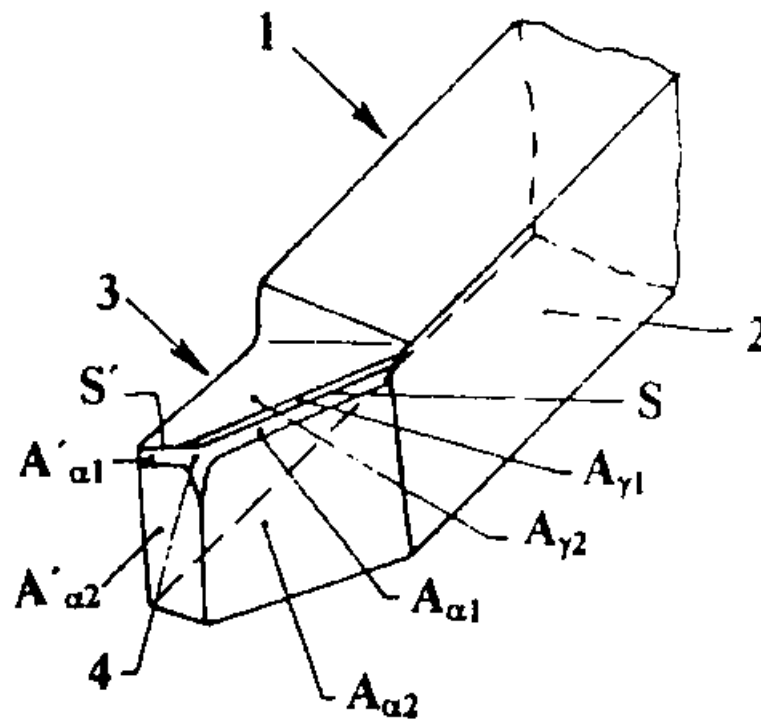


Obr. 1 Základní plochy při obrábění [2]

1.1 Nástroj a jeho prvky

Nástroje pro soustružení jsou geometrická celistvá tělesa, nebo jsou složena z více částí. Tyto části bývají obvykle normalizované. Pro hodnocení geometrického uspořádání ploch na nástrojích je využívána mezinárodní norma ČSN ISO 3002/1, kde je popsán pravoúhlý souřadnicový systém, který charakterizuje jednotlivé souřadnicové roviny ve vztahu k základní rovině a jednotlivým plochám a úhlům na nástroji. [3, 4]

- **Těleso** nástroje je část, na které jsou přímo vytvořené anebo připevněné elementy ostří.
- **Osa nástroje** je teoretická přímka s definovaným geometrickým vztahem ke stanovenému povrchu, která je využívána při výrobě, ostření a upnutí nástroje. Obecně se dá považovat za středovou čaru stopky nástroje a bývá rovnoběžná nebo kolmá k danému povrchu nástroje.
- **Řezná část** je funkční částí nástroje, která obsahuje prvky tvořící třísku. Jsou to hlavně ostří, čelo a hřbet. U vícezubého nástroje má každý zub (břit) svoji řeznou část.
- **Základna** je plochý prvek stopky nástroje, který bývá umístěn rovnoběžně nebo kolmo k základní rovině nástroje. Její hlavní funkcí je orientace při výrobě nástroje, kontrole a jeho ostření. Všechny nástroje nemají jednoznačně určenou základnu.
- **Břit** je část řezné části nástroje ohraničený čelem a hřbetem nástroje. Břit může být spojený s hlavním i vedlejším ostřím. [1, 2]



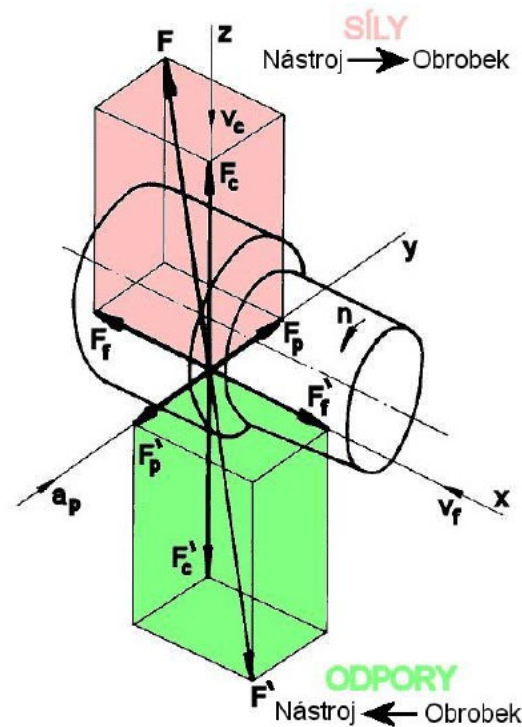
Obr. 2 Ostří a plochy na soustružnickém noži (1-stopka, 2-základna, 3-řezná část, 4-špička, S-nástrojové hlavní ostří, S'-nástrojové vedlejší ostří, $A_{\gamma 1}$ -první hlavní čelo, $A_{\gamma 2}$ -druhé hlavní čelo, $A_{\alpha 1}$ -první hlavní hřbet, $A_{\alpha 2}$ -druhé hlavní hřbet, $A'_{\alpha 1}$ -první vedlejší hřbet, $A'_{\alpha 2}$ -druhé vedlejší hřbet [1])

1.2 Řezné síly

Řezný děj se odehrává jako výsledek procesu působení složité silové soustavy mezi obráběcím nástrojem a obrobkem. Popsání této silové soustavy umožňuje optimalizaci řezných podmínek s přihlédnutím na průběh obrábění a stabilitu břitu nástroje. Pro popis silových poměrů řezného děje se celková řezná síla F rozloží do příslušných geometrických složek. [1]

Na *Obr.3* je možné vidět rozklad celkové řezné síly F a její složky při podélném soustružení: řezná síla F_c , posuvová síla F_f a pasivní síla F_p .

Výpočet rozložených složek a celkové řezné síly je možné provést na základě experimentálně získaných závislostech: [3]



Obr. 3 Řezné síly a odpory při podélném soustružení [2]

$$F_c = C_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} \quad [\text{N}] \quad (1)$$

$$F_f = C_{F_f} \cdot a_p^{x_{F_f}} \cdot f^{y_{F_f}} \quad [\text{N}] \quad (2)$$

$$F_p = C_{F_p} \cdot a_p^{x_{F_p}} \cdot f^{y_{F_p}} \quad [\text{N}] \quad (3)$$

kde:

- C_{Fc}, C_{Ff}, C_{Fp} – materiálové konstanty [-]
- x_{Fc}, x_{Ff}, x_{Fp} – exponenty vlivu a_p [-]
- y_{Fc}, y_{Ff}, y_{Fp} – exponenty vlivu f [-]
- a_p – šířka záběru ostří [mm]
- f – posuv za otáčku [mm.ot⁻¹]

Celková řezná síla F je poté dána vektorovým součtem: [3]

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2} \quad [\text{N}] \quad (4)$$

kde:

- F_c – řezná síla [N]
- F_f – posuvová síla [N]
- F_p – pasivní síla [N]

Obdobně jako mechanika těles a materiálové inženýrství definují pevnost materiálu v tahu, tlaku atd., tak i teorie řezného procesu definuje velikost měrné síly jako sílu potřebnou k překonání soudržnosti materiálu vlivem obrábění. V základním tvaru je tato veličina definovaná jako síla ve směru hlavního řezného pohybu vztažená na průřez třísky: [3]

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} \quad [\text{MPa}] \quad (5)$$

kde:

- F_c – řezná síla [N]
- A_D – jmenovitý průřez třísky [mm²]

Celkový výkon obráběcího stroje, který je potřebný pro pokrytí řezného výkonu a pasivních odporů stroje je dán vztahem: [2]

$$P_m = \frac{F_c \cdot v_c}{6 \cdot 10^4 \cdot \eta} \quad [\text{kW}] \quad (6)$$

kde:

- F_c – řezná síla [N]
- v_c – řezná rychlost [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]
- η - účinnost obráběcího stroje [-]

1.3 Obrobitelnost materiálu

Pojem obrobitelnost materiálu a její problematika je z hlediska technologie třískového obrábění jedna ze zásadních vlastností a důležitým faktorem pro volbu vhodných řezných podmínek a pro funkci nástroje ve všech obráběcích metodách. V obecném smyslu ji lze také definovat jako míru schopnosti daného konkrétního materiálu být zpracován některou z obráběcích metod. Dále ji lze posuzovat z hlediska vlivu materiálu na intenzitu otěru, z hlediska energetické bilance řezného procesu, z hlediska vlivu při procesu tvorby třísky a vytváření nového povrchu obrobku.

Existuje korelační vztah stupně obrobitelnosti kovů k velikosti jednotlivých faktorů obrábění, ale přesně vyjádřený matematický vztah těchto faktorů ke stupni obrobitelnosti se doposud nepodařilo určit. Obrobitelnost závisí na spoustě faktorech, ze kterých jsou nejdůležitější fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného materiálu, způsob obrábění či geometrie nástroje. Z fyzikálních vlastností je to především tepelná vodivost, na které závisí rychlost odvodu tepla z místa řezání. Z mechanických vlastností je to ovlivnění pevností, houževnatostí a tvrdostí, čím více je materiál pevný a tvrdý, tím je hůře obrobitelný.

Z hlediska charakteristik obrobitelnosti a řezivosti je možné obrobitelnost a řezivost rozdělit na absolutní a relativní. Také je nutno zmínit, že obrobitelnost a řezivost spolu neoddělitelně souvisí a řada kritérií obrobitelnosti je souběžně kritériem pro řezivost.

- **Absolutní obrobitelnost** nebo řezivost se identifikuje funkčním vztahem a parametry, které spolu souvisejí, anebo určitou velikostí dané veličiny popisující obrobitelnost, resp. řezivost.
- **Relativní obrobitelnost** je specifikována bezrozměrnými čísly, která uvádí poměr velikostí určité veličiny. Tento poměr se vztahuje k danému materiálu obrobku, resp. k nástroji a velikosti veličiny odpovídající etalonovému (referenčnímu) materiálu obrobku případně nástroji. [3, 5, 6]

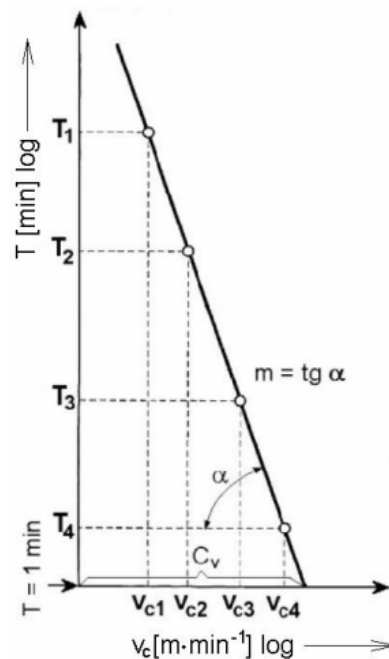
1.4 Řezivost nástroje

Řezivost nástroje je definována jako vlastnost, jenž umožňuje nástroji efektivně odebrat třísku z obráběného materiálu. Tato vlastnost je v úzké souvislosti s fyzikálními a mechanickými vlastnostmi nástroje, ale zároveň je ovlivněna dalšími aspekty, mezi které spadá metoda obrábění, geometrie nástroje, řezné podmínky, řezné prostředí atd. Řezivost není absolutní vlastnost, a to z toho důvodu, že závisí na výše uvedených aspektech, ale také je velmi závislá na druhu obráběného materiálu, především na jeho mechanických vlastnostech. Například nástroj ze slinutého karbidu P20 bude vykazovat velmi dobrou řezivost při obrábění běžné oceli, ale při obrábění oceli kalené bude jeho řezivost velmi nízká nebo dokonce nulová.

Jednoduchým a běžně používaným nástrojem pro hodnocení řezivosti je $T-v_c$ závislost, která vychází z Taylorova vztahu.

Tab. 1 Hodnoty exponentu m pro vybrané nástrojové materiály [5]

Materiál	Nástrojové oceli	Rychlořezné oceli	Slinuté karbidy	Řezná keramika
$m [-]$	$10 \div 8$ (až 6)	$8 \div 5$ (až 3)	$5,0 \div 2,5$ (až 2)	$2,5 \div 1,5$ (až 1,2)
$\alpha [^\circ]$	$84 \div 83$	$83 \div 79$	$79 \div 68$	$68 \div 56$



Obr. 4 Graf závislosti $T-v_c$ [dle 5]

Obecně ale platí, že lepší řezivost má ten nástrojový materiál, který vykazuje v $T-v_c$ závislosti vyšší hodnotu C_v a nižší hodnotu exponentu m , jehož hodnoty jsou uvedeny v *Tab.1* pro více řezných materiálů. [2, 5]

1.5 Soustružnické nástroje

Soustružnické nože se z technologického hlediska rozdělují na radiální (nejpoužívanější), prizmatické, kotoučové a tangenciální. Radiální nože lze rozdělit dle konstrukce, způsobu obrábění, směru posuvového pohybu, tvaru těla nože a použitého materiálu nástroje.

Radiální nože v souvislosti s konstrukčním provedením jsou následující:

- celistvé (těleso i s řeznou částí je z jednoho celistvého nástrojového materiálu),
- s připájenými břitovými destičkami (řezná břitová destička je natvrdo připájena pomocí pájky k tělesu soustružnického nože, který je z konstrukční oceli),
- s vyměnitelnými břitovými destičkami (řezná břitová destička je mechanicky připevněna v nožovém držáku z konstrukční oceli, upínací systémy jsou normalizovány)

Radiální nože se dle posuvového pohybu rozdělují:

- pravé (řezný pohyb konají směrem od koníku k vřetenu soustruhu),
- levé (posouvají se od vřetena ke koníku soustruhu).

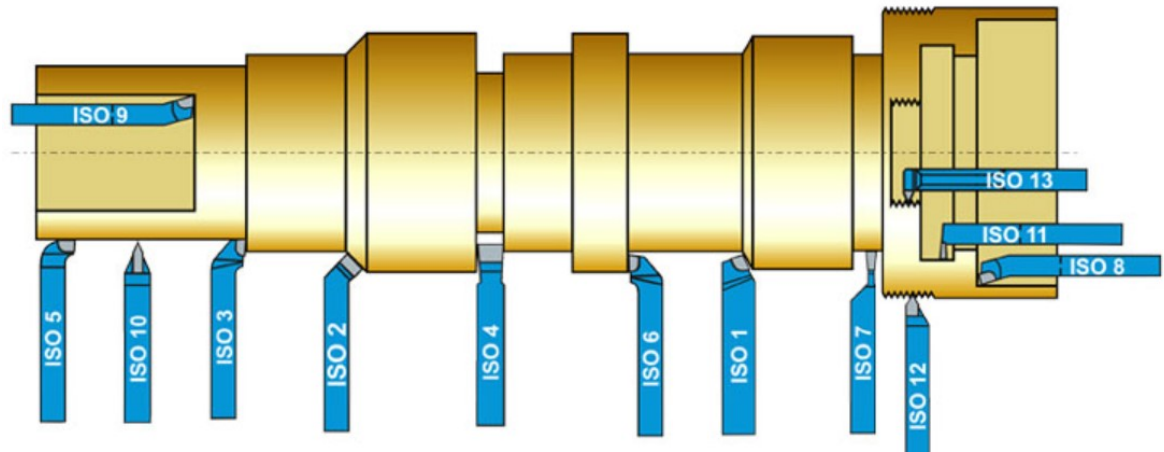
Radiální nože se dále dělí podle způsobu obrábění:

- pro obrábění vnější ploch, pro obrábění ploch vnitřních.

Podle tvaru tělesa nože existují radiální nože:

- přímé a ohnuté. [2]

Na Obr. 5 je možné vidět některé normalizované radiální soustružnické nože a v Tab.2 jsou shrnuty jejich názvy a označení.



Obr. 5 Typy radiálních nožů pro soustružení [7]

Tab. 2 Označení nožů pro soustružení dle ISO [dle 7]

Název nože	Označení	Název nože	Označení
Ubírací nůž přímý	ISO 1	Vnitřní ubírací nůž	ISO 8
Nůž ohnutý	ISO 2	Vnitřní nůž rohový	ISO 9
Ubírací nůž stranový	ISO 3	Nůž špičatý	ISO 10
Nabírací nůž	ISO 4	Vnitřní zapichovací nůž	ISO 11
Nůž čelní	ISO 5	Závitový nůž vnější	ISO 12
Nůž rohový	ISO 6	Závitový nůž vnitřní	ISO 13
Nůž zapichovací	ISO 7		

2 NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY

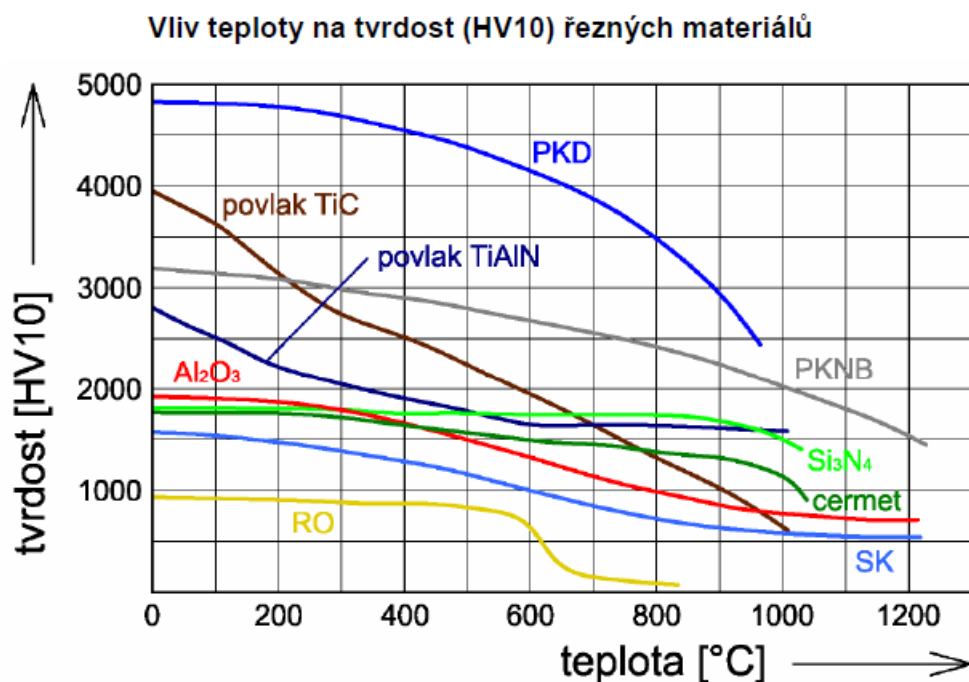
Metoda a výsledky řezného procesu velmi závisí na vlastnostech pracovní části obráběcího nástroje, který je vyroben z vhodného nástrojového materiálu. Na tento materiál jsou často kladeny i protichůdné vlastnosti jako je tvrdost, odolnost proti opotřebení, tepelná vodivost, pevnost v ohybu a houževnatost. Těmto vlastnostem by měl řezný materiál vyhovět i za zvýšené a velmi vysoké teploty po dostatečně dlouhou dobu. Lze tedy říct, že doposud neexistuje univerzální nástrojový materiál, kterým by se dalo opracovat všechny materiály. Při obrábění na automatizovaných strojích, především NC strojích, jsou kladeny požadavky na vysokou produktivitu a minimální náklady, za předpokladu zachování vysoké řezivosti a tím i vysokého řezného výkonu, určeného velkým minutovým úběrem opracovávaného materiálu a dobrou odolností proti mechanickým a teplotním výkyvům.

V současnosti se na NC obráběcích strojích používají nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami ze slinutého karbidu, popř. povlakované destičky, a to v rozsahu 80 % a ve zbývajících 20 % se používají nástroje z rychlořezné oceli, především na osové nástroje jako jsou vrtáky, výhrubníky, výstružníky a tvarové nástroje. Ovšem používání nástrojových ocelí na těchto poměrně drahých výrobních strojích je nevhodné, protože je nutné zvolit neproduktivní řezné podmínky. [1, 3, 8]

Výběr materiálu a třídy obráběcího nástroje je zásadním faktorem již při navrhování úspěšné obráběcí operace. Aby byl správně zvolen nástrojový materiál, je důležité brát v potaz následující faktory:

- materiál obrobku, jeho velikost a tvar, hromadnost výroby,
- požadavky na kvalitu obrobené plochy,
- technologii výroby polotovaru, stav povrchové kůry, druhy vměstků a jejich distribuci,
- druh obráběcího stroje, jeho fyzický stav a ekonomická provozní náročnost,
- tvar a typ řezu – řez plynulý nebo přerušovaný, chladicí a mazací podmínky,
- finanční náročnost řezného materiálu, náklady spojené s jeho provozem a údržbou,
- trvanlivost nástroje – odolnost proti fyzikální a chemickému opotřebení, obzvláště vůči tepelnému zatížení,
- požadavky na spolehlivost, bezpečnost a ekologii v pracovním provozu,
- možnost recyklace nebo bezpečné likvidace opotřebovaného nástroje. [3, 9]

Strojírenské podniky z celého světa používají ve výrobě strojních součástí rozmanité spektrum materiálů. Ať už se jedná o kovové materiály, mezi které patří oceli, litiny, slitiny hliníku, slitiny mědi, slitiny niklu, slitiny titanu, nebo to mohou být materiály nekovové, kam patří keramika nebo vlákny vyztužené kompozity atd. K tomu, aby bylo možné vytvářet odebráním třísky nové povrchy požadovaného tvaru a jakosti, musí být k dispozici takový řezný nástroj, jehož břit má dostatečnou houževnatost a zároveň vysokou tvrdost ostří, která nesmí příliš poklesnout za zvýšené pracovní teploty. Závislost tvrdosti řezných materiálů na pracovní teplotě je zobrazena na Obr. 6. [10]

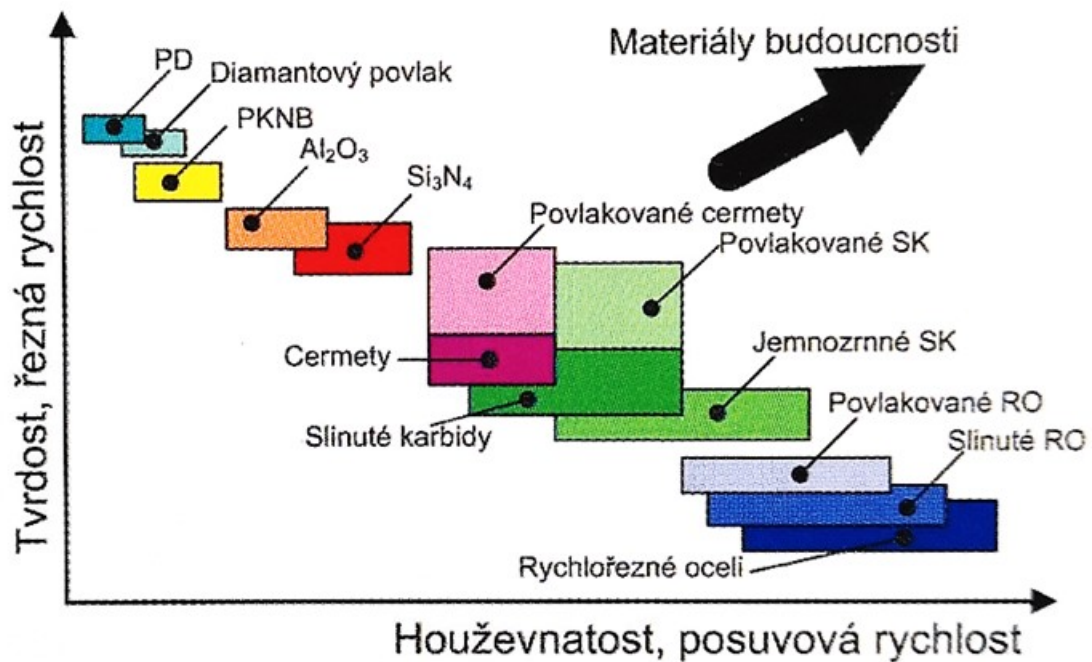


Obr. 6 Závislost tvrdosti materiálu na teplotě [dle 11]

V současné době se řezné nástroje vyrábí z různých materiálů, od rychlořezných ocelí přes slinuté karbidy, cermety, řeznou keramiku až po supertvrde řezné materiály (syntetický diamant, kubický nitrid bóru). Tato široká produkce materiálů je důsledek intenzivního dlouhodobého výzkumu a vývoje v oblasti materiálů a také souvisí s rozvojem konstrukčních materiálů, které je potřeba efektivně obrábět, taktéž i s vývojem nových obráběcích strojů, především s číslicovým řízením. Dá se očekávat, že v blízké budoucnosti nebude objeven zcela nový řezný materiál, ale spíše se výrobci nástrojových materiálů zaměří na zdokonalování technologie výroby a specifikaci optimálního využití již známých materiálů, ve smyslu přesného vymezení aplikačních oblastí.

Aplikační oblasti řezných materiálů jsou vymezeny jejich fyzikálními (měrná hmotnost, součinitel tření, velikost zrna), chemickými (inertnost, stálost), tepelnými (tepelná

vodivost, pracovní teplota, teplota tání, délková roztažnost) a mechanickými vlastnostmi (tvrdost, lomová houževnatost, modul pružnosti, pevnost v ohybu). Při dokončovacích operacích převládá tepelné zatížení nad mechanickým, protože probíhá při vysokých řezných rychlostech a malých průřezech třísky, zde bude použit nástrojový materiál s vysokou tvrdostí. Naopak u hrubovacích operací převládá mechanické zatížení nad tepelným v důsledku vyšších posuvových rychlostech a většímu průřezu třísky, zde se využívají řezné materiály s vysokou houževnatostí – viz Obr. 7. [10]



Obr. 7 Vliv mechanických vlastností řezných materiálů na pracovní podmínky [10]

Slinuté karbidy mají největší modul pružnosti, ohybovou pevnost a lomovou houževnatost, a proto se používají při obrábění vysokými posuvovými rychlostmi a při přerušovaných řezech. Jejich nízká termochemická stabilita jim neumožňuje použití při vyšších řezných rychlostech.

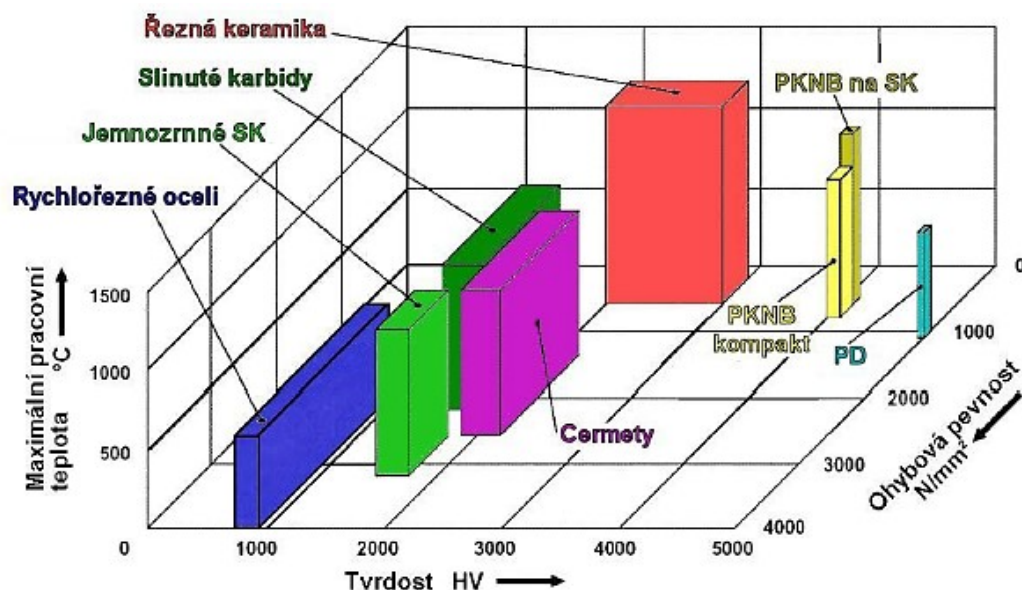
Povlakované slinuté karbidy jsou považovány za jednoduché „kompozitní“ materiály, protože se skládají z pevného a poměrně houževnatého karbidového základu a termochemicky stabilního, tvrdého povlaku. To zapříčiní vznik řezného materiálu, který je vhodný pro široké spektrum aplikací při vysokých řezných i posuvových rychlostech, což vede k velkému úběru materiálu, a to i při přerušovaných řezech.

Řezná keramika na bázi Al₂O₃ se používá při obrábění vysokými řeznými rychlostmi a malými posuvovými rychlostmi, protože je velmi tvrdá za tepla a má vysokou termochemickou stabilitu, ale nízkou houževnatost. Řezná keramika na bázi Si₃N₄ je více

houževnatá, tudíž umožňuje aplikaci při vyšších posuvových rychlostech, než keramika Al_2O_3 . Obecně je řezná keramika výborným nástrojovým materiálem pro opracování šedých litin, ale už není tak vhodná pro opracování ocelí a tvárných litin, kde dochází k rychlému opotřebení.

Cermety (Ceramic-Metal) jsou řezné materiály, které vznikly spojením keramických částic s kovovým pojivem. Tyto materiály mohou být použity při vyšší posuvové rychlosti než řezná keramika a zároveň pro řezné rychlosti rovnající se povlakovaným slinutým karbidům. Cermety mají nižší houževnatost, proto je jejich použití omezeno jen na lehké a střední řezy. To je zapříčiněno jejich nižší tepelné vodivostí při vyšších posuvech a tím dochází ke koncentraci tepla v oblasti špičky, což má za následek rychlé plastické porušení břitu nástroje. S výhodou se používají při obrábění korozivzdorných ocelí.

Mezi tzv. supertvrdé řezné materiály se řadí polykrystalický diamant (PKD) a polykrystalický kubický nitrid bóru (PKNB). Tyto materiály mají velmi vysokou tvrdost a výbornou odolnost vůči opotřebení, ale nevýhodou je jejich pořizovací cena, malá tvarovatelnost a mnohdy i ochotná reakce s některými obráběnými materiály, proto je jejich použití omezeno pouze na speciální případy obrábění. Diamant se používá při obrábění neželezných slitin, keramiky a nekovových materiálů. PKNB je využíván při zpracování superslitin, kalených ocelí a litin, také jím lze obrábět i slinuté karbidy, které obsahují vyšší podíl kobaltu (lisovací nástroje nebo průvlaky ze slinutých karbidů). [10]



Obr. 8 Vlastnosti nástrojových materiálů [2]

2.1 Rychlořezné oceli

Ve snaze o další navyšování řezného výkonu nástrojových ocelí se začalo přidávat velké množství legujících prvků. To vedlo k tomu, že se řezná rychlost zvýšila z $5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ na „neuvěřitelných“ $35 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, proto byl nástrojový materiál označen jako High Speed Steel (HSS), neboli rychlořezná ocel. [3]

Tvrdoost vysokolegovaných ocelí je dosažena zakalením na martenzitickou strukturu a přítomností karbidů legujících prvků Cr, W, Mo a V. Vysoký obsah legur umožňuje dobrou prokalitelnost a ochlazování může probíhat při nízkých teplotách, což vede ke vzniku pouze malých deformací. Kalicí postup těchto ocelí je o něco složitější a zpravidla se provádí stupňovitě v několika prostředích o různých teplotách.

HSS oceli mohou pracovat při teplotách pohybující se až okolo $600 \text{ }^\circ\text{C}$. Jsou proto využívány jako výkonné řezné nástroje, které jsou vystaveny rázům při přerušovaných řezech, tedy nože, frézy, vrtáky, tvarové nástroje, závitníky, výstružníky atd. Pro optimální použití rychlořezných ocelí je důležité zvolit vhodné řezné prostředí, kterým jsou řezné emulze a oleje. [1]

2.2 Slinuté karbidy

Slinuté karbidy jsou nejpoužívanějším řezným materiálem současnosti. Aby bylo dosaženo jejich efektivního používání při obráběcích operacích, bylo nutné nastolit jednotné označení s všeobecnou platností. Proto byla zavedena klasifikační norma ČSN ISO 513, která dělí slinuté karbidy na tyto základní skupiny:

- HW – slinuté karbidy s obsahem primárního WC a zrnitostí větší než $1 \text{ }\mu\text{m}$,
- HF – slinuté karbidy s obsahem primárního WC a zrnitostí menší než $1 \text{ }\mu\text{m}$,
- HC – povlakované slinuté karbidy.

Toto označení se dále dělí do šesti skupin podle použití – P, M, K, N, S a H. Každá ze šesti skupin má svoje barevné označení. Skupina P je označena barvou modrou, M žlutou, K červenou, N zelenou, S hnědou a H je tmavošedá. Takto označené skupiny mají ještě své podskupiny (např. P01, P05, P10, P15, ..., P50), kde se s rostoucím číslem zvyšuje obsah pojícího kovu, roste houževnatost a pevnost v ohybu, klesá tvrdost a otěruvzdornost. Z pohledu doporučených řezných podmínek klesá řezná rychlost, roste posuvová rychlost a průřez odebírané třísky. [10]

Všechny druhy slinutých karbidů (nepovlakovaných i povlakovaných) se vyrábějí ze základního karbidu wolframu (WC) a pojícím kovem je kobalt (Co). Dalšími přidávanými složkami jsou karbidy titanu (TiC), tantalu (TaC), niobu (NbC) a chromu (Cr_3C_2). Uvedené karbidy se přidávají pouze v malém množství, proto aby zpomalily růst základní karbidické fáze WC, to zajistí jemnější zrna, vyšší tvrdost a pevnost.

Nepovlakované slinuté karbidy se také někdy označují podle svého složení jako jednkarbidové (K), dvoukarbidové (P) a vícekarbidové (M).

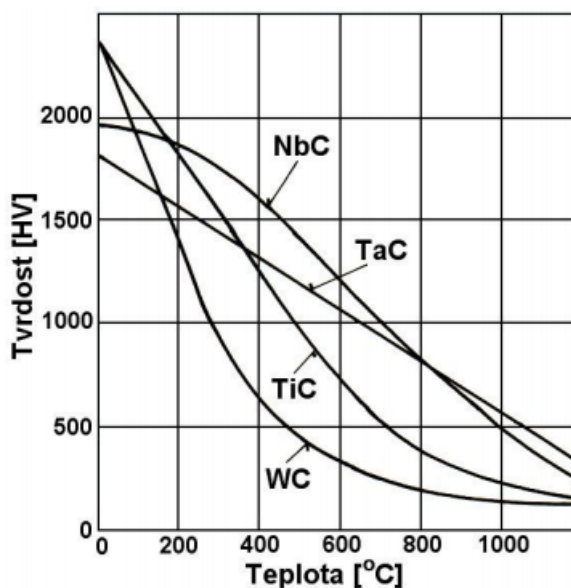
Skupina P se používá při obrábění materiálů vytvářející dlouhou třísku, jako jsou uhlíkové oceli, slitinové oceli a feritické korozivzdorné oceli. Při řezném procesu vznikají velké řezné síly a značné opotřebení na čele (výmol), proto tato skupina obsahuje velké množství TiC a TaC, které zlepšují odolnost čela nástroje proti vylamování. TiC dodává vysokou odolnost proti difuzi při vysokých teplotách, které jsou hlavní příčinou tvorby výmolů na čele nástroje v místě dotyku s odebíranou třískou. Nevýhodou TiC je vyšší křehkost a nižší odolnost proti abrazi v porovnání s WC.

Skupina M je používána pro materiály tvořící dlouhou a střední třísku, jako jsou lité oceli, austenitické korozivzdorné oceli a tvárné litiny. Slinuté karbidy této skupiny se vzhledem k jejich vysoké houževnatosti též používají k těžkým hrubovacím operacím a přerušovaným řezům. Dochází k vydrolování ostří, protože řezné síly se pohybují ve středních až vysokých hodnotách.

Skupina K je vhodná pro materiály s krátkou, drobnou třískou, především šedé litiny, neželezných slitin a nekovových materiálů. Řezné síly přitom jsou poměrně nízké a převládá abrazivní a adhezní opotřebení. Jedinou tvrdou strukturální složkou je WC, který má za pokojové teploty tvrdost srovnatelnou s ostatními karbidy, ale s narůstající teplotou jeho tvrdost klesá rychleji než u ostatních karbidů (viz *Obr. 9*). Proto se slinuté karbidy této skupiny nehodí na obrábění materiálů utvářející dlouhou třísku, která má větší styčnou plochu s čelem nástroje a doba jejího kontaktu je delší.

Z nepovlakovaných slinutých karbidů skupin P, M, K se používá pouze omezený počet druhů na lehké a dokončovací operace. Druhy s vyšším číslem jsou běžně používány pro střední a těžké obrábění, nebo hrubování a mohou být použity i při frézování a vrtání. [10]

Možnost efektivní aplikace jednotlivých skupin je přehledně zobrazeno a shrnuto v *Tab.3*.



Obr. 9 Závislost tvrdosti karbidů na teplotě [12]

Tab. 3 Základní rozdělení slitiných karbidů do skupin [10, 13]

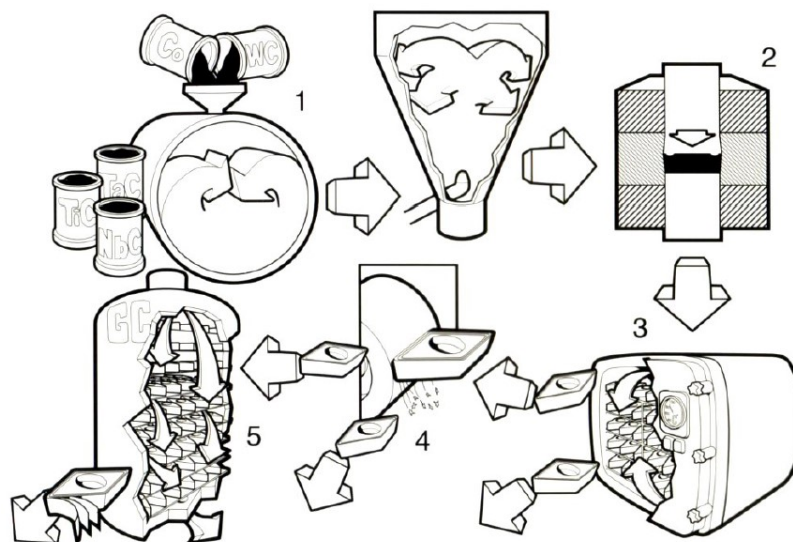
Skupina	Podskupina	Základní chemické složení	Použití
P	P01, P05, P10, P15, P20, P25, P30, P35, P40, P45, P50	WC (30 , 82) % + TiC (8 , 64) % + Co (5 , 17) % + (TaC.NbC)	Pro materiály tvořící dlouhou, plynulou třísku - uhlíkové oceli, slitinové oceli a feritické korozivzdorné oceli.
M	M01, M05, M10, M15, M20, M25, M30, M35, M40	WC (79 , 84) % + TiC (5 , 10) % + TaC.NbC (4 , 7) % + Co (6 , 15) %	Pro materiály tvořící dlouhou a střední třísku - lité oceli, austenitické korozivzdorné oceli a tvárné litiny.
K	K01, K05, K10, K15, K20, K25, K30, K35, K40	WC (87 , 92) % + Co (4 , 12) % + (TaC.NbC)	Pro materiály tvořící krátkou, drobnou třísku - šedá litina, neželezné slitiny a nekovové materiály.
N	N01, N05, N10, N15, N20, N25, N30		Pro obrábění neželezných slitin hliníku, hořčíku a mědi, plastů, kompozitů a dřeva.
S	S01, S05, S10, S15, S20, S25, S30		Pro obrábění slitin titanu a žárupevných slitin železa, slitiny kobaltu, niklu a titanu.
H	H01, H05, H10, H15, H20, H25, H30		Pro obrábění zušlechtěných a kalených ocelí a tvrzených litin.

2.2.1 Výroba slinutých karbidů

Výroba slinutých karbidů se odehrává pomocí technologie nazývané prášková metalurgie. Celý proces výroby se skládá z několika hlavních kroků, u kterých je důležitá mezioperační kontrola, především u složení směsi prášku, jenž nejvíce ovlivňuje kvalitu výsledného výrobku. Hlavními kroky jsou příprava příslušných karbidů a pojícího kovu, jejich smíchání v daných poměrech, lisování směsi a slinování polotovarů.

Obecný postup výroby slinutých karbidů lze rozdělit do následujících operací (*Obr. 10*):

- výroba práškového wolframu,
- výroba práškových karbidů (WC, TiC, TaC.NbC) a kobaltu,
- příprava směsi uvedených prášků – 1,
- formování směsi – 2,
- předslinování zformované směsi ($700\div 850\text{ }^{\circ}\text{C}$) – tento krok bývá spojen se slinováním,
- úprava tvaru předslinovaného tělesa (pokud je potřeba),
- slinování ($1350\div 1650\text{ }^{\circ}\text{C}$) – 3,
- vysokoteplotní izostatické lisování (HIP – Hot Isostatic Pressing), kdy dochází ke slinování při vysokých teplotách a působení tlakového plynu, který zajistí rovnoměrný tlak ze všech směrů. Takto vyrobené slinuté karbidy mají vysokou hustotu s minimálním objemem pórů a jiných vad.
- Dodatečné úpravy (broušení – 4, povlakování – 5).



Obr. 10 Výroba slinutých karbidů [2]

Nejdůležitějším faktorem při výrobě je vztah povrchu částic k jejich objemu. Jestliže se zmenší průměrná velikost částic prášku, zvětší se jejich měrný povrch (mimo velikosti částic hraje roli i jejich tvar a také velikost pórů a kontaktů), a tím klesne drsnost povrchu. To má za následek zvýšení kapilárních sil v objemu prášku, což je označováno jako geometrická aktivita. Povrchová oblast u jednotlivých částic je silně narušena prvky, které nejsou tak silně svázané s krystalickou mřížkou základu. Vzhledem ke kompaktnosti tělesa je zbytková energie vysoká, což způsobuje zvýšenou reakční schopnost nazývanou jako strukturní aktivita prášku (poruchy v částicích prášku jako je reliéf povrchu, hustota vakancí a dislokací a strukturních hranic).

V současné době je možné technologické procesy v práškové metalurgii s velkou přesností řídit a kontrolovat, především pak složení karbidů a jejich zrnitost. [10]

- **Příprava směsi karbidů a pojiva**

Tato část technologického procesu hraje významnou roli, protože výrazně ovlivňuje vlastnosti výsledného výrobku. Hlavním cílem tohoto kroku je zajištění jemnozrné, homogenní práškové směsi karbidů a pojiva mletím směsi za sucha nebo za mokra. Obzvláště důležité je, aby byla jemná karbidická zrna rovnoměrně dispergována a perfektně obalena ještě jemnějším práškem pojiva (tzn. kobalt musí být co nejjemnější). Výhoda mokrého mletí je v tom, že pracovní kapalina napomáhá disperzi částic, minimalizuje pracovní teplotu a zabraňuje oxidaci. Nevýhodou je však požadavek na dokonalé vysušení směsi před dalším zpracováním, to ale není až takový problém vzhledem k používaným kapalinám, které mají nízký bod varu.

Proces mletí obvykle probíhá v kulových mlýnech, naplněných mlecími kuličkami, které na pracovní směs působí rázovým a třecím účinkem, což je důležité z hlediska dokonalého rozmíchání a homogenizace směsi. Kuličky i obležení bubnu by mělo být ze stejného druhu karbidu, jako je samotná připravovaná směs, jinak může docházet k nežádoucímu znečištění od opotřebovaných kuliček. Mlecí účinek může být zvýšen pomocí vibrační pružně uloženého bubnu mlýnu. Mletí je časově náročný proces, který trvá i několik dnů (48–72 hodin, u nejjemnějších směsí až 96–120 hodin), po mletí se směs suší a prosívá. [10, 14]

- **Formování směsi**

Směs práškových karbidů lze formovat několika způsoby, izostatické lisování za studena, hydrostatické lisování, vytlačování přes trysku požadovaného tvaru, litím či vstřikováním do pomocných forem. Při výrobě vyměnitelných břitových destiček se nejčastěji používá

metoda lisování ve formovacích lisech. Protože se lisuje vysoce disperzní prášková směs s nízkou plasticitou, je do směsi přidávána látka zvaná plastifikátor, která má za úkol snížit tření mezi lisovacími nástroji a samotnou směsí. Také usnadňuje vzájemný skluz částic a tím zhuťňuje danou směs. Ovšem nejpodstatnějším úkolem plastifikátoru je zachování tvaru po vyhození polotovaru z lisovací formy.

Aby bylo dosaženo rovnoměrného zhuťnění v celém objemu, je nejčastěji používán oboustranný způsob lisování, kdy se proti sobě pohybují dva lisovníky a současně formují směs, která je umístěna mezi jejich čelními plochami. Tyto plochy mohou mít negativní tvar čela, včetně různých provedení utvařečů třísky. Lisy pro formování polotovarů břitových destiček se označují jako tabletové nebo pilulkové a lze do nich upínat různé lisovníky a lisovnice pro výrobu rozmanitých typů a tvarů břitových destiček.

Nesmí se opomínat to, že rozměry výlisku musejí být větší než rozměry finálního výrobku, protože během slinování dochází k všestrannému lineárnímu smrštění, které se pohybuje okolo 20 %. Smrštění je ovlivněno druhem slinovaného karbidu, velikostí karbidických zrn, lisovacím tlakem a částečně i obsahem pojícího kovu. [10, 14]

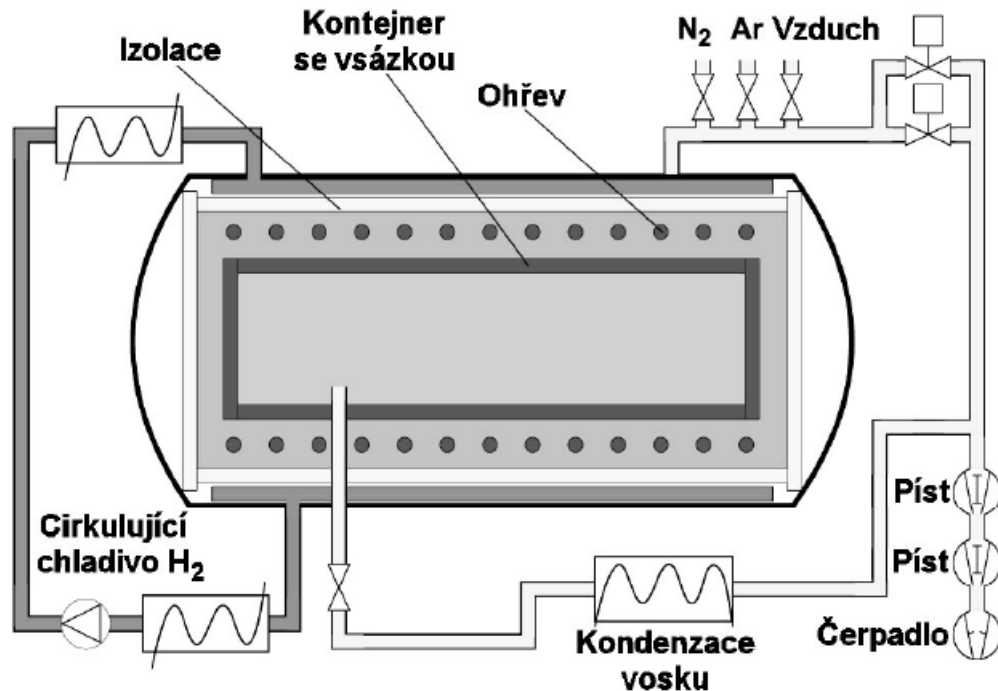
- **Slinování**

Během slinování je zformované těleso umístěno do slinovací pece (*Obr. 11*), kde je postupně ohříváno a následně ochlazeno za řízených podmínek v ochranné atmosféře (H_2 , Ar, vakuum). Poté, co je slinování u konce, výrobek je zcela zhuťněn a vykazuje požadované vlastnosti jako je mikrostruktura, mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti.

Celý proces slinování se dělí na dvě části, předslinování, které zajistí odstranění plastifikátoru při $700\div 850$ °C, a samotné slinování. Tyto dvě části mohou být z technologického hlediska spojeny v jednu operaci.

Slinování je proces, kdy je materiál zhuťněn, vytvoří se hranice mezi zrny tvrdé fáze a difuzní procesy promísí jednotlivé složky. Proces slinování je považován za nejkritičtější fázi výroby slinutých karbidů.

Částice pojivové fáze vytváří kostru pro tvrdé karbidické částice slinutého výrobku, dodávají mu houževnatost a fungují jako „tmel“ pro vzájemné spojení zrn tvrdé fáze. Pojivová fáze je složena především z kobaltu a malého množství rozpuštěného wolframu. Nad teplotou 418 °C má kobalt stabilní strukturu, tvořenou plošně středěnou kubickou mřížkou. Díky rozpuštěnému wolframu se po ochlazení slinovaného tělesa mřížka stabilizuje a nemění se, což má za následek tvoření četných vrstvených chyb. [10, 14]



Obr. 11 Schéma slinovací pece [2]

2.3 Povlakované slinuté karbidy

Velmi významným krokem ve výrobě slinutých karbidů bylo zavedení vyměnitelných břitových destiček s tenkou povlakovanou vrstvou TiC firmou Sandvik Coromant v roce 1969. Od té chvíle prošly tenké vrstvy velkým pokrokem, a to jak v oblasti použitých materiálů, tak ve zlepšování jejich užitných vlastností. Jako konkurence jiným nástrojovým materiálům původně postačovalo několik druhů povlaků. Dnes je k uspokojení rostoucích nároků každoročně vyvíjeno a zdokonalováno nespočet nových druhů povlakovaných linitých karbidů pro různé řezné operace. Jednotlivé materiály se od sebe liší druhem povlaku, tloušťkou povlaku, kombinací vrstev, metodou povlakování atd. Pro každou řeznou aplikaci je důležité správně zkombinovat výše uvedené faktory, protože na této skutečnosti především závisí efektivnost použití. [10]

Vývojové stupně povlakovaných slinutých karbidů jsou obvykle uváděny následovně:

- **1. generace**

Jednovrstvý povlak TiC, tlustý asi 6 μm . Měl špatnou soudržnost se substrátem, což bylo způsobeno nedokonalou technologií povlakování, kdy docházelo k tvoření křehkého eta-karbidu. Při obrábění proto docházelo k rychlému odlupování povlaku.

- **2. generace**

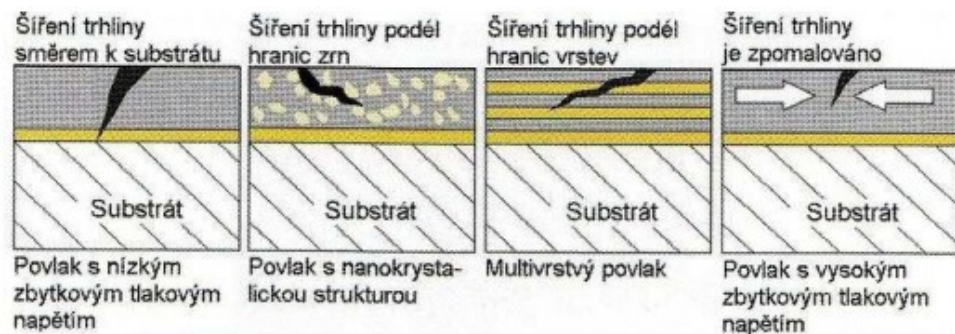
Jednovrstvý povlak TiC, TiCN, TiN bez eta-karbidu na přechodovém rozhraní mezi povlakem a podkladem. Vylepšení povlakovací technologie přineslo možnost tvorby povlaků o větší tloušťce (7 až 10 μm), bez problému jejich odlupování.

- **3. generace**

Vícevrstvý povlak (dvě až tři vrstvy, případně i více) s ostře vyznačenými přechody mezi jednotlivými vrstvami. Jejich posloupnost je řazena tak, že mezi prvními jsou nanášeny povlaky s dobrou přilnavostí k podkladu, a jako poslední se nanášejí povlaky s vysokou tvrdostí a odolností proti opotřebení a oxidaci za zvýšených teplot. Nejčastější řazení jednotlivých vrstev bývá v tomto pořadí od podkladu k povrchu takto: TiC-Al₂O₃, TiC-TiN, TiC-TiCN-TiN, TiC-Al₂O₃-TiN.

- **4. generace**

Speciální vícevrstvý „multivrstvý“ povlak, který často bývá složený i z více než deseti vrstev a mezivrstev, kde jsou přechody mezi jednotlivými vrstvami méně či více zřejmé. Vrstvy jsou ze stejných materiálů jako u povlaků 3. generace. Jejich velkou výhodou je schopnost odklánět a zpomalovat šíření trhlin od povrchu povlaku k substrátu (Obr. 12).



Obr. 12 Vliv různých typů povlaků na šíření trhlin [10]

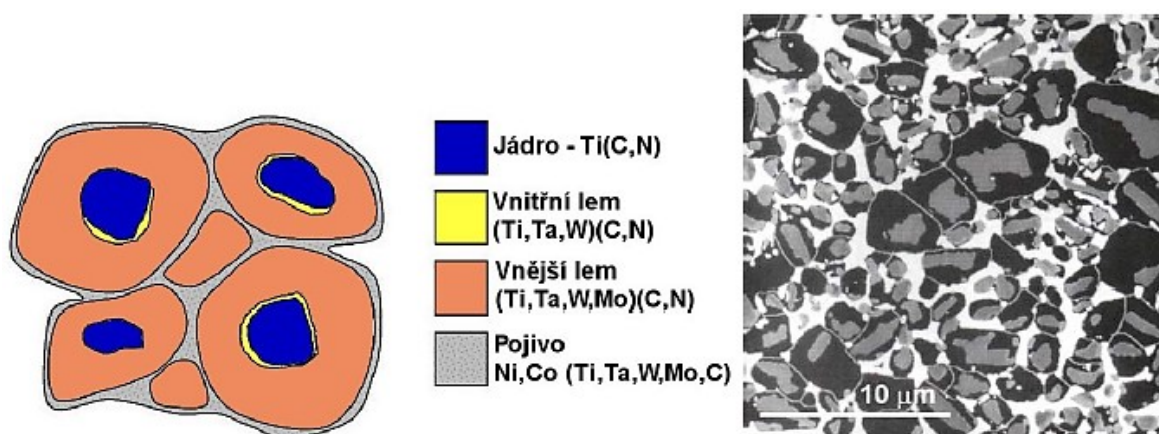
Do 4. generace také patří diamantové, nanokompozitní, gradientní (složený vrstvy se plynule mění od substrátu k povrchu povlaku), supermřížkové a „inteligentní“ (keramické vyměnitelné břitové destičky, které jsou schopny průběžně monitorovat opotřebení nástroje) a i povlaky z kubického nitridu bóru.

Povlaky jsou podle tvrdosti děleny do dvou skupin: tvrdé povlaky s tvrdostí menší než 40 GPa a supertvrdé povlaky s tvrdostí větší než 40 GPa. Většina povlaků patří do skupiny tvrdých povlaků, zatímco do druhé skupiny povlaků lze zahrnout jen několik materiálů – kubický nitrid bóru, DLC (uhlík podobný diamantu) a polykrystalický diamant. [10]

2.4 Cermety

Cermet je kompozitní materiál vyrobený spékáním směsi prášku kovů a keramiky. Odtud také vznikl jejich název, který je složením prvních tří hlásek ve slovech „CERamics“ (keramika) a „METal“ (kov). Je to řezný materiál tvořený tvrdou fází TiC, TiN, TiCN a kovovým pojivem. V porovnání se slinutými karbidy mají cermety vyšší odolnost vůči otěru a menší sklon k tvorbě nárůstku na břitů nástroje, vysokou pevnost za tepla a chemickou stabilitu, protože TiC je termochemicky stabilnější než WC. Naopak nevýhodou oproti slinutým karbidům je, že jsou méně houževnaté a více náchylné na teplotní rázy.

Cermety jsou používány především pro dokončovací operace, kde dokážou dodržet úzké výrobní tolerance, stálost řezného procesu, a hlavně nízkou drsnost opracovaných ploch. To je dáno druhem tvrdé fáze cermetů, která má výbornou odolnost proti adhezi a nízkou náchylnost k reakci s obráběným. [10, 15]



Obr. 13 Schéma struktury cermetu – vlevo, struktura cermetu na bázi TiCN – vpravo [2]

2.5 Řezná keramika

Řezná keramika je obecně charakterizována jako převážně krystalický materiál, který je složen hlavně z anorganických sloučenin nekovového charakteru. Tato definice zahrnuje jak tradiční keramiku (porcelán, cermet, cihly), tak i brusné materiály a řadu tzv. nových keramických látek, jako je oxidová keramika (Al_2O_3 , ZrO_2 , ThO_2 , BeO , MgO , UO_2), ferity, feroelektrická, nitridy, karbidy, boridy. Nová keramika je charakteristická tím, že je vyráběna z velmi čistých surovin a často z čistých výchozích chemikálií, jako tomu je u keramiky syntetické. Pod pojmem „nová keramika“ se nacházejí látky krystalické, oproti tradiční keramice, která obsahuje i značnou část amorfni (skelné) fáze.

Keramické látky jsou spojeny iontovými a kovalentními meziatomovými vazbami, ale nevyskytují se jako čistě jedna vazba, vždy se objevují oba typy vazeb současně.

Rozsáhlý vývoj keramických materiálů významně zlepšil některé jejich vlastnosti tak, že bylo umožněno rozšíření jejich aplikací ve strojírenské výrobě. K tomu přispěly pokroky v obrábění keramiky v surovém stavu, ale i ve finální fázi výroby polotovarů.

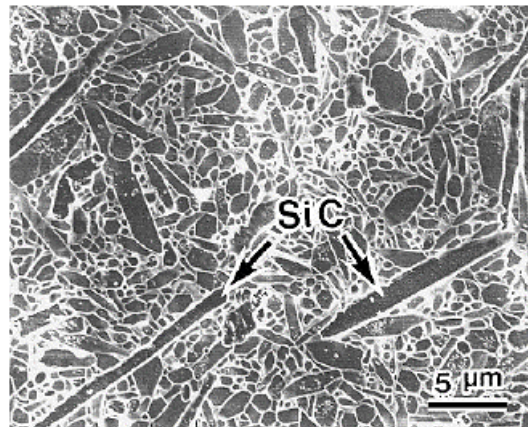
Specifické vlastnosti keramických materiálů je předurčují pro aplikace především v následujících odvětvích technické praxe:

- **tepelné aplikace** – odolnost proti vysokým teplotám, stabilita tvaru při tahovém a tlakovém zatížení i za vysokých teplot, odolnost proti teplotním rázům, malá délková roztažnost, vysoká schopnost teplotní akumulace;
- **mechanické aplikace** – vysoká tvrdost, odolnost proti opotřebení, výborné a stabilní kluzné vlastnosti, nepřítomnost statického náboje, nízká měrná hmotnost, vysoká tvarová přesnost, úzké rozměrové tolerance;
- **elektrotechnika, elektronika** – vynikající izolační vlastnosti i za vysokých teplot, vysoká dielektrická pevnost, vysoká stabilita výboje, definovaná dielektrická konstanta, dobré vysokofrekvenční vlastnosti, dobré mechanické vlastnosti;
- **fyzikální a chemické aplikace** – chemická odolnost vůči kyselinám a louhům, chemická inertnost, odolnost vůči korozi a erozi, velký měrný povrch, filtrační schopnost, akumulární a pohlcovací schopnost.

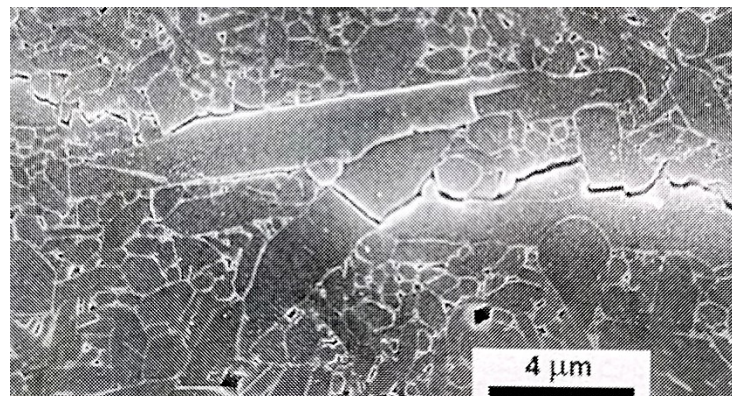
Některé vlastnosti keramik se mohou různě kombinovat a měnit podle toho, jak to zrovna vyžaduje konkrétní využití materiálu. Kromě již zmíněných oblastí využití se vybrané keramické materiály často používají při výrobě řezných nástrojů, kde s výhodou používány hlavně pro jejich následující vlastnosti:

- vysoká tvrdost a odolnost proti plastické deformaci,
- odolnost proti vysokým teplotám a jejich změnám,
- vysoká chemická stabilita, nereakčnost s obráběným materiálem,
- vysoká trvanlivost a řezivost
- dostupnost základních surovin z tuzemských zdrojů,
- poměrně nízká cena. [9, 10]

Keramické materiály tvořené čistým oxidem hliníku mohou být vyztuženy vlákny karbidu křemíku (SiCw) ve formě whiskerů v rozsahu 20-30 objemových %. Tyto vlákna jsou dlouhá asi 20 μm a mají průměr 1-2 μm . Přidáním těchto vláken se výrazně zvýší houževnatost, odolnost proti vydrolování a vylamování ostří a umožňuje používat řeznou kapalinu. Tím se dosáhne vysokých řezných výkonů při obrábění niklových slitin, kde u nevyztuženým keramikám hrozí nebezpečí porušení právě v důsledku vydrolování a vylamování ostří. Vylepšení vlastností závisí především na rozhraní matrice-vlákno, velikosti whiskerů a jejich počtu v matrici, přičemž vazba mezi nimi a matricí musí být čistě mechanická – matrice musí vlákno „svírat“ bez jakékoliv chemické reakce, která by zhoršila vlastnost samotného vlákna. Whiskery vylepšují vlastnosti keramiky hlavně proto, že brání šíření trhlin materiálem (Obr. 14). [2, 3, 9]



Obr. 14 Keramika Si_3N_4 vyztužená SiCw [2]



Obr. 15 Odklon trhliny protáhlým vláknem Si_3N_4 [10]

2.6 Supertvrdé řezné materiály

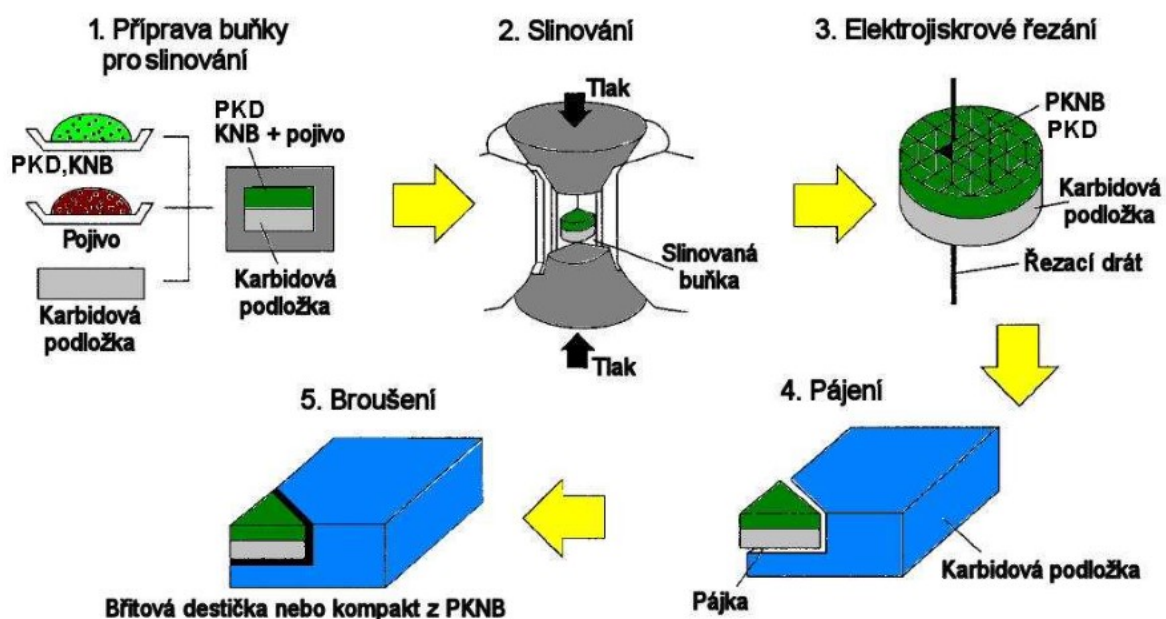
Všeobecné označení supertvrdých řezných materiálů mají dva synteticky vyráběné materiály. Je to polykrystalický kubický nitrid bóru (PKNB) a polykrystalický diamant (PKD). Řezné nástroje z nich vyrobené se používají ve formě jednotlivých krystalů spojených do kompaktního tělesa pomocí různých pojiv. Vzhledem k jejich výborným mechanickým vlastnostem, především tvrdosti a pevnosti v tlaku, jsou používány jako nástrojové řezné materiály, určené hlavně pro speciální aplikace.

Diamant má poměrně nízkou teplotní stálost (při dosažení teploty nad 650 °C se mění na grafit), proto nesmí být používán při obrábění materiálů na bázi železa (oceli, litiny), kde by mohlo docházet při nadměrném zahřátí k silné difuzi mezi nástrojem a materiálem a tím i k rychlému opotřebení v důsledku chemické reakce.

Při obrábění diamantovými nástroji je doporučeno chladit běžnými procesními kapalinami, u kterých je požadováno, aby byly do místa řezu dopraveny pod vysokým tlakem, protože se obrábí vysokými výkony a také musí být zajištěno efektivní odstraňování třísek.

Kubický nitrid bóru je využíván při soustružení a frézování kalených ocelí a tvrzených litin, kde výhodně nahrazuje brusné operace. Minimální tvrdost obráběného materiálu se doporučuje 45 HRC, při opracování měkčích materiálů je vzhledem k vysoké ceně nástroje z PKNB jeho použití neekonomické. [10]

Výroba vyměnitelných břitových destiček z PKNB a PKD je znázorněna na *Obr. 16*.



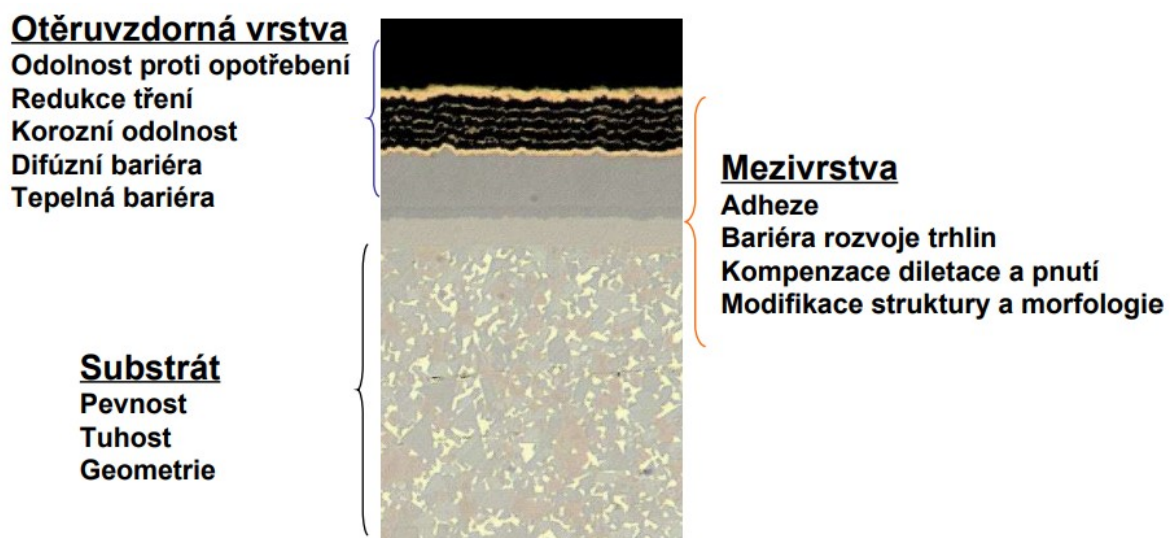
Obr. 16 Postup výroby vyměnitelných břitových destiček z PKNB [dle 2]

3 POVLAKOVÁNÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ

Jestliže rozvoj nástrojových materiálů ze slinutých karbidů umožnil pokrok v technologii obrábění, potom samotné povlakování je pokračováním tohoto technologického pokroku.

Depozice vrstev se uskutečňuje jako finální operace na hotovém již tepelně zpracovaném substrátu. Deponovat se mohou běžné slinuté karbidy, ale existují i takové podkladové slinuté karbidy, které jsou k tomu přímo určeny. Na podkladový substrát se nanáší tenká vrstva s vysokou tvrdostí a výbornou odolností proti opotřebení. Samotný povlak ve formě tenké vrstvy má vyšší tvrdost a pevnost než stejný homogenní materiál v jakékoliv jiné podobě. Zmíněné výhodné vlastnosti vycházejí především z toho, že povlak neobsahuje žádné pojivo, má o jeden i více řádů jemnější zrnitost a obsahuje méně strukturních defektů, navíc slouží jako bariéra vůči difúznímu opotřebení nástroje. [16, 17, 18]

Nanášené vrstvy je potřeba chápat jako systém, protože vrstva dosahuje specifických vlastností se substrátem. Samotné tenké vrstvy mají na rozdíl od objemových těles odlišné vlastnosti z důvodu jejich tloušťky, ale i důsledkem depozičních procesů, které jsou nerovnovážné a podněcují vznik metastabilních fází. [18]

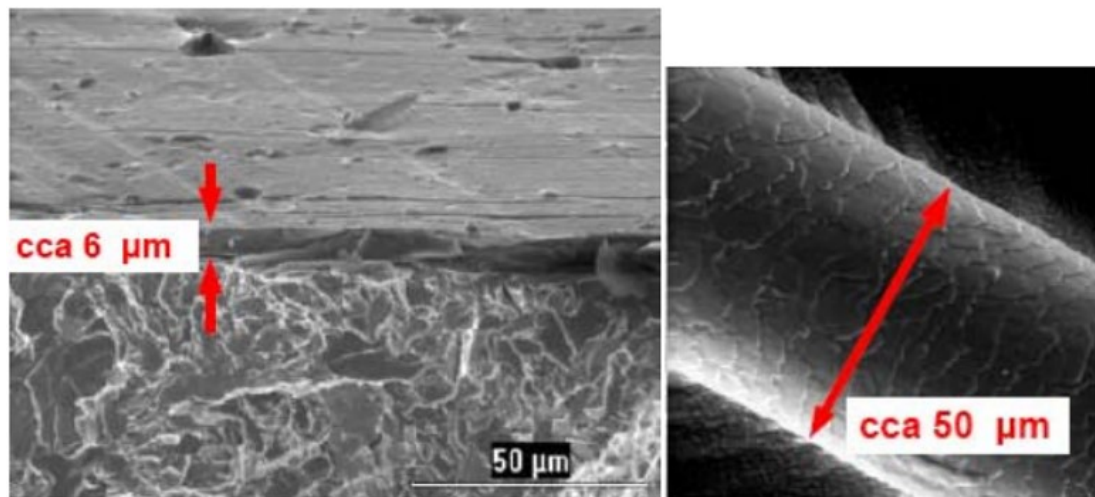


Obr. 17 Systém tenká vrstva – substrát [17]

Několikrát v textu zazněl pojem tenká vrstva, pojďme si jej trochu přiblížit.

Co je to tenká vrstva?

O tenké vrstvě se dá hovořit tehdy, pokud se jedná o materiál o velikosti řádů desítek nanometrů až po několik mikrometrů, který je nanesený na základním podkladovém materiálu – substrátu. Pro srovnání tenké vrstvy byl použit lidský vlas (Obr. 18). [18]



Obr. 18 Porovnání tloušťky tenké vrstvy a lidského vlasu [18]

3.1 Úprava povrchu před povlakováním

Důležitým faktorem soudržnosti systému je dobrá adheze tenké vrstvy k substrátu. Právě adheze je výrazně ovlivněna přípravou substrátu před povlakováním. Upravuje se drsnost povrchu, nerovnosti, ostrost řezných hran apod. Projevem nedůkladně provedené předdepoziciční úpravy povrchu substrátu může být odlupování vrstvy, tvorba prasklin a dutin či jiných nežádoucích jevů.

Především u slinutých karbidů je důležité věnovat přípravě zvýšenou pozornost z důvodu křehkosti materiálu a náchylnosti řezných hran k odštípnutí. Při manipulaci s nástroji je potřeba vyhnout se prudkým rázům, jejich vzájemnému kontaktu a příliš dlouhému čištění v ultrazvukové lázni. [19]

3.1.1 Úprava řezných hran

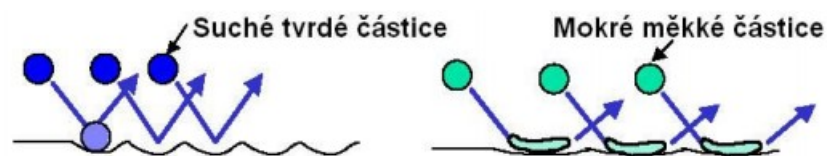
Jde o úpravu hran, které jsou po broušení plné defektů a různě „otřepené“. Tato místa mohou být koncentrátoři napětí a mohou způsobit narušení tenké vrstvy ještě před samotným obráběním z důvodu neuvolněného zbytkového napětí ve vrstvě. Při řezném procesu dochází na ostrých hranách k adhezivně-koheznímu porušení povlaku.

Hrany nástrojů se po broušení upravují *omíláním*, *kartáčováním* nebo *otryskáváním*. Tyto povrchové úpravy mohou změnit mikrogeometrii nástroje maximálně v řádek mikrometrů (cca do 10 μm), a tím může být zvýšena živostnost nástroje až 200% oproti nástroji s neupravenou řeznou hranou.

- **Otryskávání** je prováděno proudem vzduchu, který s sebou unáší jemné abrazivo.

Částice dopadají vysokou rychlostí na opracováváný povrch (až 700 km.h^{-1}), kde dochází k abrazivnímu opotřebení, jehož rozsah zejména závisí na rychlosti a úhlu dopadu částic, jejich hmotnosti a tvaru. Jako tryskácké médium se používají syntetická abraziva (Al_2O_3 , SiC), přírodní oxidy, struska, diamantový prášek, případně kovové broky, které jsou vhodné na objemnější nástroje. [17, 19]

Další varianta otryskávání je pomocí speciální technologie Aero Lap, která pomocí metody mokrého tryskání usměrňuje proud kompozitního abraziva Multi-Cone. Částice tohoto abraziva proudí tryskou s tlakem vzduchu 0,5 – 0,8 MPa a dopadají pod úhlem $30^\circ - 60^\circ$ na opracováváný povrch, díky tomu je jemně broušen a leštěn. Zrna Multi-Cone o velikosti 0,5 – 2 mm tvoří diamantový nebo korundový prášek a speciální pojivo, které zajistí kompaktnost a pružnost zrn. [17, 21, 22]



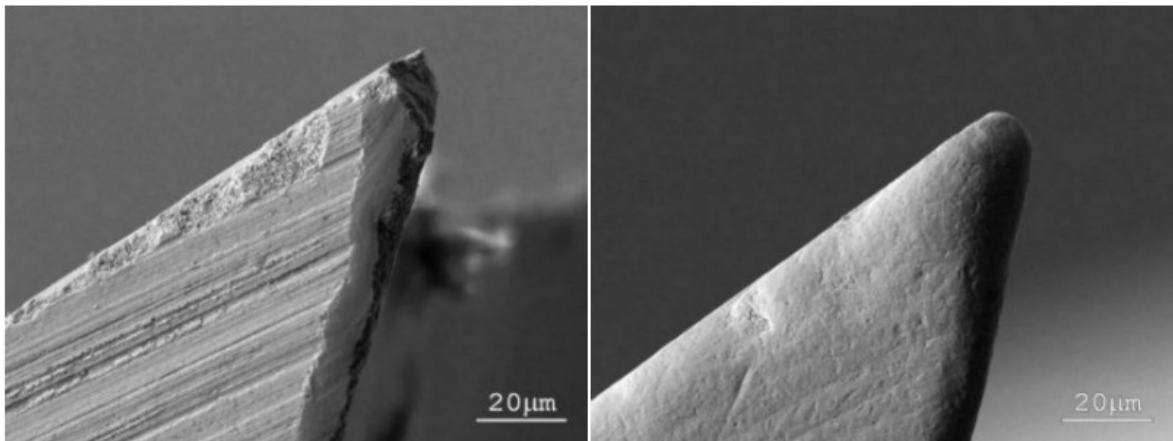
Obr. 19 Rozdíl mezi úpravou proudem tvrdých a měkkých částic [dle 17]

- **Kartáčování** je další způsob úpravy řezných hran. Používají se k tomu různé druhy vláken kartáčů. Vzhledem k tvrdosti slinutých karbidů se jako materiály vláken používá ocel, případně různá tvrdá polymerní vlákna naimpregnovaná abrazivem (Nylon Abrasive Filament – NAF). [17, 19]



Obr. 20 Úprav řezných hran kartáčem [17]

- **Omílání** v granulátech s brusnou pastou je další technikou úpravy hran nástrojů. Pro tuto úpravu ploch je potřebné důkladně zvolit typ granulátu, na který může být použita široká škála materiálů. Ať už to jsou tělesa na bázi oxidů kovů nebo keramiky až po rozdrčené skořápky ořechů. Tímto „definovaným“ otupením dojde k zaoblení rezné hrany na rádius 10 μm , což vede ke snížení rezných sil ve všech třech složkách. To v konečném důsledku vede ke snížení teploty v místě řezu a následnému zvýšení životnosti nástroje. [23]



Obr. 21 Břit před a po úpravě omíláním [23]

3.1.2 Chemické čištění

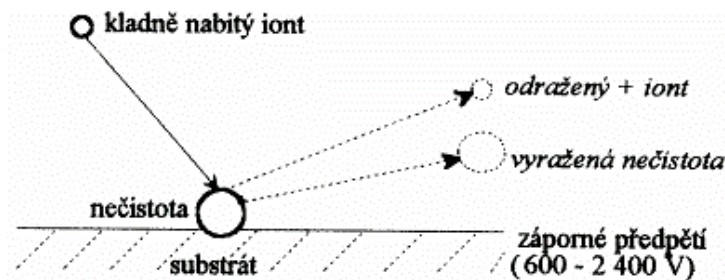
K odstranění organických nečistot jako je mastnota, prach a ulpělé částice brusiva slouží chemické čištění. Jako čisticí kapaliny se využívají alifatické uhlovodíky (alkoholy na ropné bázi, mastné kyseliny) a aromatické uhlovodíky (toluol, benzen, xylol), které se používají jen tehdy, pokud je potřeba rozpustit silná znečišťovadla. Pro intenzivnější čištění se používá ultrazvuk. Nástroje by se neměli vzájemně dotýkat a měl by být omezen kontakt s ocelovým dnem čisticí nádoby. Pokud nejsou dodrženy tyto zásady, může dojít k vyštípnutí hrany nástroje a k šíření trhlin, které se nemusí projet ihned po vyjmutí z vany, ale až při obrábění. Po chemickém čištění následuje vysušení. [19]

3.1.3 Čištění iontovým bombardem

Je velmi důležitým krokem v předdepoziční přípravě substrátu. Tento krok se provádí přímo v depoziční komoře jako poslední etapa čištění, poté bezprostředně následuje samotná depozice tenké vrstvy. [19]

Jde o proces na atomární úrovni. První fází je odplynění nástrojů předehřevem ve vakuu. Kladné ionty odpařeného materiálu katody, popř. procesního plynu, dopadají na povrch

substrátu, kde jsou zakotveny atomy ulpěných nečistot, které mají vysokou povrchovou energii. Předáním vysoké kinetické energie iontů (cca 10 eV) dojde k vyražení nečistot z povrchu substrátu. Energie dopadajících iontů je dána záporným předpětím přivedeným na substrát, tlakem plynu v komoře, typem (hmotností) ionizovaných částic, jejich proudovou hustotou a úhlem dopadu. [10]



Obr. 22 Schéma principu iontového čištění [18]

3.2 Metoda PVD

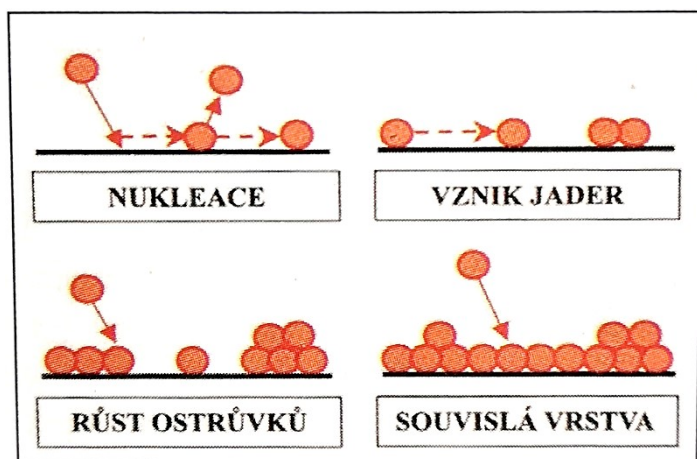
Metoda fyzikálního napařování z plynné fáze (Physical Vapour Deposition) neboli PVD je charakteristická tím, že se provádí při nízkých teplotách (150 – 500 °C) v prostředí sníženého tlaku (vakua o hodnotě 0,1 – 1,0 Pa) kondenzací částic, které se uvolňují fyzikálními metodami ze zdroje částic (terče, targety) *napařováním* nebo *napařováním* a *iontovou implantací*. Uvolněné částice jsou ionizovány a reagují s inertním a reaktivním plynem (Ar a N₂) v pracovní komoře. Poté jsou urychlovány záporným předpětím směrem k povrchu substrátu, kde se usazují formou tenké vrstvy homogenního povlaku, tlustého 1 – 5 μm. Vzniklá vrstva povlaku je tvořena z jednotlivých dopadajících atomů (Obr. 23), které jsou nejdříve zachyceny sorpčními procesy, poté se pohybují po povrchu a buďto jsou zachyceny trvalou vazbou, nebo jsou uvolněny zpět. Díky pohyblivosti atomů po povrchu se mohou další dopadající atomy spojit s již dříve zachycenými a postupně tak vytvořit izolované zárodky (jádra) a ostrůvky narůstající vrstvy. Ty se postupně spojují, dokud nevytvoří souvislou, která roste a zvětšuje svoji tloušťku. [10, 24]

Depozice vrstev PVD je využívána pro vytváření povlaků na nástrojích z rychlořezné oceli, součástech z hliníku a plastů, ale i na velmi tenkých, pouze několik mikrometrů tlustých fóliích z polyethylenu, polypropylenu a dalších materiálů bez jejich tepelné degradace během procesu povlakování. Celý proces depozice se obecně rozděluje do třech na sebe navazujících kroků:

- převedení materiálu do plynné fáze,

- transport par ze zdroje k substrátu,
- vytváření vrstvy na povrchu substrátu.

Jde o nejkoličtější metodu depozice vrstev, protože u ní není použit žádný nebezpečný materiál a během procesu deponování se neuvolňuje žádná toxická látka. Dalšími výhodami PVD jsou vysoká odolnost nanesené vrstvy, nízký koeficient tření, velké množství kombinací různých druhů vrstev, tvorba přesných tlouštěk vrstev a možnost povlakování ostrých hran (ostří nástroje s poloměrem zaoblení pod 20 μm). [17, 18]



Obr. 23 Schéma vzniku PVD povlaku [10]

Hlavní nevýhodou PVD je složitý vakuový systém a stínový efekt, který způsobuje tvorbu nedokonalé vrstvy nebo se povlak na plochách nástroje netvoří vůbec, protože neleží ve směru odpařovaných částic. Proto je důležité používat rotační držáky nástrojů, které zajistí pohyb předmětů, a tím i rovnoměrné ukládání povlaku po celém jejich povrchu. [10]

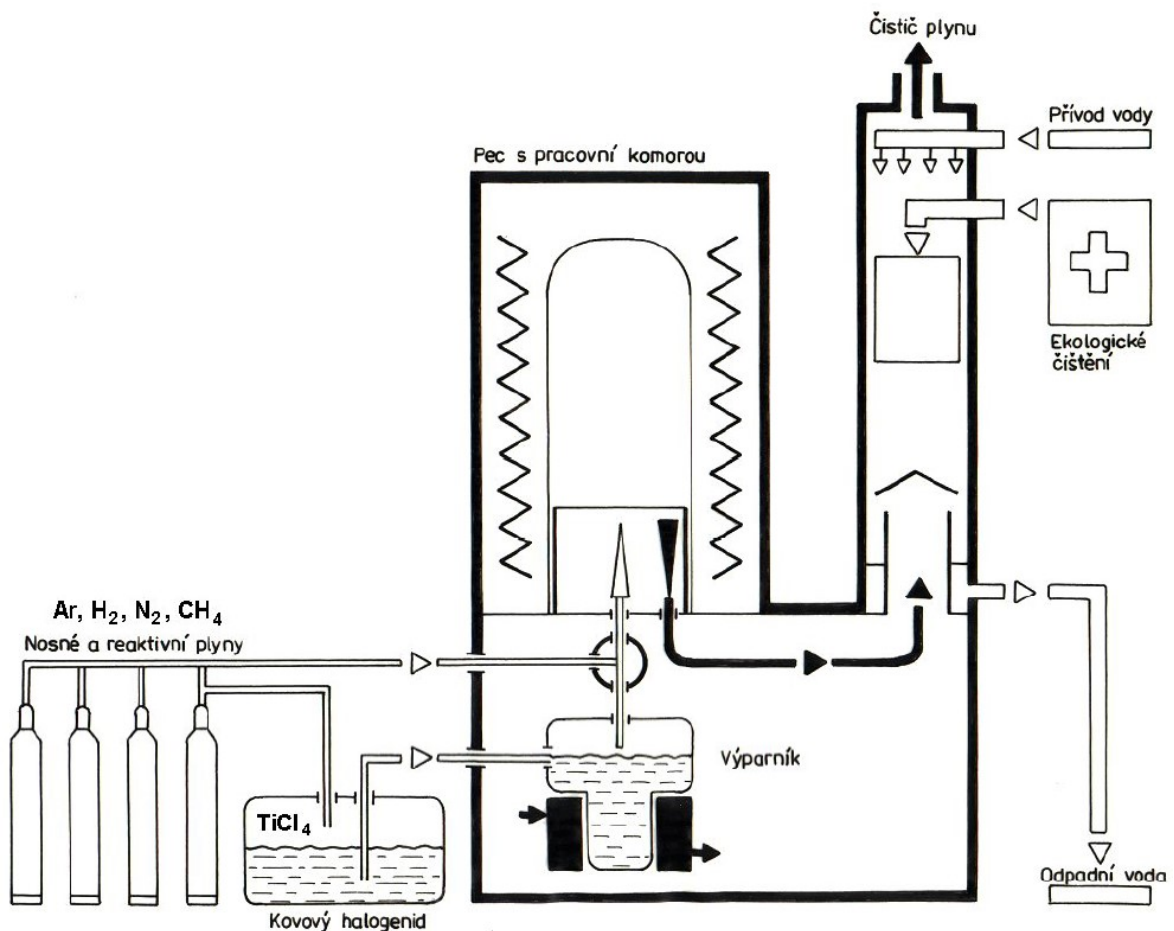


Obr. 24 Rotační držák pro PVD [25]

3.3 Metoda CVD

Metoda chemického nanášení povlaků z plynné fáze (Chemical Vapour Deposition) neboli CVD probíhá za vysokých teplot (1000 – 1200 °C). Tento způsob depozice se hlavně využívá pro povlakování slinutých karbidů a nejčastěji je prováděn v následujících variantách: tepelně, plazmaticky, elektronově a fotonově indukován.

Tento chemický proces je založen na reakci plynných sloučenin v plazmě, která se vytváří v bezprostřední blízkosti povrchu povlakovaného slinutého karbidu, kde se poté ukládají produkty heterogenní reakce. Přitom se požaduje, aby výchozí plyny obsahovali stabilní a zároveň těkavou sloučeninu, která se v důsledku přivedené energie (ohřevem, plazmou, laserem) chemicky rozkládá. Produkty tohoto rozkladu jsou ukládány na ohřátý povrch deponovaného předmětu a působí zde jako katalyzátor. Aby se uskutečnila požadovaná reakce, kterou je vytvoření povlaku, musí plyn obsahovat i nekovový reaktivní plyn (např. N_2 , NH_4 , CH_4).



Obr. 25 Schéma povlakovacího zařízení pro metodu CVD [2]

CVD povlakováním lze připravit různorodé vrstvy kovů, polovodičů a různých chemických sloučenin v krystalické nebo amorfní podobě, které mají vysokou čistotu a tím i požadované vlastnosti. Výhodou tohoto procesu je vysoká teplotní stabilita a adheze povlaku, proces je ekonomicky nejvýhodnější pro tvorbu silných vrstev a také je vhodný tam, kde je nutné povlakovat nepřístupné dutiny a drážky. Mezi další výhody patří relativně nízké náklady na zařízení a ovládání procesu. Z tohoto důvodu je technologie CVD vhodná pro velké a střední série výrobků se slučitelností s ostatními výrobními postupy. V důsledku vysokého pracovního tlaku plynné směsi (1 – 100 kPa) se předměty rovnoměrně povlakuji ze všech stran bez nutné rotace v zařízení.

CVD technologie má i několik nedostatků, mezi které se řadí vysoká energetická náročnost, což je spojené s dlouhým pracovním cyklem (8 – 10 hodin), vysoké pracovní teploty (ty mohou nepříznivě ovlivnit vlastnosti substrátu i povlaku samotného). Dále je to neschopnost povlakování ostrých hran, při procesu se používají ekologicky nevyhovující plynné směsi a také vznikají tahová napětí ve vrstvě v důsledku rozdílných koeficientů délkové roztažnosti. [10, 17, 26]

U metody CVD existuje mnoho modifikací, které se liší způsobem převodu materiálu povlaku do plynné fáze.

- **PACVD, PECVD**

Zásadní změnu v depozici tenkých otěruvzdorných vrstev přinesly plazmaticky aktivované CVD metody (Plasma Assisted CVD, Plasma Enhanced CVD), které se od té klasické liší v tom, že využívají nižší pracovní teploty, ale zároveň se nemění jejich princip vytváření povlaku z plynné fáze. Molekuly plynu jsou ionizovány plazmovým výbojem, v komoře reaktoru při tlaku (100 – 300 MPa), tím se sníží teplota depozice na 400 až 600 °C.

- **MTCVD**

CVD za středních teplot (Middle Temperature CVD) je další metodou, která pracuje se sníženou teplotou v rozmezí 700 až 850 °C. Rozdílný je i použitý plyn, u této metody je využívána vstupní sloučenina acetonitril, nebo také vysoce toxický a hořlavý metylkyanid.

- **MWP-CVD**

Je mikrovlnní plazmatická CVD metoda (MicroWave Plasma CVD), která se od té klasické liší nižší pracovní teplotou pohybující se běžně okolo 600 °C, někdy i méně.

Existuje a dále je vyvíjeno mnoho dalších modifikací klasické metody CVD. [10, 17]

3.4 Vlastnosti povlaků a jejich hodnocení

Povlaky se nanášejí jak jednovrstvé, tak i vícevrstvé, podle toho, na jakou obráběcí aplikaci a za jakých řezných podmínek budou použity. Dnes hlavní výrobci řezných nástrojů nabízejí mnoho povlaků s odlišnými vlastnostmi, které zásadně zvyšují hodnoty těchto vlastností. Hlavní faktory, které ovlivňují mechanické a fyzikální vlastnosti a tím i řezný výkon povlakovaných nástrojů, jsou druh povlaku, jeho tloušťka, metoda povlakování a výchozí substrát. Taktéž je důležitá i drsnost povlaku, jeho adheze k podkladu a koeficient tření. Mezi nejdůležitější chemické vlastnosti patří odolnost vůči oxidaci, chemická a tepelná stabilita. Obecné porovnání základních povlakových materiálů je zaneseno do *Tab.4.* [10]

Tab. 4 Srovnání vlastností základních povlakovacích materiálů [dle 10]

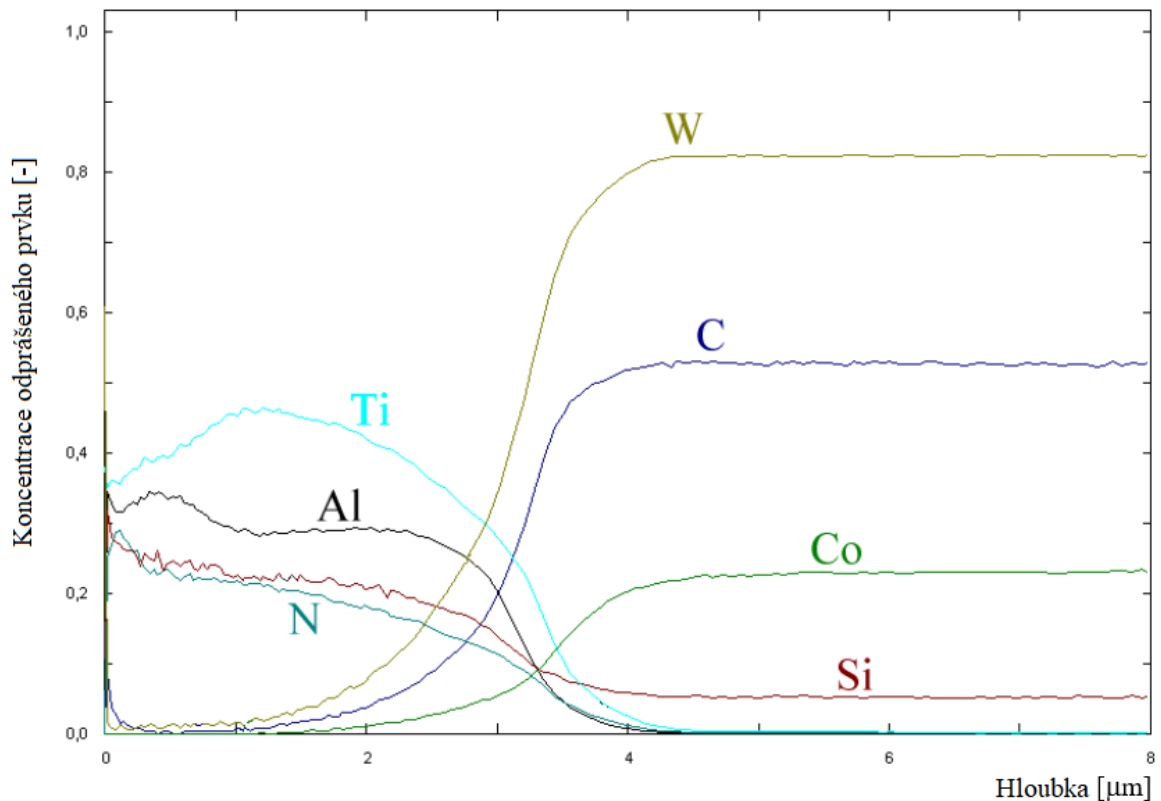
Hodnocení	Chemická stabilita	Odolnost proti oxidaci	Tvrдость	Tvrдость za tepla
Nejlepší	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiC	Al ₂ O ₃
↑	TiAlN	TiAlN	TiAlN	TiAlN
	TiN	TiN	TiCN	TiN
	TiCN	TiCN	Al ₂ O ₃	TiCN
Špatná	TiC	TiC	TiN	TiC

Protože existuje velké množství sledovaných parametrů povlaku a měřicí metody jsou různě náročné a dostupné, tak je úplná charakteristika povlaku prakticky nemožná. Proto se vybírají takové fyzikálně-chemické vlastnosti, které jsou nejdůležitější a podle kterých se dají nepřímou určit i jiné vlastnosti povlaku. Důležité je také dostupnost měřících metod, jejich přesnost a opakovatelnost získaných hodnot. [10] V následujících kapitolách budou popsány nejčastěji vyhodnocované vlastnosti tenkých vrstev.

3.4.1 Optická emisní spektroskopie GD-OES

Analýza GD-OES (Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy) je významná charakteristika systému tenká vrstva – substrát, která stanovuje průběh koncentračního složení jednotlivých prvků v závislosti na hloubce od povrchu. Během postupného odprašování vzorku vstupují do výboje atomy z jednotlivých hloubkových vrstev, tím je možné pozorovat závislost koncentrace prvků na zkoumané hloubce. Výstupem měření je koncentrační profil v závislosti na hloubce odprašení. Excitací atomů se získá záření

o vlnové délce typické pro daný prvek, které je po výstupu z lampy analyzováno optickým spektrometrem. [10, 17, 18]

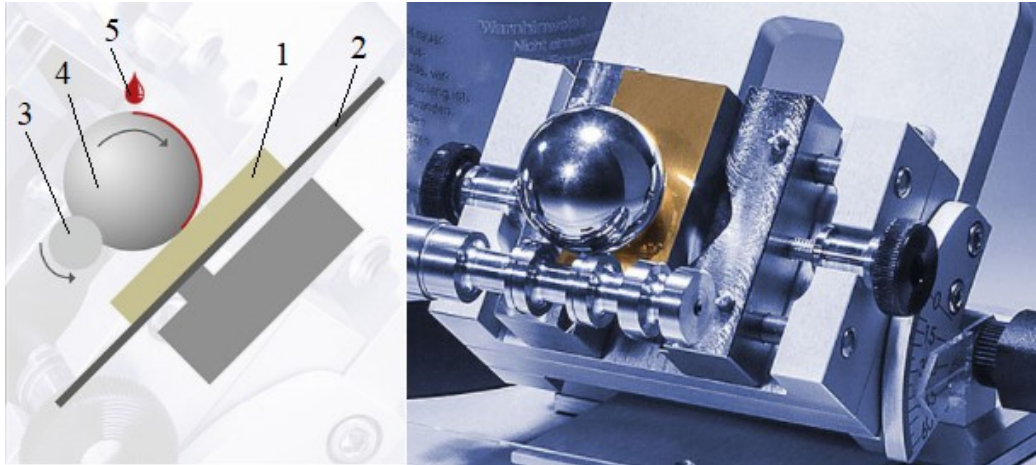


Obr. 26 Hloubkový koncentrační profil vrstvy TiAlSiN na substrátu z SK [dle 17]

3.4.2 Měření tloušťky

Z praktického hlediska je tloušťka povlaku na břitech řezných nástrojů jednou z nejpodstatnějších charakteristik. Ovlivňuje jak trvanlivost nástroje, tak i řezné síly během obráběcího procesu. Tloušťka na nástroji je výrazně odlišná na rovinných a válcových plochách. Pro měření tloušťky povlaků na rovinných plochách se používá destruktivní metoda označovaná jako tzv. kalotest a na břitech nástroje je využívána klasická metalografie, která je založená na pozorování výbrusu mikroskopem. [27]

Princip kalotestu spočívá ve vybroušení kulového vrchlíku (kaloty) pomocí rotující ocelové kuličky, na kterou se nanáší brusná diamantová pasta. Vybroušená kalota se v průmětu jeví jako mezikruží reprezentující zkoumaný povlak. Tloušťky povlaků se pohybují v řádech μm , proto je oblast použití kalotestu poměrně široká 1 – 100 μm . K přesnému odečtení délkových rozměrů se používá kamera připojená k mikroskopu. Mimo jiné se touto metodou dají rozlišit jednotlivé vrstvy multivrstvého povlaku, případně se dá stanovit jejich počet a typ. [10, 18]



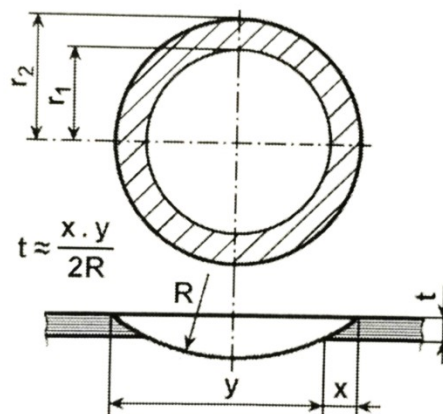
Obr. 27 Schéma zařízení: 1-vzorek, 2-podložka, 3-unašeč, 4-brousící kulička, 5-diamantová pasta [dle 27]; Zařízení CAT²c firmy Anton Paar [28]

Tloušťku povlaku lze z odečtených délkových rozměrů vybroušeného kulového vrchlíku (Obr.28) získat následujícím matematickým vztahem: [10]

$$t = (R^2 - r_1^2)^{1/2} - (R^2 - r_2^2)^{1/2} \quad [\mu\text{m}] \quad (7)$$

kde:

- R – poloměr kuličky [μm]
- r_1 – poloměr vnitřní kružnice, ohraničující povlak ze strany substrátu [μm]
- r_2 – vnější poloměr kulového vrchlíku [μm]



Obr. 28 Princip výpočtu tloušťky [10]

3.4.3 Mikrotvrdotost tenkých vrstev

Tvrdotost není možné jednoznačně definovat jako fyzikální veličinu, protože její hodnota je závislá na komplexních vlastnostech povrchu testovaného materiálu a zkušebních podmínkách. Při zkoušení se povrch materiálu mechanicky zatěžuje tlakem cizího tělesa, jehož působení kvantitativně vyjadřuje hodnotu tvrdosti. Tvrdotost je tedy mechanická

vlastnost materiálu, vyjádřená odporem proti deformaci povrchu vyvolané působením geometricky definovaného tělesa (indentoru), které je vtlačováno do materiálu určenou silou. [10]

Mikrotvrdotost tenkých vrstev se nejčastěji měří Vickersovou metodou s malým zatížením, aby indentoru pronikl maximálně do 1/10 tloušťky povlaku. Zatížení indentoru se v tomto případě pohybuje maximálně do 2 N. Tím je zabezpečeno měření samotné vrstvy a hodnota tvrdosti není ovlivněna substrátem. Pro měření se používají mikrotvrdoměry zaznamenávající hloubku pronikání indentoru během zatěžování i odlehčování. [18, 27]

3.4.4 Hodnocení adhezní vlastnosti

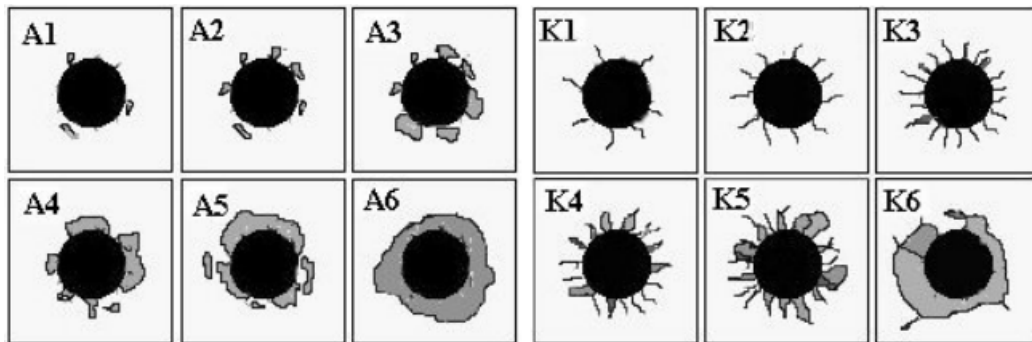
Určení adheze tenké vrstvy je nejdůležitějším faktorem ve vývoji, vyhodnocování, výrobě a použití progresivních povlakových vrstev. Ovšem adheze vrstvy k podkladu je jedna z nejsložitějších fyzikálních vlastností k hodnocení, protože důsledkem zatížení není pouze základní vlastnost, ale odezva chování celého systému na podmínky testu.

Pro vyhodnocení adheze je zásadní energie nutná k přerušení vazeb na rozhraní vrstva – substrát. Hodnotící metody adheze vrstvy jsou tedy založeny na principu vytvoření definovaného napětí na rozhraní a stanovení jeho kritické hodnoty, kdy dojde k porušení rozhraní a odtržení části vrstvy. [18]

Mezi standartní metody vyhodnocování přilnavosti povlaků patří tzv. Mercedes test (vnikací zkouška) a Scratch test (vrypová zkouška).

- **Indentační (vnikací) zkouška – Mercedes test**

Tato metoda je velmi rozšířeným způsobem hodnocení kvality spojení mezi tenkou vrstvou a substrátem. Jde o nenáročnou metodu, při které se pnutí na rozhraní systému tenká vrstva – substrát vytváří pomocí vtisku, při statickém vtlačování indentoru. Vyvolané napětí způsobí na rozhraní vznik trhlinek šířící se k povrchu. Vyhodnocení zkoušky je provedeno přiřazením vtisku do jednotlivých kategorií (tříd) s adhezním (A) a kohezním (K) číslem, která charakterizují stupeň poškození vrstvy – praskání a odlupování (*Obr. 29*). [18]



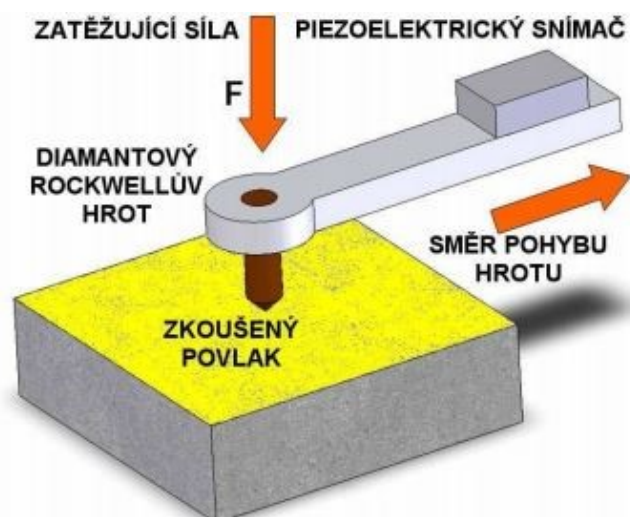
Obr. 29 Kvalifikace morfologie vtisku [18]

- **Vrypová zkouška – Scratch test**

Je základní a nejrozšířenější zkouškou při sledování adheze systému tenká vrstva – substrát. Tato metod se uplatňuje jako efektivní kvalitativní kontrola v mnoha průmyslových oblastech. Dříve našla své uplatnění při zjišťování tvrdosti na principu Mohsovy stupnice tvrdosti minerálů.

Vrypová zkouška je založena na postupném vnikání pohybujícího se indentoru do povrchu vzorku. Indentor je zatěžován konstantní nebo plynule zvětšující se silou (20 – 120 N), tím v povrchu vytváří vryp. Na rozhraní se generuje pnutí, které při dosažení kritické hodnoty způsobí odtržení vrstvy od substrátu. Při měření je možné detekovat akustickou emisi, ta se skokově zvýší při poškození vrstvy. Vyhodnocení je možné také provádět mikroskopem, kdy se odečte místo odtržení vrstvy.

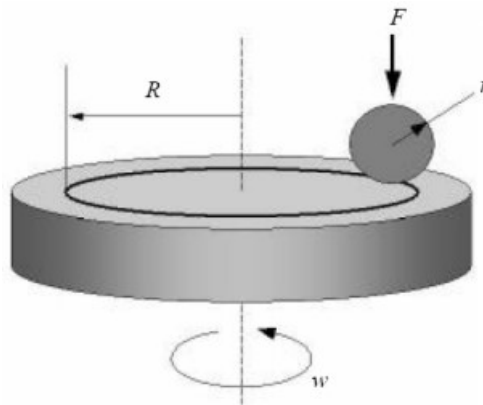
Hodnota adheze větší než 60 N je dostačující pro běžné aplikace a zajišťuje nepoškození vrstvy. Adheze povlaku mimo jiné závisí i na celkové tloušťce povlaku a materiálu substrátu. [18, 27]



Obr. 30 Princip vrypové zkoušky [29]

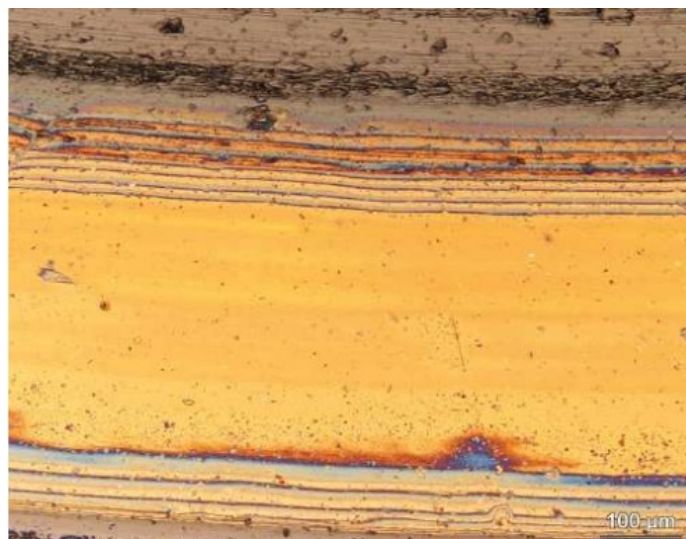
3.4.5 Tribologická zkouška

Během řezného procesu dochází se stoupající teplotou ke zhoršení fyzikálně mechanických vlastností substrátu. Vlivem vytváření povlaků se snižují frikční síly, což razantně omezuje tepelné zatížení nástroje. Pro zjištění kluzných vlastností se používá metoda „PIN-on-DISK“. Třecí zkouška probíhá tak, že se testovaná vrstva nanese na vyleštěný zkušební vzorek a ten se následně umístí na otočný stůl tribometru. Zkušební tělíčko (pin) je předem definovanou silou vtlačován do otáčejícího se vzorku. Toto se odehrává na stanoveném poloměru, který by neměl být příliš malý, aby měření nebylo ovlivněno teplem, které se nestačí uvolnit do atmosféry. Přímým výsledkem měření je průběh koeficientu tření v závislosti na počtu cyklů. Dalšími sledovanými hodnotami jsou charakter opotřebení zkušebního tělíška, ořez vrstvy, profil vzniklé tribologické stopy na vzorku. [18, 27]



Obr. 31 Princip tribometrického měření „Ball (PIN)-on-DISK“ [18]

Na Obr. 32 je zobrazen zkušební povlak po průběhu třecí zkoušky.



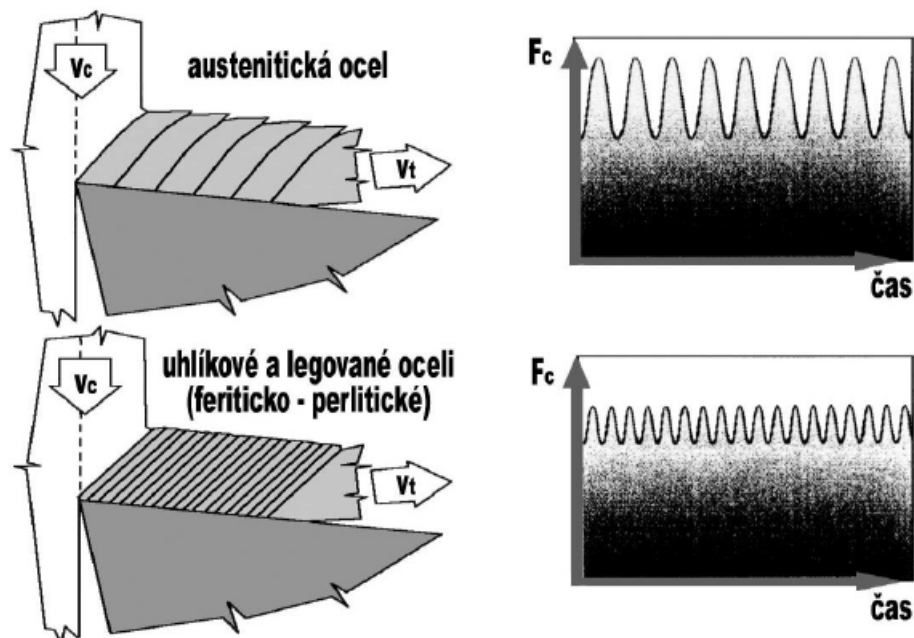
Obr. 32 Tribologická stopa ve vícevrstvěm povlaku [17]

4 MECHANICKÉ ZATÍŽENÍ NÁSTROJE

Odolnost slinutých karbidů vůči namáhání břitu řezných destiček mechanickými rázy má velký význam. Obecně jsou slinuté karbidy méně houževnaté než rychlořezné oceli. To je dáno podstatně větším podílem řezného karbidu v poměru k obsahu pojiva. Odolnost nástroje proti mechanickým rázům je stejně důležitým parametrem jakosti, jako je otěruvzdornost. [30]

K vydrolení nebo porušení břitu nástroje dochází následkem cyklického zatěžování, které vzniká jak u klasického nepřerušovaného řezu, tak i při přerušovaném řezu (frézování, soustružení ploch s drážkou nebo otvorem). Právě i během plynulého nepřerušovaného řezu dochází ke kolísání hlavní složky řezné síly a tím k cyklickému namáhání břitu. Frekvence je udávána charakterem vzniklé třísky, respektive velikostí elementu třísky.

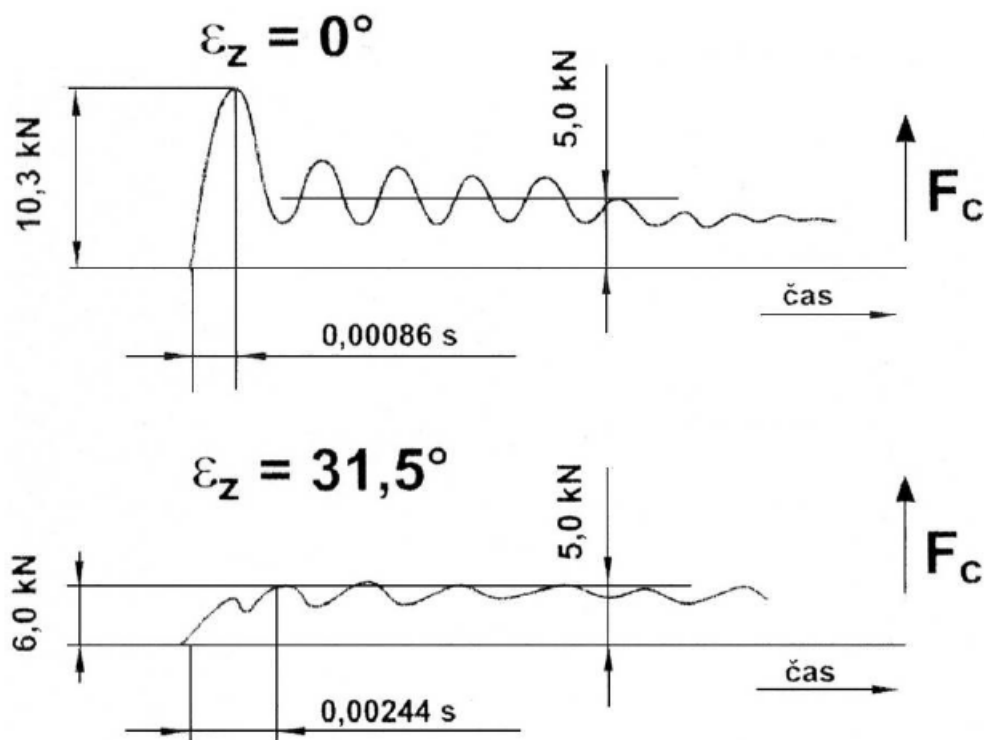
Při obrábění těžkoobrobitelných materiálů (např. austenitických ocelí) dochází při vyšších řezných rychlostech k plastické deformaci ve smykové rovině a vznikají oddělené elementy plynulé třísky. V tomto důsledku řezná síla kolísá daleko více než u jiných ocelí. Větší amplituda řezné síly zvyšuje nebezpečí vzniku únavového lomu, ale i intenzitu a charakter opotřebení otěrem, nebo se projeví jako mikroskopické vydrolení břitu. [30, 31]



Obr. 33 Amplitudy složky řezné síly [dle 31]

Vnikáním nástroje do obrobku dochází ke krátkodobému nárůstu řezné síly. Nárůst může v některých případech dosahovat až dvojnásobné střední hodnotě po vniknutí břitu do obrobku. Velikost nárůstu je závislá na časovém úseku od prvního kontaktu nástroje

s obrobkem až po úplné „zařezání“ břitu na plný průřez třísky. Doba vnikání závisí na vzájemné poloze čela nástroje a povrchu obrobku. Pokud břit vnikne najednou do celého průřezu třísky, potom je teoretická doba vniknutí nulová a nárůst řezné síly způsobený rázem je maximální. Při postupném vnikání břitu na plný průřez třísky je nárůst řezné síly pozvolnější. U výměnných břitových destiček je důležité místo na čele, kde dochází k nebezpečnému kontaktu na špičce nebo na ostří a může dojít k případu křehkého porušení břitu.



Obr. 34 Hlavní složka řezné síly v závislosti na čase a úhlu záběru [dle 31]

V horní části Obr. 34 je znázorněn případ, kdy došlo ke vniknutí břitu pod úhlem záběru $\varepsilon_z = 0^\circ$ naráz v celém průřezu třísky. Ve chvíli vniknutí dosáhla složka F_c více než dvojnásobku normální hodnoty. Spodní část obrázku znázorňuje postupné vnikání, kdy dochází k nárůstu síly podstatně méně. Mechanický ráz byl výrazně vyšší u prvního případu oproti tomu druhému. [30, 31]

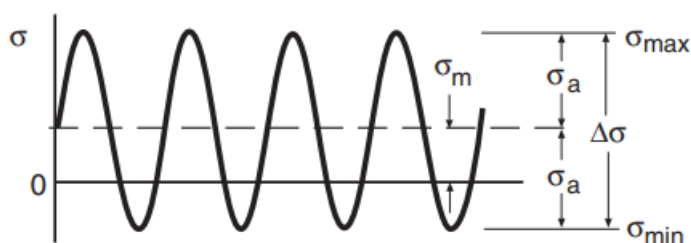
4.1 Únava materiálu

Mnoho strojních komponentů je často vystaveno opakovanému cyklickému zatížení, které může vést k mikroskopickému poškození použitého materiálu. I přestože je napětí menší než mez kluzu daného materiálu, mikroskopické poškození se akumuluje s pokračujícím cyklováním, dokud nedojde k rozvoji trhliny, která způsobí lom součásti. Tento proces

porušení v důsledku cyklického zatěžování se nazývá únava. Únava materiálu je nejčastější příčinou selhání kovových strojních součástí. Je odhadováno, že zapříčiňuje až 90 % lomů. K těmto lomům dochází náhle a mají často fatální následky. [32, 33]

Únava materiálu je děj vzniku a šíření trhlin při časově proměnlivém zatěžování. Proto je pro popis hlavním parametrem čas, případně počet zátěžových cyklů.

Průkopníkem v systematických zkouškách v souvislosti s lomy železničních náprav byl německý železniční inženýr August Wöhler, který svůj výzkum prováděl od roku 1852. Přišel na souvislost mezi porušením a počtem otáček nápravy, tj. počet zátěžových cyklů cyklického namáhání. Na základě svých experimentů odvodil závislost amplitudy napětí σ_a na počtu cyklů do porušení N_f . Tento diagram se jmenuje Wöhlerova křivka nebo také S-N diagram. Tato křivka je doposud základní charakteristikou únavy materiálu. [32, 34]



Obr. 35 Zátěžový cykl a související terminologie [32]

Základním prvkem zatěžování je konstantní zátěžový cykl (Obr. 35), jehož hlavními charakteristikami jsou: [32, 34]

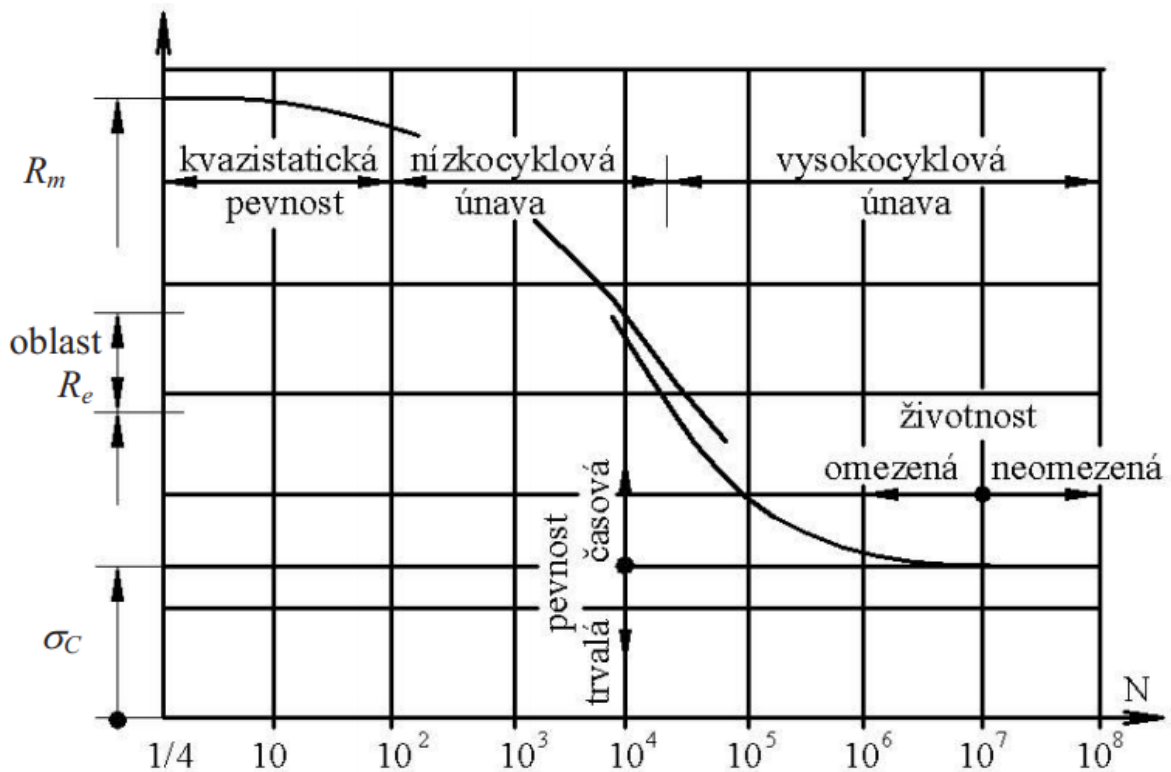
- maximum σ_{max}
- minimum σ_{min}
- výkmit $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$
- amplituda $\sigma_a = \Delta\sigma/2$
- střední hodnota $\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$

Cyklické napětí je periodickou funkcí času. Může být tahové, tlakové, ohybové nebo krutové. U rotujících součástí je jeho průběh vyjádřen sinusoidní funkcí. Protože existuje vztah mezi statickou a únavovou pevností, může být mez pevnosti v tahu R_m použita jako výchozí hodnota při stanovení meze únavy σ_c . Např. u ocelí namáhaných cyklickým tahovým zatížením je mez únavy $\sigma_c = 0,45 \cdot R_m$. [33]

Podle počtu cyklů do porušení a míry plastické deformace lze rozlišit dvě základní oblasti:

- nízkocyklová únava ($10^2 \leq N_f \leq 10^5$) – cyklická plastická deformace probíhá v makroobjemu, případně v celém průřezu tělesa,
- vysokocyklová únava ($N_f > 10^5$) – těleso je ve stavu makroskopicky elastickém (výpočetně pod mezí kluzu) a únavový lom vzniká lokální plastickou deformací v mikroskopickém (strukturním) měřítku.

Životnost pod 10^2 cyklů nespadá do oblasti únavy, ale jedná se o extrémní namáhání mimo oblast technické použitelnosti materiálu. [34]



Obr. 36 Únavová křivka napětí – oblasti únavové pevnosti a životnosti [35]

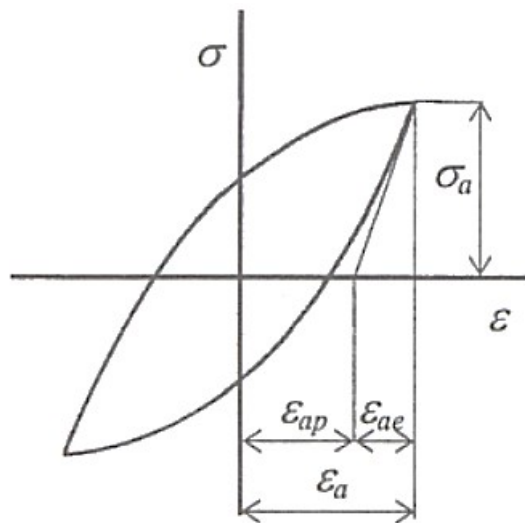
4.1.1 Nízkocyklová únava

Nevratné změny v mikrostruktuře materiálu jsou vyvolané cyklickou plasticitou kovů a jejich slitin, následkem toho jsou změny objemových vlastností (elektrický odpor, logaritmický dekrement útlumu, aj.). Nejintenzivnější jsou tyto změny na začátku a po určitém počtu cyklů se zastaví (nasytí – saturační proces). Obecně je nejvhodnější charakteristika tahový diagram, kde je závislost napětí na deformaci. Ve spojení s únavou se jedná o periodické opakování zatěžovacího cyklu, při kterém sledujeme amplitudu napětí σ_a a celkovou deformaci ε_a , dále také elastickou deformaci ε_{ae} a plastickou deformaci ε_{ap} .

Z hlediska povahy provozního zatěžování a možnosti zkoušení uvažujeme rozlišujeme tři typy zatěžování, které jsou definované řídicí veličinou o konstantní amplitudě:

- $\sigma_a = \text{konst.}$ (měkký cykl – materiál si řídí deformaci),
- $\varepsilon_a = \text{konst.}$ (tvrdý cykl – materiál si řídí napětí),
- $\varepsilon_{ap} = \text{konst.}$ (speciální laboratorní zkoušky).

Na *Obr. 37* je průběh sledovaných veličin během jednoho cyklu, které tvoří hysterezní smyčku.



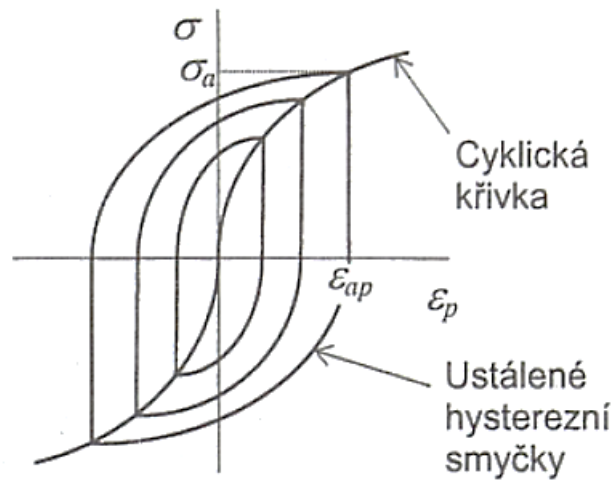
Obr. 37 Schéma hysterezní smyčky napětí – deformace [34]

Během cyklování se změny vlastností materiálu promítají do hysterezní smyčky. Existují dva typy materiálů:

- **materiál zpevňuje** – odpor materiálu proti plastické deformaci roste. To je typické hlavně pro vyžíhané materiály s rovnovážnou strukturou. Cyklická plastická deformace hromadí dislokace až k jejich zablokování.
- **materiál změkčuje** – odpor materiálu proti plastické deformaci klesá. Typické pro materiály s nerovnovážnou strukturou, zejména zpevněné. Vliv zpevnění se cyklickou plastickou deformací odbourává.

Poté, co hysterezní smyčka dosáhne nasyceného stavu se už nemění (další změny jejího tvaru nastávají až s růstem trhliny). Tak dojde k ustálení uzavřené hysterezní smyčky bez ohledu na způsob zatížení. Systém těchto smyček s proměnnými $\sigma - \varepsilon_p$ je vyznačen na *Obr. 39*. Každá ustálená smyčka je charakterizována konkrétní dvojicí amplitud $\sigma_a - \varepsilon_{ap}$.

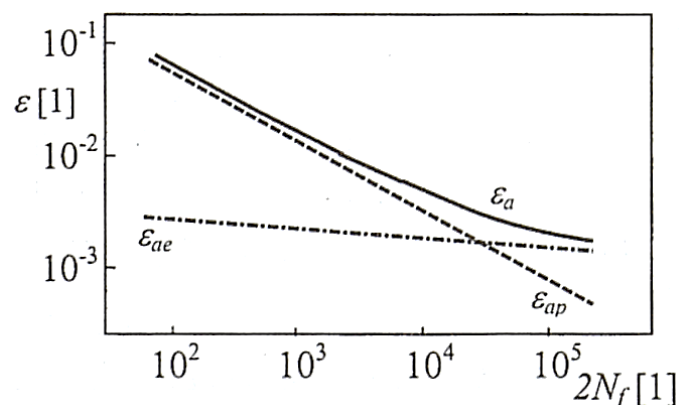
Vrcholy ustálených hysterezních smyček definují cyklickou křivku napětí – deformace, také nazývanou jako cyklická deformační křivka. [34]



Obr. 38 Cyklická deformační křivka [34]

Celková doba do lomu N_f součet časů vzniku a růstu trhliny. Iniciací trhliny dojde ke ztrátě tuhosti tělesa a k poklesu napětí. V nízkocyklové únavě vznikají první mikrotrhliny velmi rychle a převážná část života zkušebního vzorku spadá do etapy šíření krátké trhliny. Doba ustálení cyklických vlastností je vzhledem k celkové životnosti krátká. To nám dovoluje použít cyklickou deformační křivku, jako by celý život vzorku byl vyplněn akumulací energie za ustálených cyklických deformačních vlastností. Pro životnost je určující cyklická plastická deformace. Závislost N_f na ϵ_{ap} je lineární v logaritmických souřadnicích (historicky je zavedeno vyjadřovat závislost v počtu půlcyklů $2N_f$). [34]

Wöhlerova křivka není ideální charakteristikou v nízkocyklové oblasti únavy, protože zde dochází k velkým plastickým deformacím a křivka má v této oblasti malý sklon. Proto se využívá Manson-Coffinova křivka, která vyjadřuje závislost celkového poměrného přetvoření na počtu cyklů do lomu. [33]



Obr. 39 Průběh křivek životnosti [34]

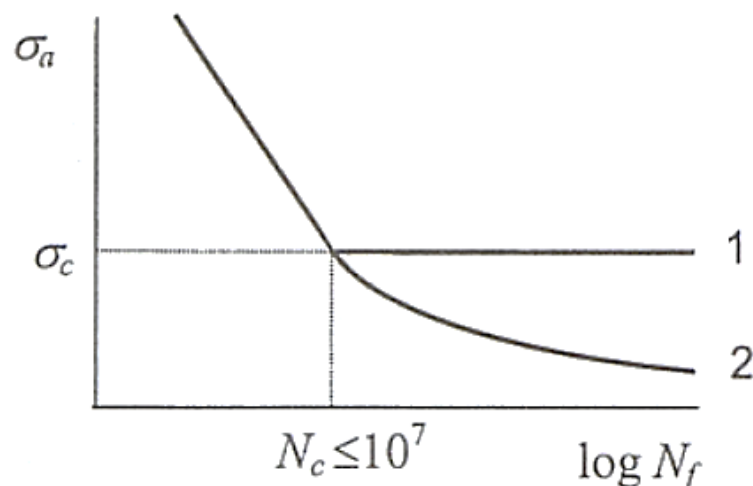
4.1.2 Vysokocyklová únava

Vzhledem k dlouhým testovacím časům, které jsou nutné k dosažení životnosti delší než 10^7 cyklů, je většina dostupných dat o únavě omezena právě na tento rozsah. Nicméně nedávná data z testů, které jsou rozšířena na 10^9 zátěžových cyklů, ukázala překvapivé chování v poklesu únavové křivky za rovnou oblastí v rozsahu cyklů 10^6 až 10^7 . Podrobnější zkoumání ukazuje, že existují dva protichůdné mechanismy únavového poškození. Poškození způsobené povrchovými defekty a poškození zapříčiněné vnitřními nekovovými vměstky. První převládá ve vlastnostech až do okolo 10^7 cyklů a vykazuje zjevnou mez únavy. Druhé zmíněné poškození způsobuje poruchy při nižších namáháních za velmi dlouhé životnosti. [32]

Obecně platí, že při vysokocyklové únavě je vznik poškození podmíněn plastickou deformací. Jedná se o procesy v mikroobjemech a během jednotlivého cyklu v nepatrném rozsahu. To je důvod, proč poškození vznikají až po řádově větším počtu cyklů.

Wöhlerova křivka nebo také S-N křivka se při symetrickém cyklování obvykle udává v proměnných $\log N_f - \sigma_a$. Na svislou osu se zobrazuje amplituda napětí a na vodorovnou životnost (počet zátěžových cyklů do porušení vzorku). Existují dva základní průběhy Wöhlerovy křivky:

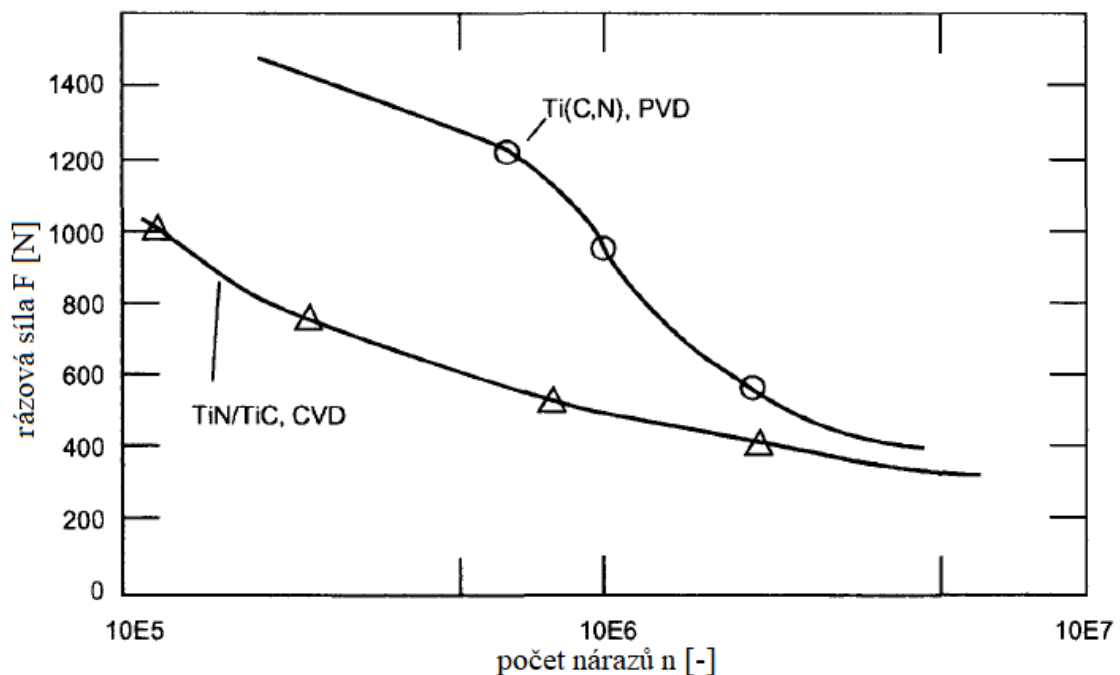
- **s výraznou mezí únavy σ_c** – trhliny buď nevzniknou nebo se zastaví se stádiu krystalografického růstu. Tímto průběhem se vyznačují hlavně oceli.
- **bez meze únavy** – smluvní mez únavy se stanovuje pro životnost $N_f = 10^7$ především u materiálů jako jsou slitiny hliníku, mědi atd. [34]



Obr. 40 Wöhlerova křivka: 1-s mezí únavy (oceli), 2- bez meze únavy (slitiny neželezných kovů) [34]

4.2 Dynamické rázové zatížení povlaků

V roce 1994 přišel pan Knotek se svými pracovníky na novou metodu zkoušení povlaků rázovým zatížením. Testovali PVD i CVD povlaky na slinutých karbidech. Popis rozložení napětí v povlakované směsi a substrátu je důležitou informací pro pochopení výsledků zkoušky. PVD a CVD povlaky vykazují zcela odlišné chování při rázovém zatížení. Zatímco PVD povlaky jsou náhle poškozeny v důsledku odloupení povlaku, CVD povlaky vykazují neustále zvyšující se míru opotřebení způsobenou kontaktem mezi koulí ze slinutého karbidu a povrchem vzorku. Odolnost proti únavě lze určit rázovou zkouškou povlaku. Dalšími faktory jsou přilnavost, otěr a tepelné účinky. Stejně jako křivka únavové pevnosti materiálu, jsou i výsledky rázových zkoušek povlaků prezentovány formou křivky ukazující zatížení povlakového systému. [36]

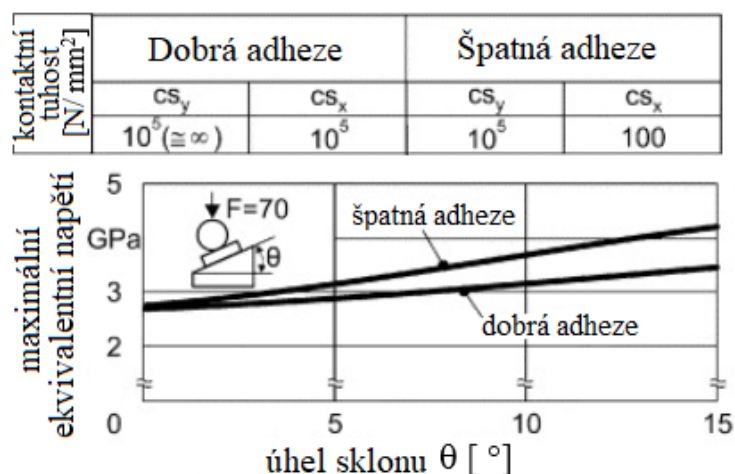


Obr. 41 Výsledky rázové zkoušky u PVD a CVD povlaků v systému Ti-C-N [dle 36]

Obr. 41 ukazuje porovnání povlaků vytvořených pomocí PVD a CVD technologie. Při vysokém zatížení a menším počtu nárazů vykazuje CVD povlak lepší odolnost. Naopak PVD povlak má vyšší únavovou odolnost při vysokém počtu nárazů. Možným důvodem je různé vnitřní napětí v povlacích. CVD depozice probíhá za vysokých teplot a rozdílném teplotním roztažení povlaku a podkladu, proto vzniká tahové napětí. U PVD je iontovým bombardováním způsobeno předpětí substrátu a při nízkých teplotách, s malou rychlostí difúze, vznikne tlakové napětí. [36]

Rázová zkouška byla vylepšena a rozšířena o zatížení povlaku pod daným úhlem panem Bouzakisem a jeho výzkumnou skupinou. Rázový test s nakloněným vzorkem, podporovaný simulací metodou konečných prvků (FEM), účinně popisuje únavový výkon povlaků. Stejně jako výše zmíněná zkouška, probíhá i tento test pomocí koule ze slinutého karbidu, jakožto indentačního tlačidla. Stupně poškození povlaku byly klasifikovány pomocí rastrovací elektronové mikroskopie a energetické rentgenové spektroskopie.

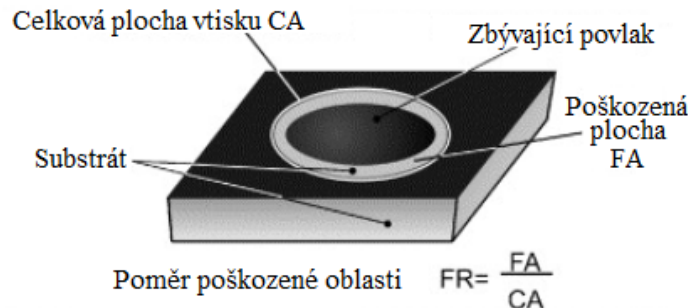
Výsledky FEM simulace vytvořeného modelu s případem dobré a špatné adheze povlaku, jsou zobrazeny na Obr. 42. Jak je možné pozorovat, dochází k prudkému nárůstu maximálního napětí při zkoušce šikmým rázem se špatně přilnavým povlakem, tj. s nízkými hodnotami kontaktní tuhosti v tečném směru, v porovnání s případem dobře přilnavého povlaku. Tato tendence je více intenzivní s úhlem sklonu 10° a 15° , než v případě kolmého směru nárazu, kde je maximální napětí téměř stejné v případě dobré a špatné adheze. [37]



Obr. 42 Výsledky FEM simulace pro šikmou rázovou zkoušku s cylindrickým indentorem [dle 37]

Během rázové zkoušky periodicky proniká do povlaku tvrdokovový indentor při požadovaném maximálním zatížení. V důsledku plastické deformace, která je vyvíjena během fáze zatěžování, se kontaktní plocha úplně nezotaví do svého počátečního rovinného tvaru, čímž se vytvoří trvalý konkávní otisk. Rozsah poškození v otisku je popsán prostřednictvím poměru poškozené oblasti FR, který je definován jako oblast, kde je substrát odhalen, vůči celkové kontaktní ploše (Obr. 43). Tento poměr je vyhodnocován pomocí rozvinutého algoritmu WEPROC (WEar PROpagation Code). Princip fungování softwaru je založen na skutečnosti, že barvy mikrografů z rastrovací elektronové

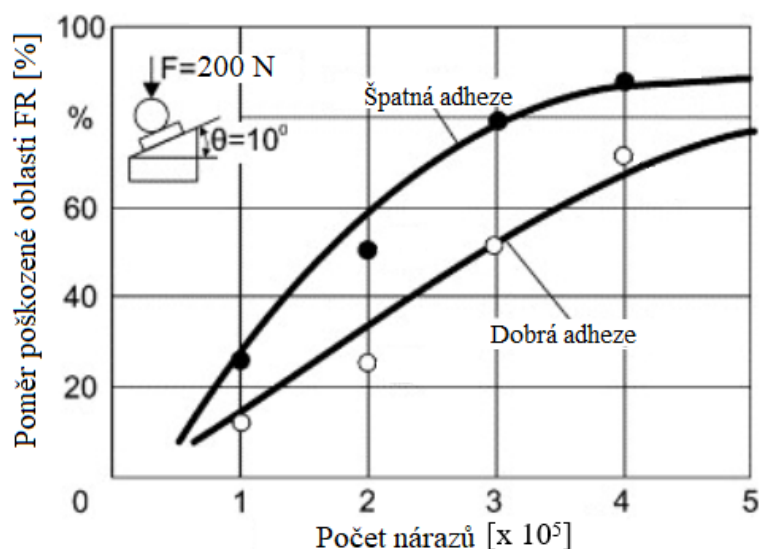
mikroskopie jsou závislé na materiálu jednotlivých vrstev uložených na substrátu. Analýza hustoty barev uvnitř oblasti vtisku byla použita pro stanovení procenta odhalené vrstvy a tím pádem i pro výpočet poměru poškozené oblasti FR. [37]



Obr. 43 Definice poškozené oblasti povlaku [dle 37]

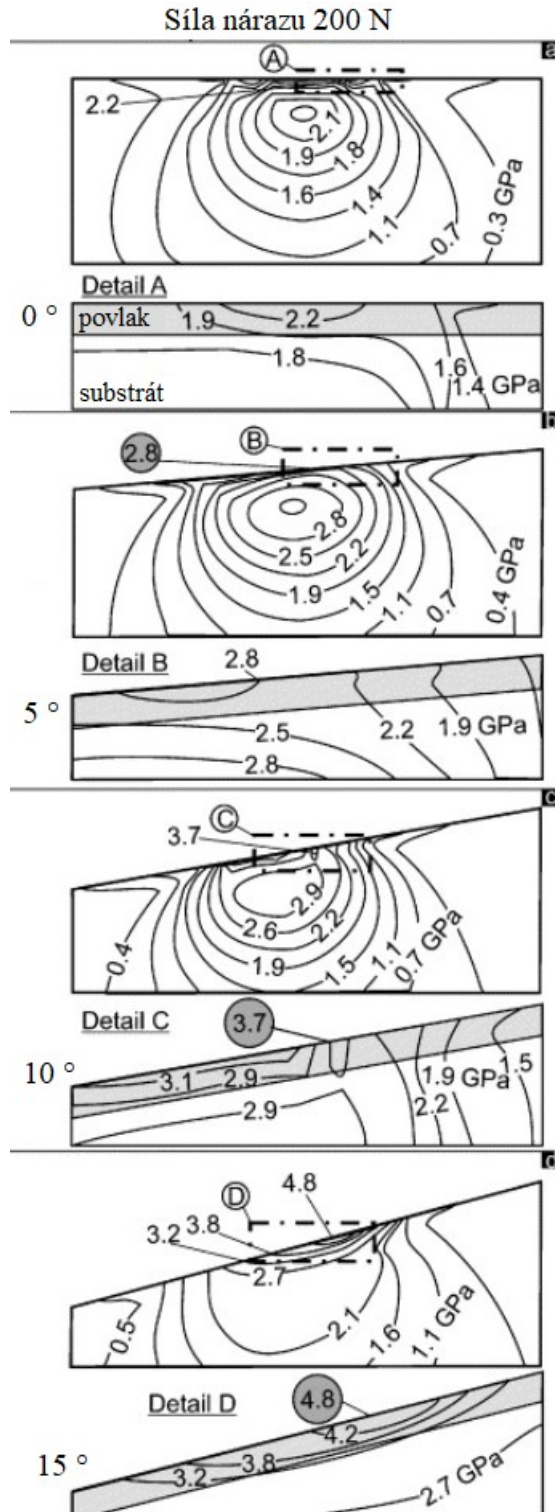
Pomocí rozvinutého 3D FEM modelu, simulujícího zkoušku šikmým rázem, bylo pro různé případy sklonu úhlu vypočítané napěťové pole vyskytující se mezi kuličkovým indentorem a deponovaným vzorkem. Pro pořadí sklonu úhlu od 0° do 15° jsou odpovídající výsledky demonstrovány na Obr. 45 shora dolů. Maximální vyskytující se von Misesovo ekvivalentní napětí při konstantním rázovém zatížení má rostoucí tendenci v závislosti se sklonem úhlu a následně povede k dřívější iniciaci únavového lomu a intenzivnějšímu odstraňování tenké vrstvy. Šíření poškození povlaku po jeho vzniku v důsledku únavy, lze přičíst lokálnímu přetížení v důsledku nadměrného relativního pohybu indentoru vnikajícího do povrchu povlaku. Podle simulace je očekáváno silnější odstraňování filmu ve spodní oblasti kontaktního kruhu.

Jak již bylo výše zmíněno, při zvětšujícím se úhlem sklonu povrchu testovaného povlaku se zvyšují i rázová zatížení, která ovlivňují vznik poškození a odstranění povlaku. [37]



Obr. 44 Šíření odstranění povlaku během rázové zkoušky [dle 37]

Obr. 44 ukazuje šíření odstraňování povlaku během rázové zkoušky pod úhlem sklonu 10° při relativně malém rázovém zatížení 200 N, pro případ špatné a dobré adheze povlaku. [37]



Obr. 45 Napěťová pole odvozená v 3D FEM modelu pro rázovou zkoušku [dle 37]

Obecně lze tedy říct, že během rázové zkoušky na šikmém povrchu se povlaky setkávají s kohezní poruchou soudržnosti při nižším rázovém zatížení než při zkoušce s kolmým nárazem v důsledku vyskytujícího se intenzivnějšího napěťového pole. Z toho vyplývá, že šíření poškození povlaku je rychlejší v případě špatné přilnavosti povlaku při testování pod vysokými úhly sklonu. Tímto se šikmá rázová zkouška stává účinnou metodou pro hodnocení koheze a adheze tenkých povlakových vrstev. [37]

Studie od pana Ledrappiera zkoumá životnost některých PVD povlaků za podmínek opakovaného rázu. V závislosti na povaze PVD povlaku se mohou po nárazu objevit praskliny, puchýře nebo odlupování.

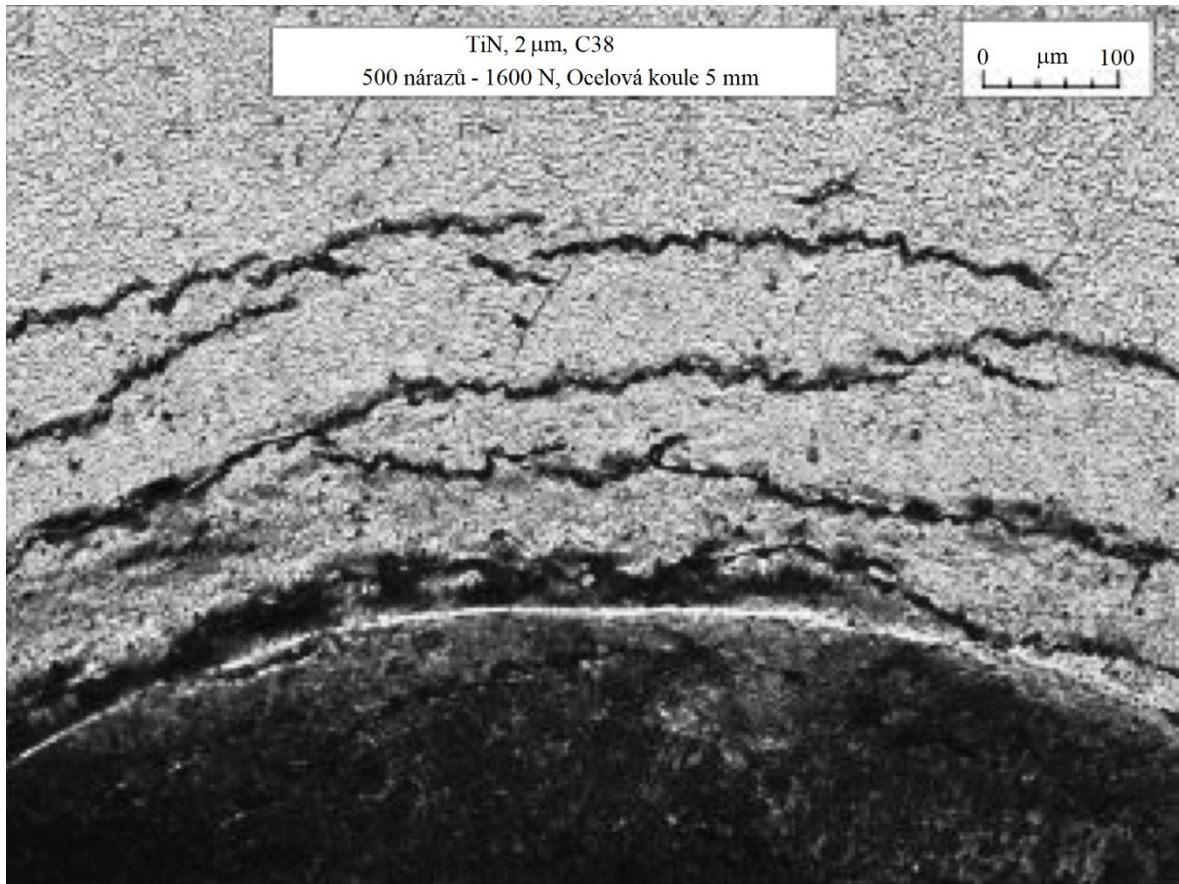
Byly použity dva typy indentorů v závislosti na požadovaných mechanických podmínkách nárazu. Pro nejnáročnější podmínky byly použity WC-Co hroty s poloměrem 100 – 300 μm , zatímco pro čistě elastické nárazy byly použity ocelové kuličky s průměrem 5 až 20 mm. Opakování zátěžových cyklů se dosahuje při frekvenci 30 Hz, přičemž odchylka polohy nárazu je menší než několik mikronů.

Aby se zdůraznil vliv meze kluzu substrátu na chování povlaku, byly použity dva různé podkladové materiály. Pro získání tvárných substrátů byla použita ocel C38 o tvrdosti přibližně 15 HRC a tvrdé substráty byly vyrobeny z HSS oceli (X85WMoCrV6-5-4-2) o tvrdosti 62 HRC. Všechny plochy byly zrcadlově leštěny, aby se dosáhlo drsnosti $R_a \leq 0,02 \mu\text{m}$. Hlavní charakteristiky testovaných vzorků jsou shrnuty v *Tab. 5*. [38]

Tab. 5 Charakteristiky testovaných povlaků [dle 38]

Povlak	Substrát	Tloušťka [mm]	Tvrdost HV	Ekvivalentní Youngův modul [GPa]
P1: a-C	HSS	2	3015 \pm 540	210 \pm 20
P2: a-c + CrN	HSS	1,3 + 2,3	2111 \pm 240	188 \pm 9
P3: TiN	C38	2	2800 \pm 300	380 \pm 20
P4: Cr _x N _y	HSS	2,5	2500 \pm 250	260 \pm 20
P5: TiBN	HSS	2	3100 \pm 250	330 \pm 20

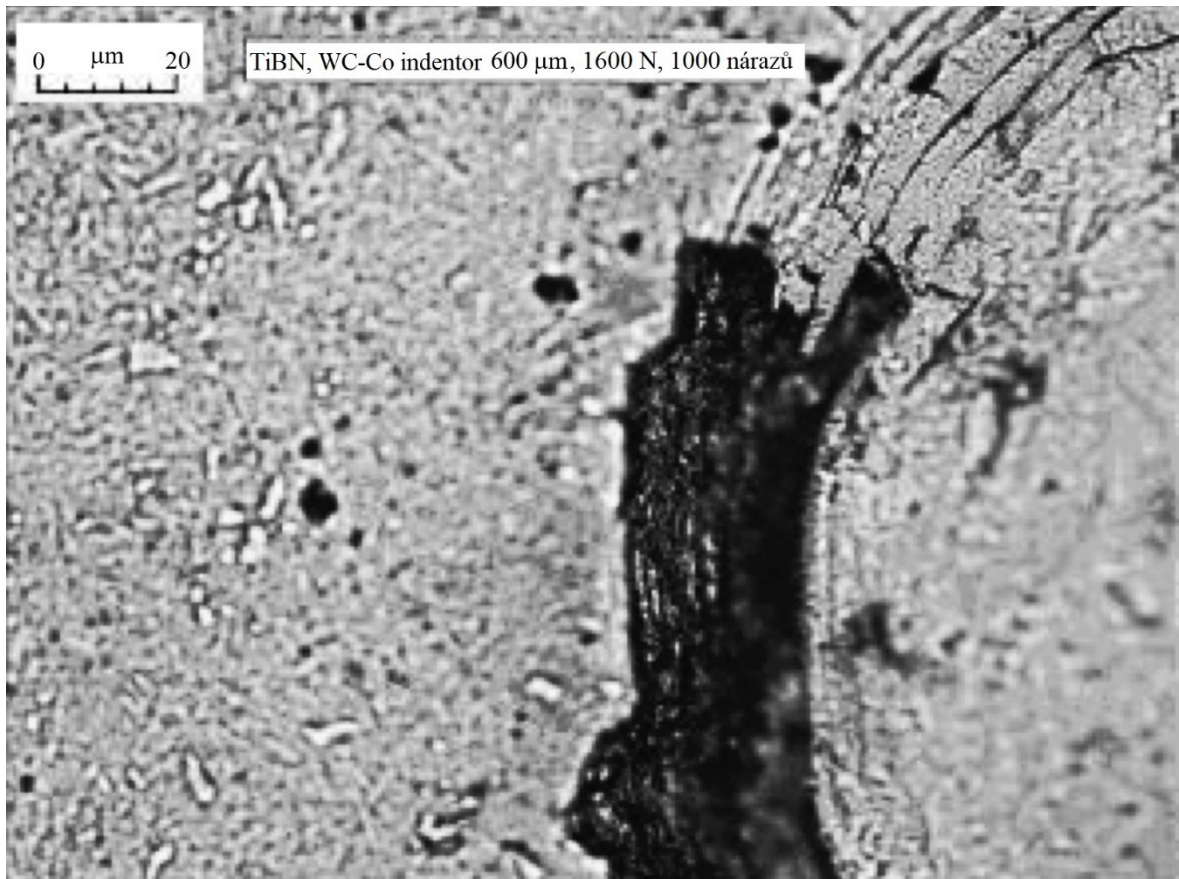
Dynamické rázy prováděné na všech tenkých tvrdých povlacích nanesených na tvárném substrátu C38 vedly k rozsáhlému tvoření trhlin. Tangenciální trhliny nacházející se v obvodové oblasti rázového dopadu jsou zobrazeny na *Obr. 46*, kde je možné vidět detailní pohled okraje indentačního kráteru získaného na povlaku P3 po 500 nárazech při 1600 N za použití ocelové kuličky o průměru 5 mm jako tlačného indentoru. [38]



Obr. 46 Detailní pohled na kruhové trhliny na obvodu rázového poškození na povlaku P3 po 500 nárazech při 1600 N s použitím ocelového indentoru o průměru 5 mm [dle 38]

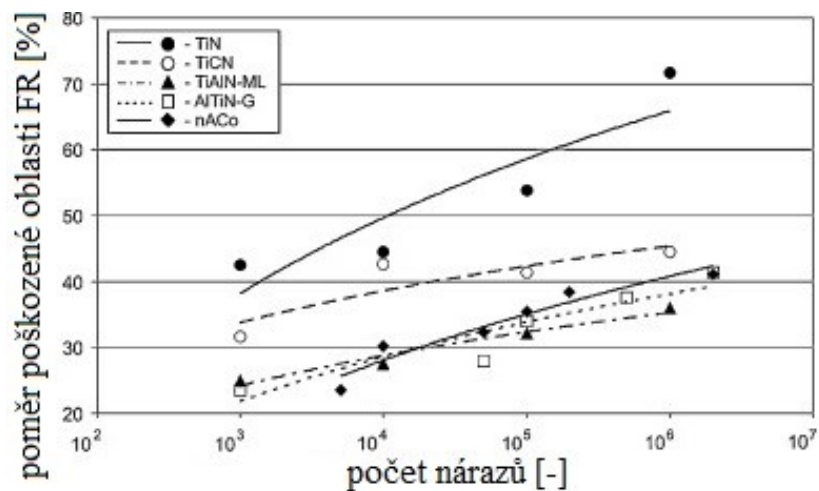
Je to pochopitelné vzhledem k vysokým úrovním tahového napětí v bezprostřední blízkosti prohlubně. Tenký tvrdý povlak plně přenáší napěťové pole generované nárazem na tvárný substrát, ten prochází velkou plastickou deformací, které se povlak nemůže přizpůsobit jinak než vytvořením sítě trhlín. Ve většině případů mají trhliny kruhový tvar, ale mohou být doplněny druhou sadou radiálních trhlín, typicky pozorovaných na povlacích s nízkou houževnatostí nebo nízkým vnitřním napětím.

Podobné jevy poškození jsou pozorovány v případě tvrdých povlaků deponovaných na tvrdých substrátech, které byly testovány za podmínek silného rázu vedoucího k plastickým deformacím substrátu. V obou případech (tvárné a tvrdé podklady) budou obvodové trhliny rychle interagovat, a to povede k odlupování povlaku. *Obr. 47* ilustruje tento účinek pozorovaný na testovaných povlacích P5 za použití WC-Co indentoru o průměru 600 μm při 1600 N po 1000 rázech. [38]



Obr. 47 Degenerace kruhových trhlin na odlupování v povlaku P5 [dle 38]

Podobnou studií o hodnocení PVD povlaků uložených na podkladu ze slinutého karbidu se zabýval i Maksim Antonov. Cílem jeho studie bylo posouzení účinnosti nanokompozitního gradientního supertvrdeho PVD povlaku a srovnání s ostatními gradientními, mono a vícevrstevnými povlaky. Byly provedeny testy rázového, erozivního a abrazivního opotřebení, aby se získal přehled o kvalitativních a kvantitativních aspektech opotřebení PVD povlaků. Míra porušení kolem otisku je popsána prostřednictvím poměru FR. [39]



Obr. 48 Průběh poškození povlaku pod nárazem 80 mJ [dle 39]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

Praktická část práce je zaměřena na konstrukční návrh a výrobu upínacího systému pro soustružnický nůž s vyměnitelnou břitovou destičkou ze slinutého karbidu, která bude cyklicky zatěžována tlačným trnem pomocí testovacího zařízení Zwick/Roell Vibrophore 100. Samotná výroba bude realizována na pětiosém frézovacím centru DMG MORI DMU 50 za pomoci vytvořeného obráběcího programu v CAM softwaru. Po zhotovení všech potřebných dílů bude následovat jejich kompletace a zátěžová zkouška navrženého upínacího přípravku.

Požadavkem konstrukčního návrhu přípravku byla univerzálnost a možnost úhlově nastavitelného systému upnutí obráběcího nástroje.

Cíle práce jsou shrnuty do následujících bodů:

1. Návrh přípravku pro cyklické zkoušky obráběcích nástrojů s vyměnitelným trnem
2. Konstrukce, výroba a realizace provozních zkoušek
3. Diskuze chování navrženého přípravku a obráběcích nástrojů při cyklickém zatěžování

6 POUŽITÁ STROJNÍ ZAŘÍZENÍ

Pro vypracování praktické části této práce bylo použito strojní a přístrojové vybavení Ústavu výrobního inženýrství, Fakulty technologické ve Zlíně. Níže zmíněné vybavení se nachází v laboratoři výrobních technologií.

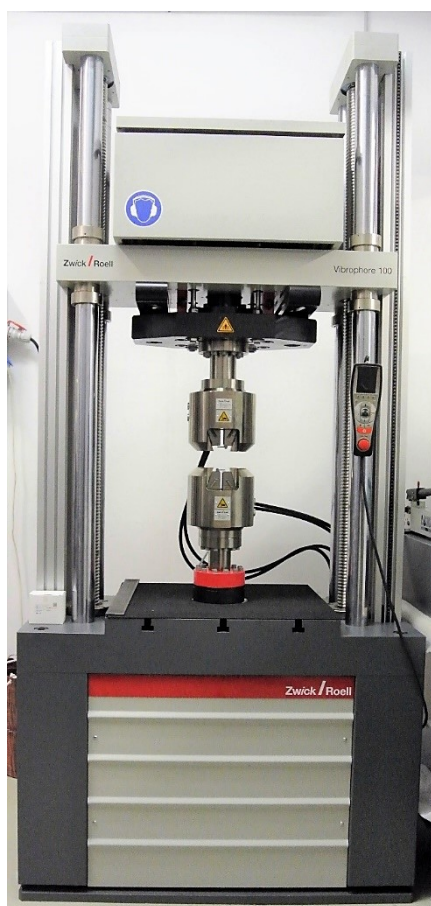
6.1 Víceúčelový vysokofrekvenční pulsátor Zwick/Roell Vibrophore 100

Zkušební dynamický stroj je poslední generací vysokofrekvenčních pulsátorů, používaných pro dynamické (vibrační) testování materiálů a určování únavové životnosti součástí (křivka S-N) v rozsahu tahové, tlakové, pulzující a střídavé zátěže. [41]

Tab. 6 Vybrané technické parametry testovacího zařízení Vibrophore 100 [dle 41]

Max. síla	100 kN
Max. amplituda síly	± 50 kN
Max. oscilační posun	6 (± 3) mm
Frekvenční rozsah	(30 - 285) Hz
Max. testovací výška	1200 mm
Testovací SW	testXpert R
Váha bez čelistí	cca 3200 kg

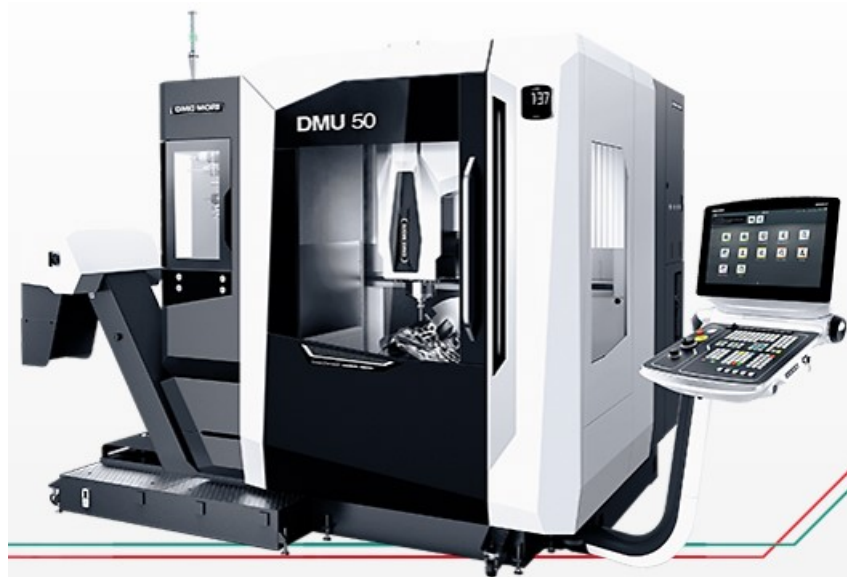
Na Obr. 49 je zobrazeno testovací zařízení s upínacími čelistmi, zvolené pro konstrukci přípravku na cyklický rázový test.



Obr. 49 Zkušební stroj Vibrophore 100 od firmy Zwick/Roell [42]

6.2 Obráběcí centrum DMG MORI DMU 50

Výroba všech nenormalizovaných dílů upínacího přípravku proběhla na pětiosé univerzální CNC frézce s naklápěcím rotačním stolem. Tato frézka běží na řídicím systému Siemens Sinumerik 840D / CELOS.



Obr. 50 Pětiosá CNC frézka DMU 50 3. generace [43]

Tab. 7 Technické údaje CNC frézky DMU 50 [dle 43]

Max. pojezd v ose X	650 mm
Max. pojezd v ose Y	520 mm
Max. pojezd v ose Z	475mm
Max. zatížitelnost stolu	300 kg
Průměr stolu	630 mm
Kapacita nástrojů	30 pozic
Otáčky vřetena	15 000 ot/min
Max. točivý moment vřetena	111 Nm
Jmenovitý točivý moment	85 Nm
Max. hnací výkon motoru	21 kW
Jmenovitý výkon motoru	16 kW
Rychloposuv v ose X, Y, Z	42 m/min

7 NÁVRH UPÍNACÍHO PŘÍPRAVKU

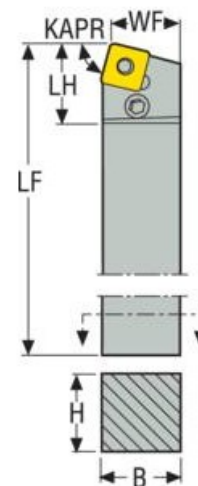
Celý konstrukční návrh se odvíjí od tvaru a rozměru hydraulických klínových čelistí, které jsou připevněny na zkušební cyklovací stroj. Takže prvním krokem bylo změření důležitých rozměrů, zejména pak rozteč a průměr připevňovacích šroubů umístěných na čelní ploše čelistí, kde bude přišroubována základová deska celého přípravku. Poté byly tyto čelisti vymodelovány v programu SolidEdge ST10 a vloženy do sestavy představující zkušební testovací stroj. Od toho se dále odvíjel celý návrh.

Byly vytvořeny dva konstrukční návrhy, které vždy obsahují následující dílčí prvky: základová deska, upínací adaptér, tlačný trn a normalizované díly.

Pro experiment byl vybrán soustružnický ubírací nůž přímý – pravý, vnější od firmy Seco Tools s katalogovým označením PSBNR2020K12 a k němu příslušné břitové destičky ze slinutého karbidu s CVD povlakem, které jsou určeny na obrábění litiny, pod katalogovým číslem SNMA120416 TK0501. Vybrané destičky mají rovný povrch čela bez jakéhokoliv utvařeče třísek, aby se maximalizoval kontakt mezi tlačným hrotem a povrchem destičky. Do Tab. 8 byly zaneseny nejdůležitější parametry vybraného obráběcího nástroje.

Tab. 8 Technická specifikace soustružnického nože [dle 44]

Popis	Atribut	Hodnota
Šířka stopky	B	20,0 mm
Výška stopky	H	20,0 mm
Ortogonální úhel čela	GAMO	-6,0 °
Systém upnutí destiček	ICS	P
Úhel nastavení ostří nástroje	KAPR	75,0 °
Funkční délka	LF	125,0 mm
Délka hlavičky	LH	26,0 mm
Funkční šířka	WF	20,3 mm
Hmotnost		0,371 kg

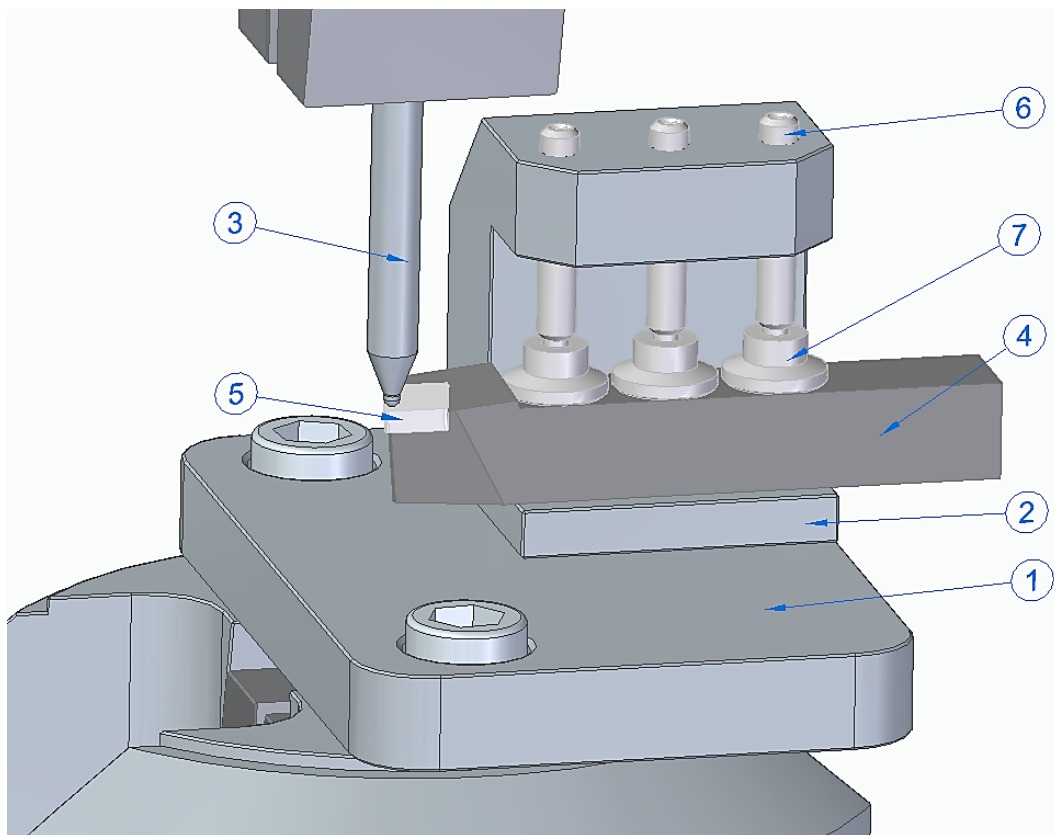


Obr. 51 Schéma nástroje [44]

7.1 První návrh přípravku

Jak již bylo dříve uvedeno, návrhy mají podobné konstrukční prvky, v tomto případě tomu není jinak. Pevná opěrná plocha celé sestavy je tvořena základovou deskou, která je pomocí dvou imbusových šroubů M16x40 připevněna k čelní ploše čelisti zkušebního

stroje. Na tuto desku je přišroubován upínací adaptér třemi imbusovými šrouby M10x40 ze spodní plochy základové desky tak, že jejich válcová hlava je zapuštěná do desky, aby nebyla v kontaktu s čelní plochou spodní čelisti stroje. V těle upínacího adaptéru je vytvořené vybrání pro umístění soustružnického nože, jehož poloha je aretovaná pomocí tří přítlačných závitových šroubů s kulovým čepem na konci, kam dosedají kompatibilní podložky. Přítlačné podložky se na kulovém čepu mohou vyklonit až o 15 °. V horní čelisti zkušebního stroje je pak sevřen tlačný trn, který má na jednom konci rovinné plochy pro lepší upnutí a na konci druhém je polokulový indenter pro kontakt s destičkou.

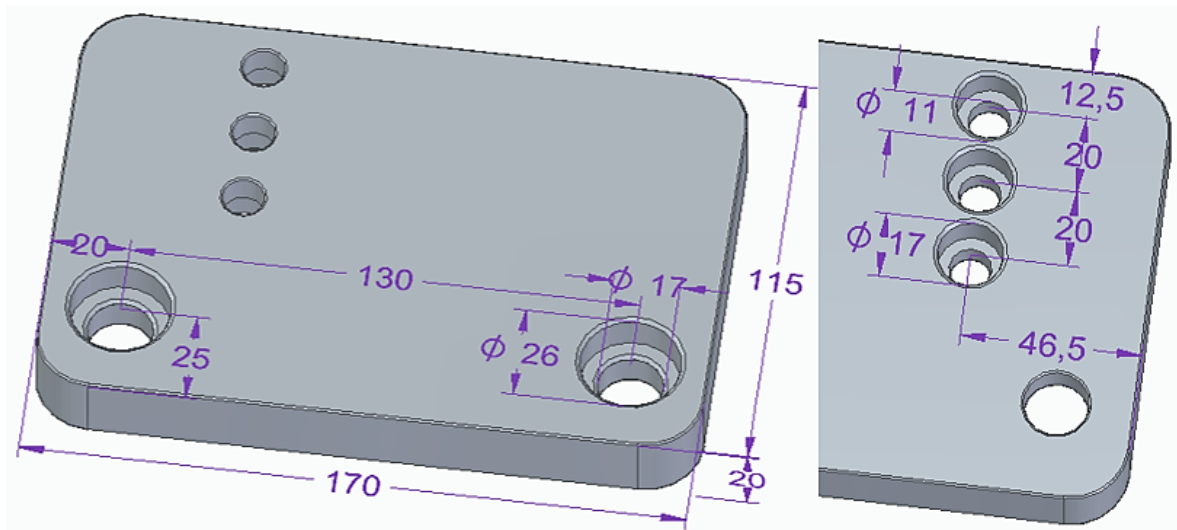


Obr. 52 3D model sestavy prvního návrhu přípravku pro cyklický rázový test (1-základová deska, 2-upínací adaptér, 3-tlačný trn, 4-soustružnický nůž, 5-břítová destička, 6-šroub s kulovým čepem, 7-přítlačná podložka

• Základová deska

Tato 20 mm silná deska je opěrným a nosným členem celého přípravku. Samotná deska v sobě má vyfrézované průchozí otvory pro imbusové šrouby, jejichž osazené válcové hlavy jsou do ní zapuštěny, u větších šroubů částečně a u šroubů připevňujících adaptér jsou zapuštěny až pod úroveň spodní plochy desky.

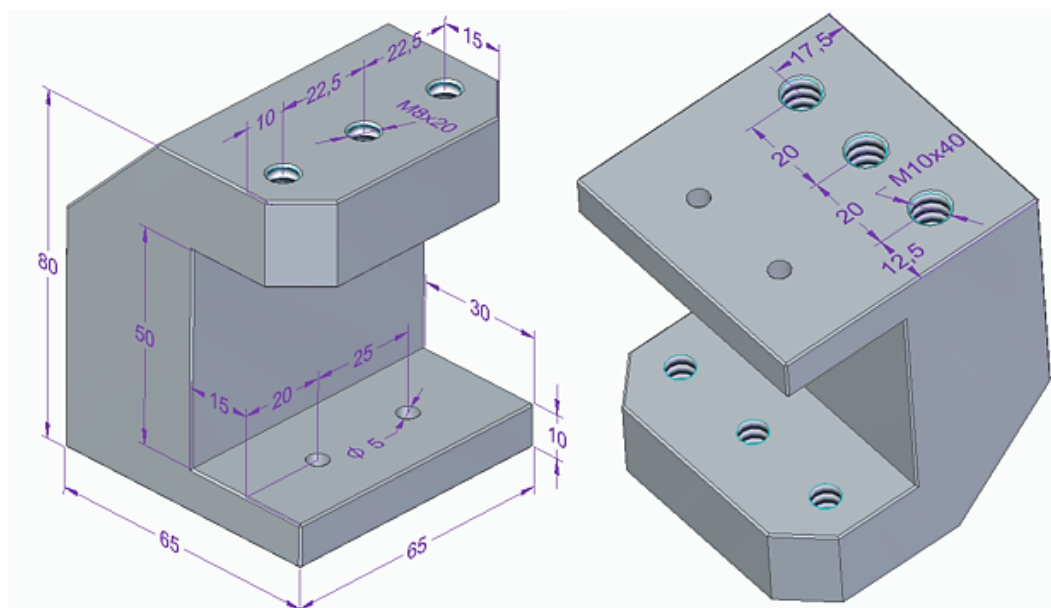
Na *Obr. 53* jsou vyneseny nejdůležitější rozměry základové desky.



Obr. 53 3D model základové desky s hlavními rozměry

• Upínací adaptér

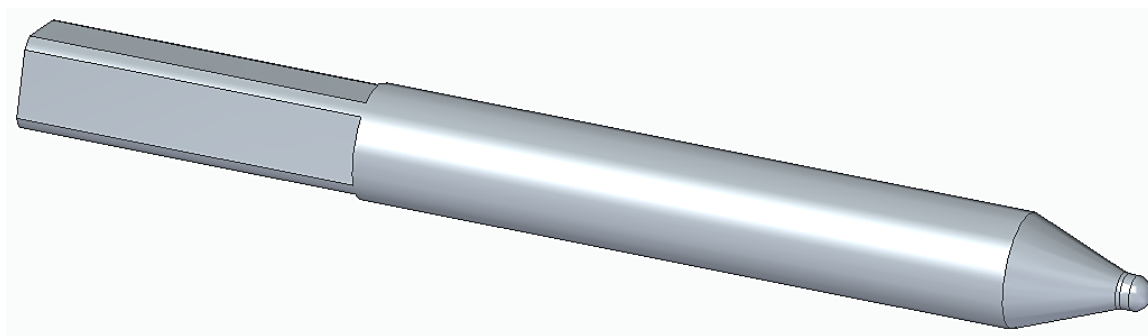
Tvoří hlavní funkční část pro ustavení soustružnického nože s vyměnitelnou břitovou destičkou. Zjednodušeně řečeno, to je kvádr s výřezem, závitovými dírami a průchozími dírami pro válcové kolíky, jejichž význam bude vysvětlen později. Návrh tohoto prvku se inspiroval běžně používanými upínači a držáky soustružnických nožů. Při konstrukci adaptéru byl brán zřetel především na funkčnost a spolehlivost upnutí nástroje a také samozřejmě na vyrobiteľnost. Dalším charakteristickým prvkem toho adaptéru je možnost úplné změny nožového držáku, ať už jeho tvaru, anebo rozměru průřezu čtvercové stopky držáku. Upínací adaptér je k základové desce připevněn třemi imbusovými šrouby M10x40 s pevnostní třídou oceli 12.9.



Obr. 54 3D model upínacího adaptéru s hlavními rozměry

- **Tlačný trn**

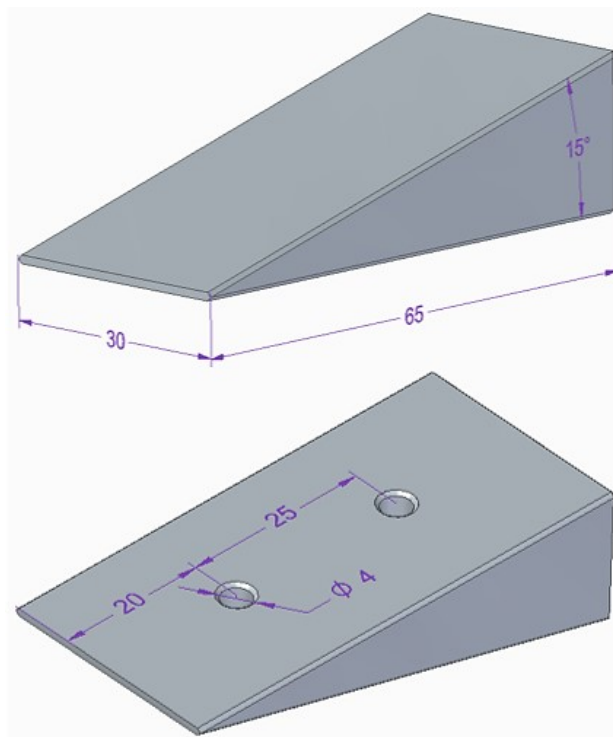
Tlačný trn je těleso, které přenáší zatížení generované zkušebním strojem na kontaktní plochu břitové destičky. Ke kontaktu dochází přes polokulovou plochu na jednom konci trnu. Samotné sevření do horní čelisti je uskutečněno přes rovinnou dosedací plochu, aby se docílilo maximální velikosti styčné plochy. Vypracování finální podoby tlačného trnu předcházelo několika jeho modifikacím a úpravám. Byl měněn poloměr zaoblení polokoule a délka přechodové oblasti průměru polotovaru na průměr výstupku. Také bylo počítáno se dvěma různými materiály, ze kterých měl být trn vyroben. Nejprve měl být trn vyroben z nástrojové oceli 19 421 jako zkušební verze a poté se měl nechat vybrousit ze slinutého karbidu, k čemuž nedošlo kvůli vyšším pořizovacím nákladům.



Obr. 55 3D model tlačného zátěžového trnu

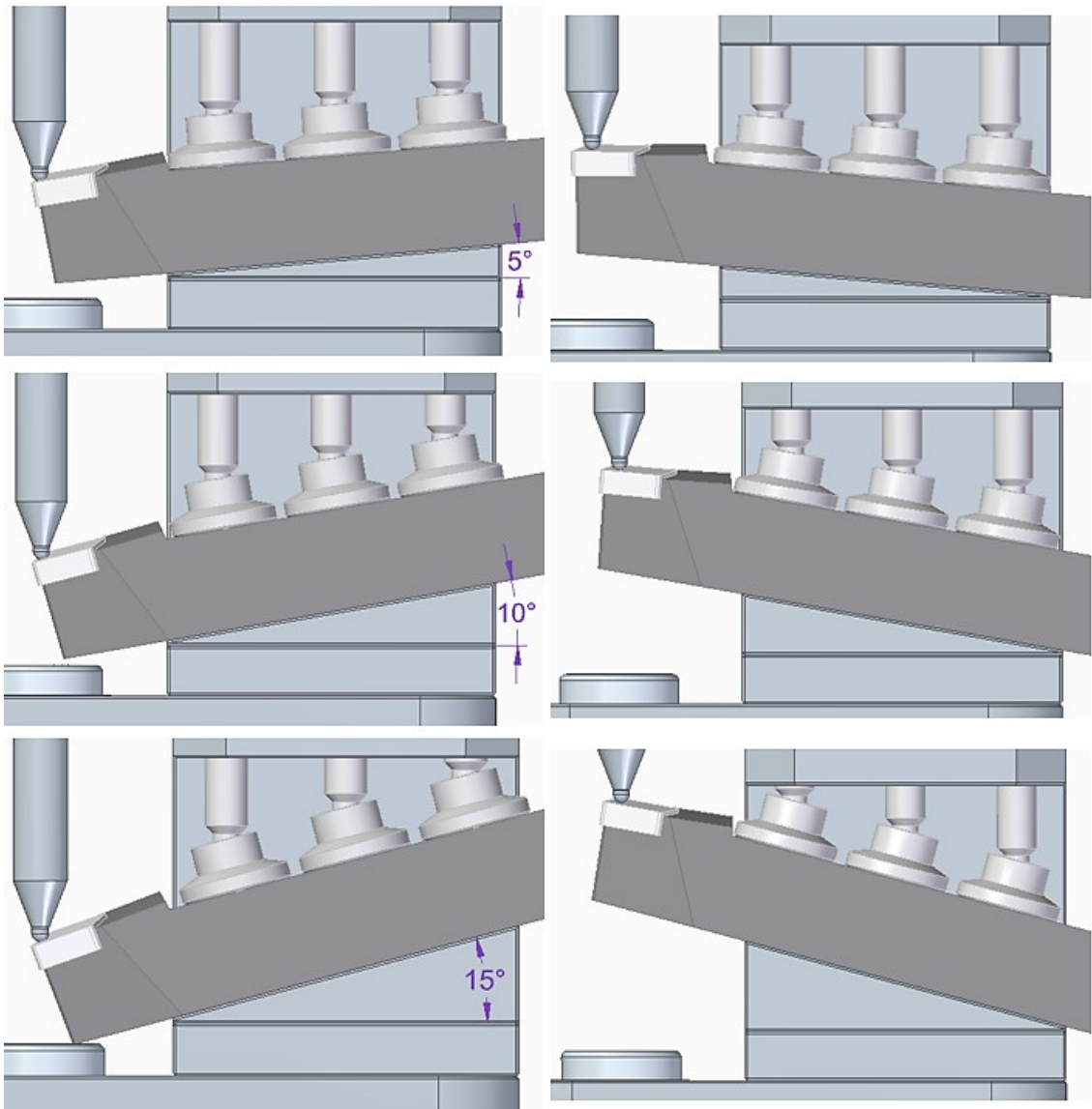
- **Úhlové klíny**

Jsou to podpěry soustružnického nože, které mají za úkol simulovat dynamickou rázovou zkoušku s nakloněnou rovinou. Klíny jsou navrženy ve třech totožných verzích, pouze se mění jejich úhel sklonu, tedy 5° , 10° a 15° . Klín je vůči upínacímu adaptéru vymezen dvěma válcovými kolíky o průměru 4 mm dlouhými 12 a 16 mm. Klíny, stejně jako základová deska a upínací adaptér, budou z ušlechtilé konstrukční oceli 14 220.



Obr. 56 3D model klínu s úhlem 15°

Na následujícím obrázku jsou shrnuty všechny možnosti použití úhlových klínů.

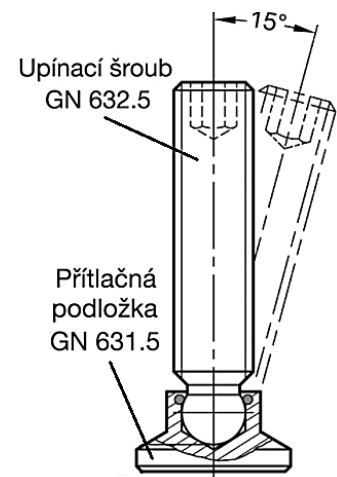


Obr. 57 Všechny verze použití klínů (vlevo – kladné úhly, vpravo – záporné úhly)

- Šrouby s kulovým čepem a přítlačné podložky

Pro dosažení pevného ustavení obráběcího nástroje v upínacím adaptéru bylo použito normalizovaných dílů, které umožňují vychýlení osy o 15° . Výrobce tyto díly dodává z nerezové oceli 17 243.

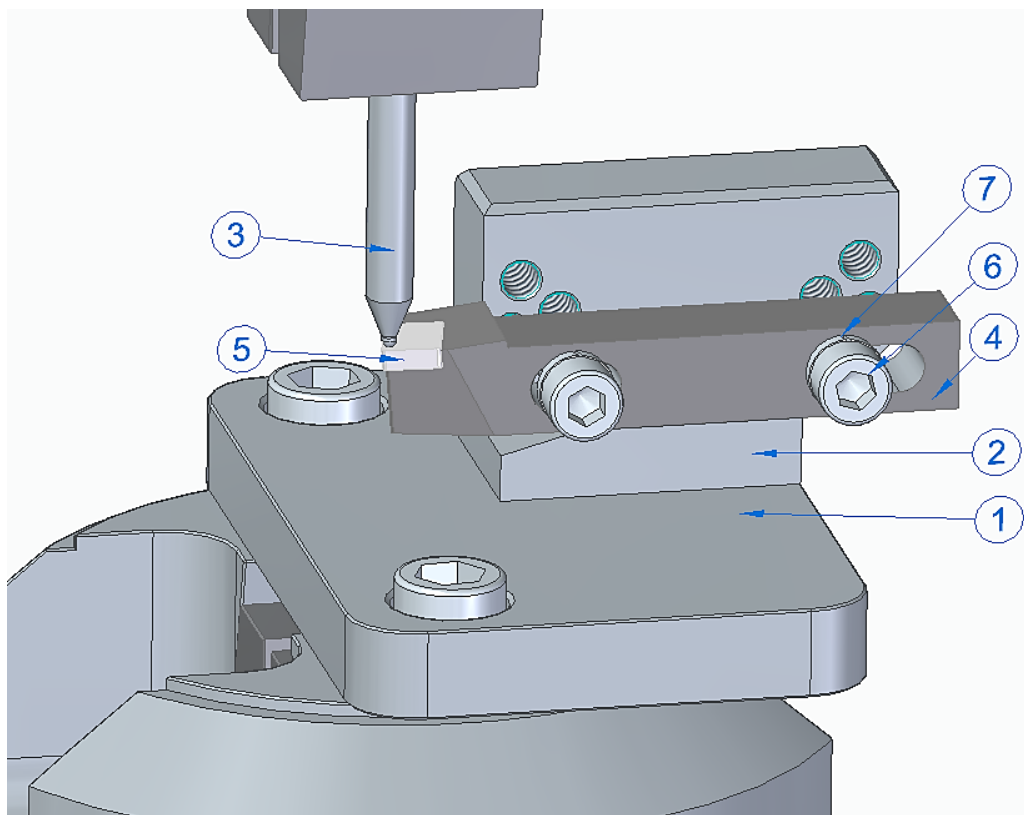
Z internetových stránek výrobce byly staženy 3D modely, které byly použity v sestavě přípravku.



Obr. 58 Schéma dílů [dle 45]

7.2 Druhý návrh přípravku

Druhá navržená konstrukce přípravku je velmi obdobná té první. Opět je zde základová deska s přišroubovaným adaptérem, který se ovšem trochu odlišuje od první verze. Celkové pojetí druhého návrhu vychází z předpokladu, že by se do zvoleného soustružnické nože vyfrézovaly dvě drážky pro šrouby, kterými by se nůž pevně ustavil do požadované polohy na adaptéru. Závrtové díry jsou v adaptéru rozmístěny tak, že nezasahují do třech otvorů k připevnění desky, zároveň se neprotínají mezi sebou a odpovídají úhlovému nastavení spolu s velikostí drážek v noži.

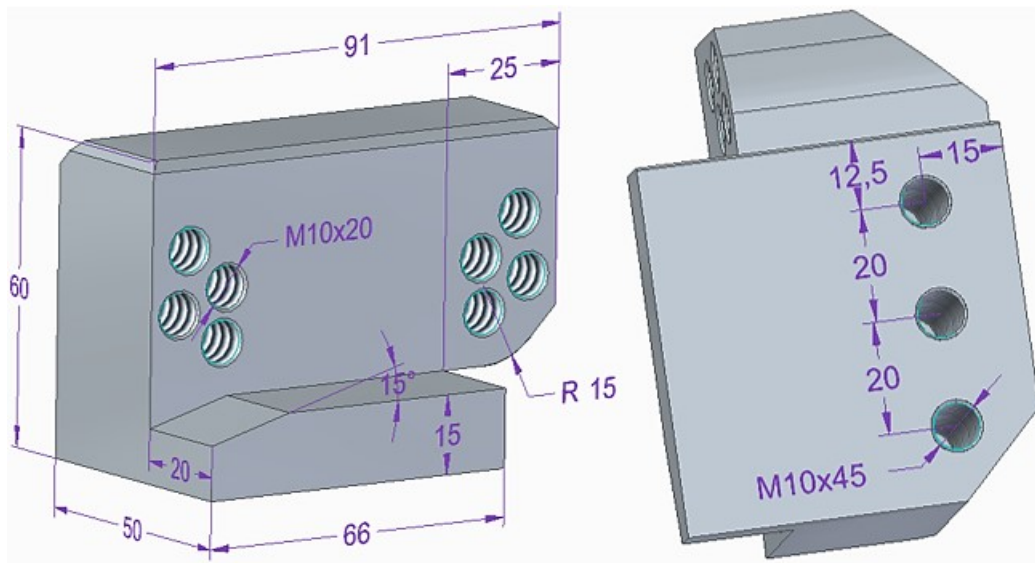


Obr. 59 3D model sestavy druhého návrhu přípravku pro cyklický rázový test (1-základová deska, 2-upínací adaptér, 3-tlačný trn, 4-soustružnický nůž, 5-břitová destička, 6-šroub M10x40, 7-pérová podložka)

- **Upínací adaptér se závrtovými dírami**

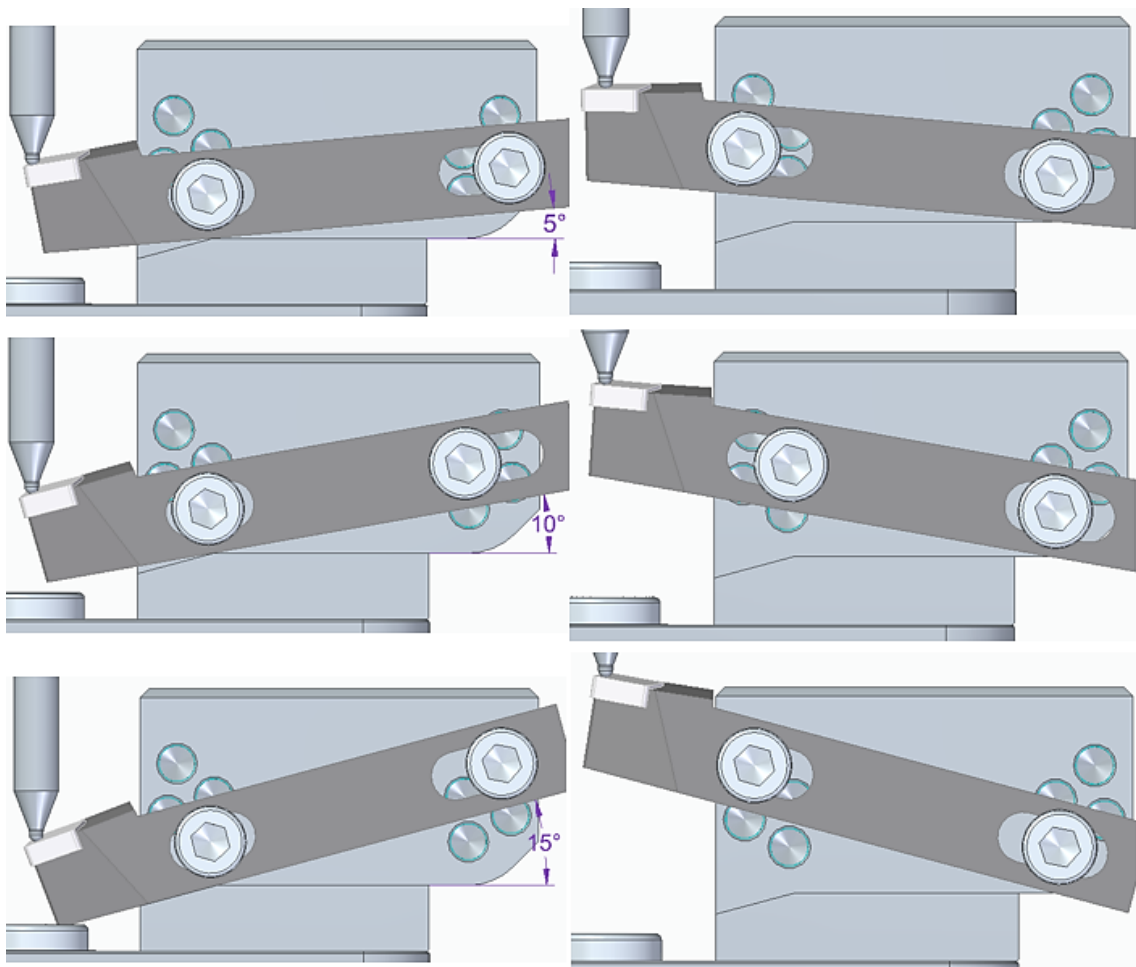
Opěrná plocha pod soustružnickým nožem je přesně odpovídající velikosti průřezu čtvercové stopky nožového držáku. Rozmístění závrtových děr, pro uložení obráběcího nástroje pod daným úhlem, bylo vytvořeno tím způsobem, že první dvě spodní díry slouží jako výchozí bod pro úhlování nástroje. Aby díry do sebe navzájem nezasahovaly, bylo potřeba je dostatečně oddálit. Toho bylo docíleno přes roztečnou kružnici od výchozího bodu. Taky bylo zapotřebí zvětšit upínací plochu adaptéru směrem do zadní části, kde byl

dostatečný prostor kolem zkušebního stroje a nijak to nebránilo v jeho fungování.



Obr. 60 3D model upínacího adaptéru pro druhý návrh s hlavními rozměry

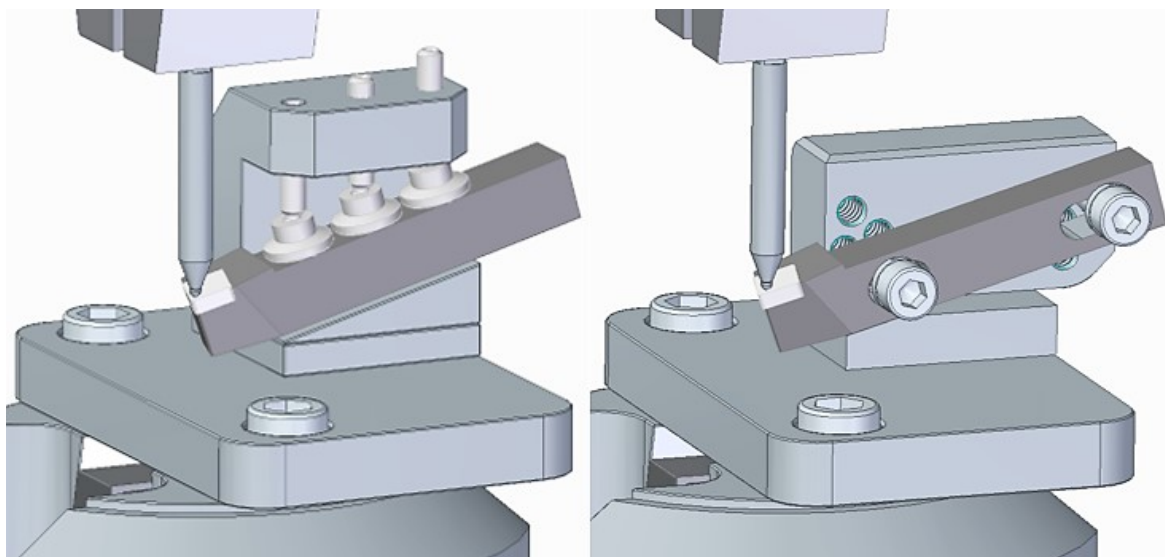
Na následujícím obrázku jsou opět shrnuty všechny způsoby upnutí nástroje na adaptér.



Obr. 61 Všechny verze upnutí nástroje (vlevo – kladné úhly, vpravo – záporné úhly)

7.3 Porovnání a volba konkrétního návrhu

Na Obr. 62 je zobrazeno porovnání obou návrhů přípravku v provedení s úhlem 15° .



Obr. 62 Srovnání prvního a druhého návrhu ve verzi s 15° sklonem nástroje

Před konečným výběrem jednoho z návrhů, který bude vyroben, byla zaznamenána všechna pro a proti do Tab. 9.

Tab. 9 Porovnání zásadních faktorů mezi 1. a 2. návrhem

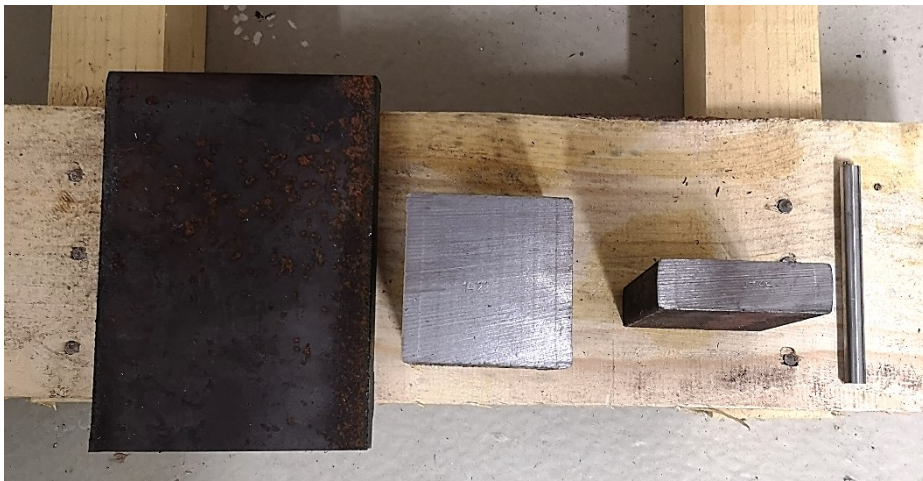
	1. návrh	2. návrh
Funkčnost	ano	ano
Vyrobitelnost	ano (klíny navíc)	jednodušší než 1.
Univerzálnost	ano	ne
Tuhost	ano	snížená drážkami
Ustavení polohy	dobré	jednodušší než 1.

Při porovnání obou návrhů je potřeba říct, že první i druhé konstrukční řešení je navrženo tak, aby bylo funkční a zároveň splňovalo podmínky pro dynamickou rázovou zkoušku. Z pohledu složitosti výroby je u prvního návrhu nevýhoda v tom, že navíc obsahuje tři úhlové klíny, s nimiž jsou spojeny dva válcové otvory na adaptéru. U druhého návrhu je nevýhoda v tom, že všechny funkční prvky jsou pevně stanoveny a konstruovány jen pro daný typ nástroje. Také je zde snížena tuhost v důsledku potřeby dvou drážek v noži a uchycení jen dvěma šrouby. V porovnání ustavení polohy není v druhém případě moc prostoru k chybování a s prvním návrhem by si zručná obsluha měla také poradit. Po uvážení všech kladů a záporů byl vybrán první návrh, a to především kvůli jeho univerzálnosti a možnosti upnutí i jiných průřezů stopky nožového držáku.

8 VÝROBA DÍLŮ UPÍNACÍHO PŘÍPRAVKU

Jednotlivé komponenty přípravku byly vyrobeny ze zakoupených polotovarů, které se nejprve obrobily a zarovnaly pomocí dílenského programování přímo v řídicím systému obráběcího centra. Než mohl být vytvořen obráběcí program v programovacím modulu NX 12, musely být všechny vymodelované součástky v SolidEdge ST10 převedeny do softwaru NX 12.

Při samotném programování se vycházelo z nástrojů uložených v zásobníku CNC frézky a z dostupných nástrojů v laboratoři výrobních technologií. Pro tyto nástroje byly dohledány řezné podmínky doporučené výrobcem nástroje.



Obr. 63 Zakoupené polotovary před obrobením a zarovnáním

Zakoupené polotovary:

- Pro základovou desku – plech P25 – 120 x 175 ČSN 42 5310.11 – 14 220
- Pro upínací adaptér – tyč čtvercová 4HR 70 – 85 ČSN 42 5520.20 – 14 220
- Pro úhlové klíny – tyč plochá PLO 70 x 20 – 100 ČSN 42 5522.01 – 14 220
- Pro tlačný trn – tyč kruhová KR 10 – 105 ČSN 42 5510.12 – 19 421

8.1 Základová deska

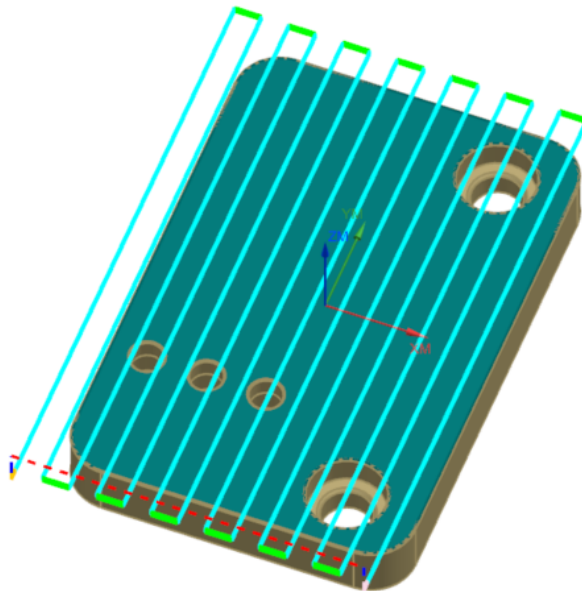
Prvním krokem při programování bylo nastavení velikosti polotovaru a umístění nulového bodu obrobku. Poté se mohly začít generovat obráběcí operace. Každá operace byla vždy verifikována a odsimulována, zdali nedochází k nějakým kolizím. Sled jednotlivých operací bude popsán níže ve výrobním postupu. Základová deska byla zhotovena na dvě upnutí. Přehled použitých nástrojů a jejich řezných podmínek je zobrazen v *Tab. 10*.

Tab. 10 Použité nástroje a jejich řezné podmínky pro výrobu základové desky

Číslo nástroje	Označení	Průměr [mm]	Délka řezné části [mm]	Délka [mm]	Počet břitů	Otáčky n [ot/min]	Řezná rychlost v_c [m/min]	Posuv na zub f_z [mm/zub]	Hloubka řezu a_p [mm]
1.	FHS_D20_L35_R2	20,0	35,0	40,0	3	4775,0	300,0	0,650	0,3
2.	VT_D8.5_L49	8,5	49,0	80,0	2	4307,0	115,0	0,100	5,0
3.	FM_D8_L18_R0	8,0	18,0	75,0	4	5968,0	150,0	0,040	0,4
4.	FM_HRANA_D8_L0.7	8,0	14,0	33,0	4	1592,0	40,0	0,047	-

- **Hrubování horní plochy desky**

Po zarovnání polotovaru bylo ještě potřeba odebrat část materiálu z horní plochy desky. Toho bylo dosaženo operací Floor Facing without Wall metodou Zig Zag, za použití nástroje č. 1, který osmi řezy odebral 2,4 mm materiálu.



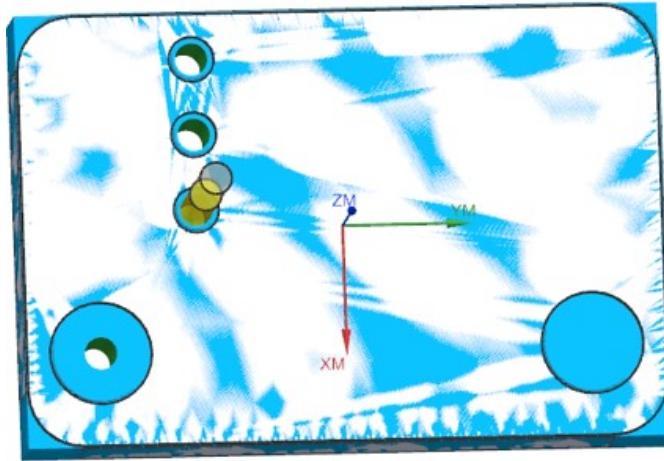
Obr. 64 Hrubování horní plochy desky

- **Dokončení horní plochy desky**

V předchozí operaci byl nastaven přídavek na dokončení 0,1 mm, který byl odebrán stejnou operací i nástrojem, pouze byla změněna metoda na Zig.

- **Předvrtání děr**

Větší část materiálu byla z válcových děr odebrána vrtákem č. 2. Vrtání probíhalo v cyklu po hloubkových přírůstcích 5 mm.



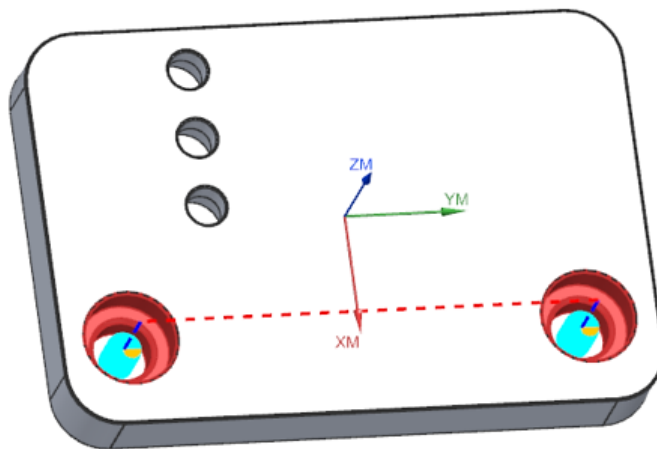
Obr. 65 Průběh simulace vrtací operace

- **Rozfrézování děr \varnothing 11 mm**

Po odstranění většiny materiálu z děr pro šrouby M10 bylo zapotřebí díry doobrobit na požadovaný rozměr. Pro tento úkon byla použita operace Hole Milling s metodou spirálovitého úběru materiálu. Rohová fréza č. 3 zajela do hloubky $Z = -10$ mm, zbytek díry i s osazením pro hlavu šroubu byl obroben na druhé upnutí z opačné strany.

- **Rozfrézování děr \varnothing 17 mm s osazením**

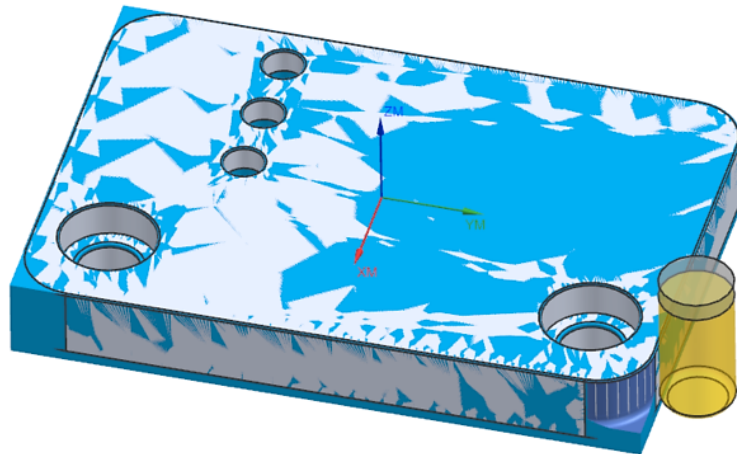
Tak jako u předchozí operace i zde bylo potřeba dokončit zbývající dvě díry pro šrouby M16. V prvním kroku bylo obrobena vybrání pro hlavu šroubu a až poté byl obráběn průměr \varnothing 17 mm do hloubky $Z = -20$ mm, protože upnutí ve svěráku to dovolovalo.



Obr. 66 Rozfrézování všech děr na první upnutí

- **Frézování zaoblení rohů desky**

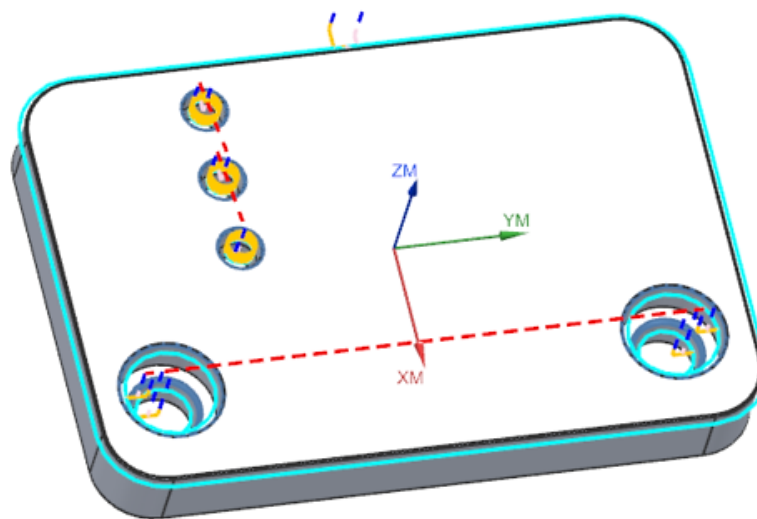
Pro dosažení požadovaného tvaru obvodu desky byla použita operace Rest Milling s nástrojem č. 1. Tato operace byla nastavena tak, aby vždy došlo k obrobení daného rohu do hloubky $Z = -22,5$ mm a nástroj tak nevykonával přebytečné pohyby kolem celého obvodu desky.



Obr. 67 Průběh zbytkového obrábění zaoblení rohů desky

- **Sražení hran**

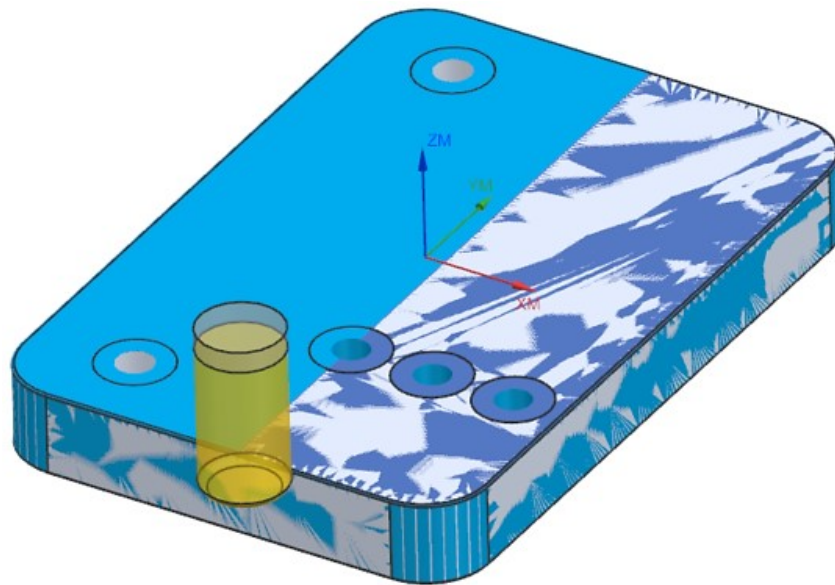
Poslední operací, která byla vykonána při prvním upnutí desky, bylo sražení všech hran pomocí srážecí frézy č. 4.



Obr. 68 Srážecí operace prvního upnutí desky

- **Obrobení spodní plochy desky**

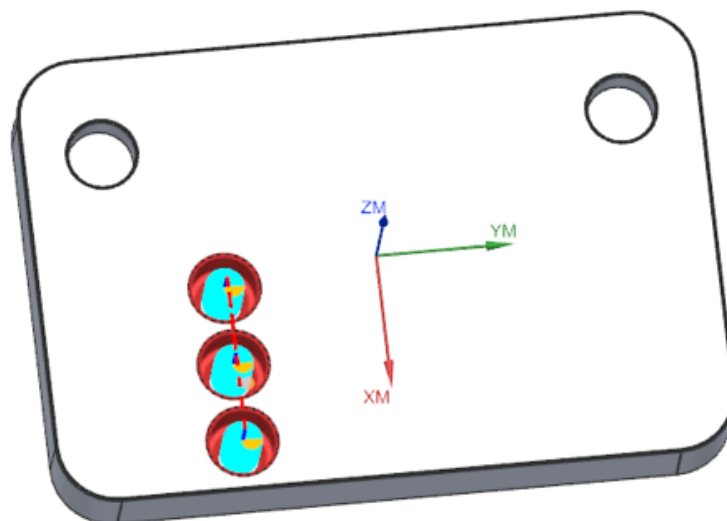
Poté, co byla deska přeupnuta a opětovně upevněna do svěráku, výrobní postup byl obdobný jako již popsané operace. Opět za použití nástroje č. 1 byla vyhrubována většina materiálu s přidavkem na dokončení 0,1 mm, který byl odebrán následující dokončovací operací stejným nástrojem.



Obr. 69 Simulace dokončovací operace spodní plochy desky

- **Odfrézování osazení pro zapuštění hlav šroubů**

K poslednímu většímu úběru materiálu došlo při obrábění osazení pro zapuštění válcových hlav imbusových šroubů. Pro tuto operaci byl opět zvolen nástroj č. 3.



Obr. 70 Frézování osazení pro hlavy šroubů

- **Sražení hran**

I na této straně byly sraženy všechny dostupné hrany.



Obr. 71 Finální podoba základové desky

Pro úplnost a lepší přehlednost jednotlivých úkonů ve výrobním postupu byla vytvořena souhrnná tabulka operací.

Tab. 11 Přehled operací při výrobě základové desky

	Název operace	Příkaz	Nástroj
1.	Hrubování horní plochy	Floor Facing without Wall	č. 1
2.	Dokončení horní plochy	Floor Facing without Wall	č. 1
3.	Předvrtání děr	Drilling	č. 2
4.	Rozfrézování děr Ø11 mm	Hole Milling	č. 3
5.	Rozfrézování děr Ø17 mm	Hole Milling	č. 3
6.	Frézování zaoblení rohů	Rest Milling	č. 1
7.	Sražení hran	Cuts 3D Modeled Chamfers	č. 4
8.	Obrobení spodní plochy	Floor Facing without Wall	č. 1
9.	Frézování osazení šroubů	Hole Milling	č. 3
10.	Sražení hran	Cuts 3D Modeled Chamfers	č. 4

8.2 Upínací adaptér

Výchozím polotovarem pro výrobu adaptéru byla čtvercová tyč 4HR 70 - 85 materiálu 14 220, u které byly zarovnaný všechny strany a poté byl tvořen samotný obráběcí program. Nebyl zde využit plný potenciál pětiosé frézky, ale bylo použito naklápění stolu s upnutým svěrákem. K již použitým nástrojům přibylo pár dalších, jako např. vrtáky

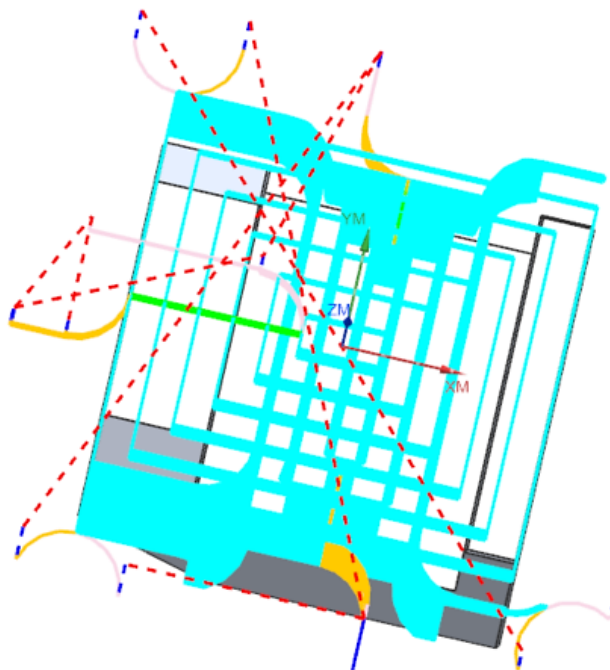
a závitníky pro výrobu závitových děr. Všechny použité nástroje a příslušné řezné podmínky jsou shrnuty v Tab. 12.

Tab. 12 Přehled nástrojů a řezných podmínek použitých při výrobě adaptéru

Číslo nástroje	Označení	Průměr [mm]	Délka řezné části [mm]	Délka [mm]	Počet břitů	Otáčky n [ot/min]	Řezná rychlost v_c [m/min]	Posuv na zub f_z [mm/zub]	Hloubka řezu a_p [mm]
1.	FHS_D20_L35_R2	20,0	35,0	40,0	3	4775,0	300,0	0,650	0,3
2.	VT_D8.5_L49	8,5	49,0	80,0	2	4307,0	115,0	0,100	5,0
3.	FM_HRANA_D8_L0.7	8,0	14,0	33,0	4	1592,0	40,0	0,047	-
4.	VT_D5_L35	5,0	35,0	80,0	2	7003,0	110,0	0,071	5,0
5.	VT_D6.8_L43	6,8	43,0	80,0	2	5149,0	110,0	0,097	5,0
6.	Z_M10X1.5_L20	10,0	20,0	100,0	3	400,0	12,0	0,500	-
7.	Z_M8_1.25_L20	8,0	20,0	100,0	3	1313,0	33,0	0,416	-
8.	FM_D16_L63_R0	16,0	63,0	75,0	4	3879,0	195,0	0,021	0,5

• Hrubování kapsy a rohů

Jako první operace byla zvolena Cavity Mill pro vyhrubování kapsy s rohy adaptéru. Pro tuto operaci byl vybrán nástroj č. 1.



Obr. 72 Vyhrubování kapsy adaptéru

• Dokončení rohů

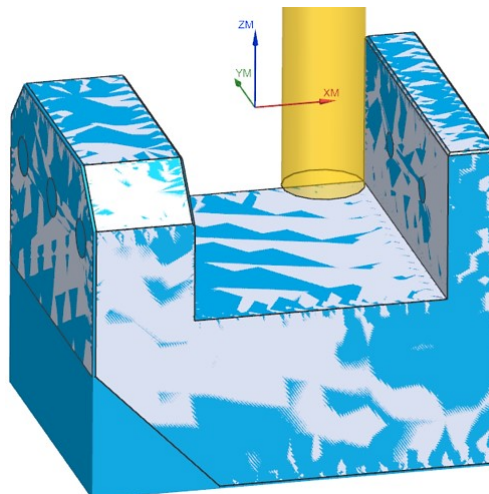
Se stejným nástrojem jako předešlá operace proběhlo i následující dokončení dvou rohů adaptéru. V operaci Floor Facing without Wall byla osa nástroje nastavena normálově k obráběné ploše. Ve výsledku to způsobilo otočení a naklopení stolu stroje.



Obr. 73 Dokončení rohů adaptéru

- **Začištění rohů v kapse**

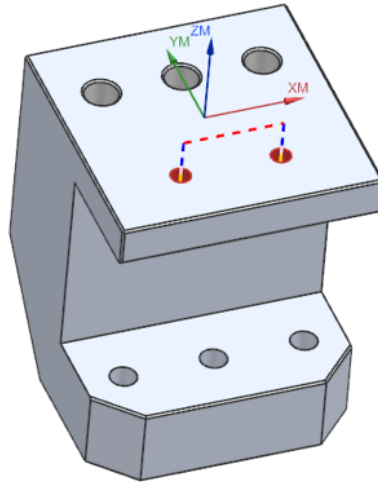
Tato operace byla zařazena do výrobního postupu z toho důvodu, že předchozí hrubovací fréza měla rohový rádius 2 mm a nemohla se dostat až do samotného rohu v kapse. Proto byla použita rohová fréza č. 8 a operací Rest Milling odebrala zbývající část materiálu.



Obr. 74 Dokončení rohů v kapse

- **Vrtání děr $\varnothing 5$ mm pro válcové kolíky**

První provedenou operací na druhé upnutí bylo vyvrtání dvou otvorů pro válcové kolíky ze spodní strany adaptéru. Použitým nástrojem byl vrták č. 4.



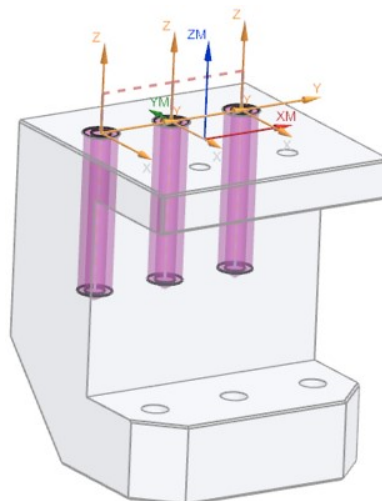
Obr. 75 Vrtání otvorů $\varnothing 5$ mm

- **Předvrtání děr pro závit M10**

Stejným vrtákem byly předvrtány otvory pro šrouby připevňující adaptér k základové desce. Vrtání proběhlo v cyklu po 5 mm úběru materiálu do hloubky pouze 32 mm, protože délka rezné části vrtáku je 35 mm.

- **Vrtání**

Vrtání na konečný průměr $\varnothing = 8,5$ mm se uskutečnilo nástrojem č. 2. Vrtací cyklus po hloubkových inkrementech opět 5 mm dosáhl finální hloubky $Z = -40$ mm.



Obr. 76 Vrtání děr pro závity M10

- **Sražení hran otvorů a obvodu podstavy adaptéru**

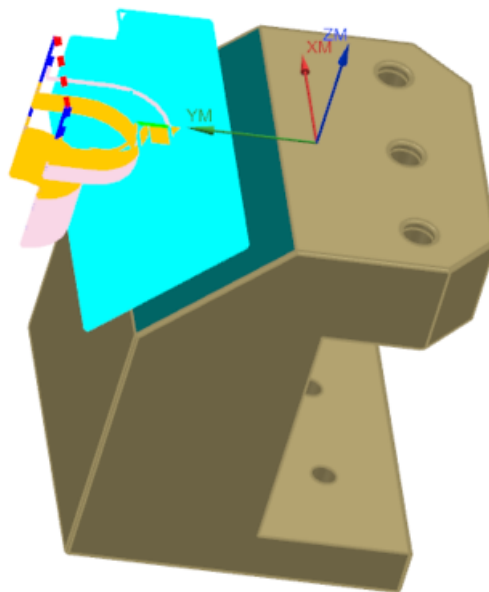
Před samotným řezáním závitu byly sraženy hrany otvorů pro lepší náběh a zařezání závitníku. Při výměně nástroje č. 3 byla sražena i hrana po obvodu podstavy adaptéru.

- **Závit M10**

Když byly nachystány otvory pro vytvoření závitové díry, proběhla výměna předchozího nástroje za závitník č. 6, který nařezal závit do hloubky pouze 3 mm, aby se předešlo zlomení závitníku v neprůchozí díře. Konečná tvorba závitu proběhla pomocí ručního dořezání za použití vratidla. Poté následovalo poslední přeupnutí na CNC obráběcí frézce.

- **Hrubování sražené plochy**

Pro hrubování sražení byla zvolena stejná operace jako pro hrubování kapsy adaptéru, a to Cavity Mill s nástrojem č. 1 pro odebrání většiny materiálu. Velikost třísky na jeden záběr byla zvolena 0,3 mm, aby nevnikly velké výstupky pro dokončovací operaci.



Obr. 77 Hrubování sražení

- **Dokončení sražené plochy**

Na úplné začištění a dokončení plochy sražení byla ještě zařazena obráběcí operace Floor Facing without Wall s normálovým nastavením osy nástroje č. 1 k dokončované ploše sražení. To opět vedlo k naklonění a otočení stolu s upnutým obrobkem ve svěráku.



Obr. 78 Dokončená plocha sražení

- **Vrtání děr pro závit M8**

Posledním velkým úběrem materiálu bylo vyvrtání tří průchozích otvorů pro budoucí přitlačné šrouby s kulovým čepem. Otvory o průměru $\varnothing = 6,8$ mm byly vyrobeny vrtákem č. 5 s totožnou velikostí. Vrtání proběhlo v cyklu po hloubkovém úběru materiálu 5 mm.

- **Sražení hran**

Před tvorbou závitu byly sraženy obvodové hrany děr spolu s dalšími hranami na horní ploše adaptéru, které bylo možné vyrobit při tomto upnutí obrobku.

- **Závit M8**

Poslední technologickou operací při výrobě upínacího adaptéru byla tvorba závitu M8. Při této operaci byl použit závitník č. 7, který opět pouze „naznačil“ závit do hloubky 4 mm. Zbýlá délka závitu v průchozí díře byla dořezána ručně za použití vratidla.



Obr. 79 Vyrobený upínací adaptér položený na základové desce

Tab. 13 Souhrn operací výrobního postupu upínacího adaptéru

	Název operace	Příkaz	Nástroj
1.	Hrubování kapsy a rohů	Cavity Mill	č. 1
2.	Dokončení rohů	Floor Facing without Wall	č. 1
3.	Začištění rohů v kapse	Rest Milling	č. 8
4.	Vrtání děr $\varnothing 5$ mm	Drilling	č. 4
5.	Předvrtání děr pro závit M10	Drilling	č. 4
6.	Vrtání děr $\varnothing 8,5$ mm	Driling	č. 2
7.	Sražení hran otvorů	Cuts 3D Modeled Chamfers	č. 3
8.	Závit M10	Tapping	č. 6
9.	Hrubování sražené plochy	Cavity Mill	č. 1
10.	Dokončení sražené plochy	Floor Facing without Wall	č. 1
11.	Vrtání děr $\varnothing 6,8$ mm	Drilling	č. 5
12.	Sražení hran	Cuts 3D Modeled Chamfers	č. 3
13.	Závit M8	Tapping	č. 7

8.3 Úhlové klíny

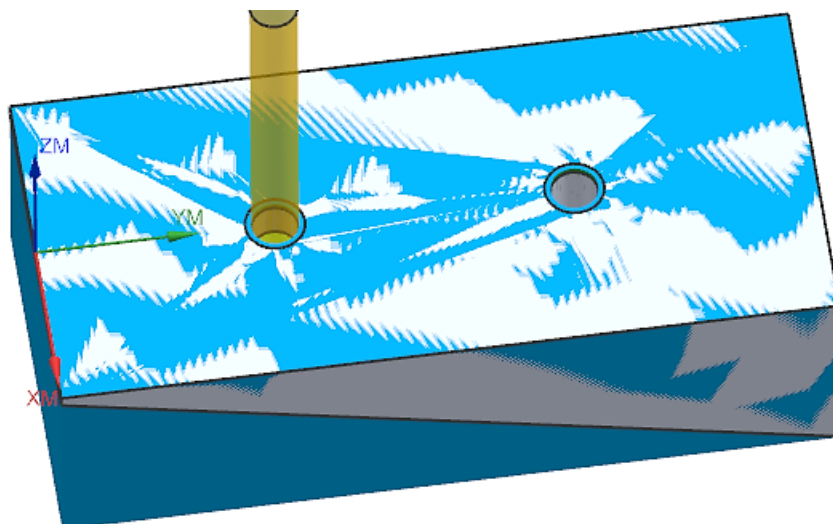
Výrobní postup u všech tří variant uhlových klínů byl stejný a skládal se z následujících kroků: vyvrtání otvorů pro válcové kolíky, sražení hran otvoru, hrubování plochy pod úhlem, dokončení plochy pod úhlem. Opět bylo využito dostupných nástrojů, které zobrazuje Tab. 14.

Tab. 14 Nástroje a jejich řezné podmínky použité při výrobě uhlových klínů

Číslo nástroje	Označení	Průměr [mm]	Délka řezné části [mm]	Délka [mm]	Počet břitů	Otáčky n [ot/min]	Řezná rychlost v_c [m/min]	Posuv na zub f_z [mm/zub]	Hloubka řezu a_p [mm]
1.	FHS_D20_L35_R2	20,0	35,0	40,0	3	4775,0	300,0	0,650	0,3
2.	FM_D10_L22_R0	10,0	22,0	75,0	4	4615,0	145,0	0,050	0,1
3.	VT_D4_L35	4,0	35,0	80,0	2	7003,0	105,0	0,071	5,0
4.	FM_HRANA_D8_L0.7	8,0	14,0	33,0	4	1592,0	40,0	0,047	-

• Vrtání děr $\varnothing 4$ mm

Při prvním upnutí polotovaru směřovala již obrobená a zarovnaná plocha směrem do +Z. Tato plocha ve skutečnosti představuje spodní rovinnou plochu tvarového klínu. Na této ploše byla vykonána první výrobní operace, a tou bylo vyvrtání dvou otvorů pro válcové kolíky, které klín vymezují vůči upínacímu adaptéru. Byla použita operace Drilling s vrtacím cyklem stroje a vrtákem č. 3 o stejném průměru jako díra v klínu.



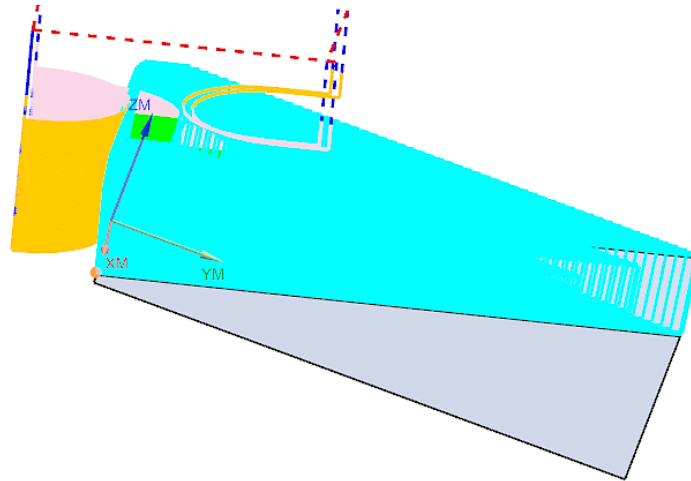
Obr. 80 Vrtání děr $\varnothing 4$ mm do spodní strany klínu

• Sražení hran

Pro lepší manipulaci s kolíky byly hrany obou otvorů sraženy o 0,5 mm pod úhlem 45° .

- **Hrubování šikmé plochy**

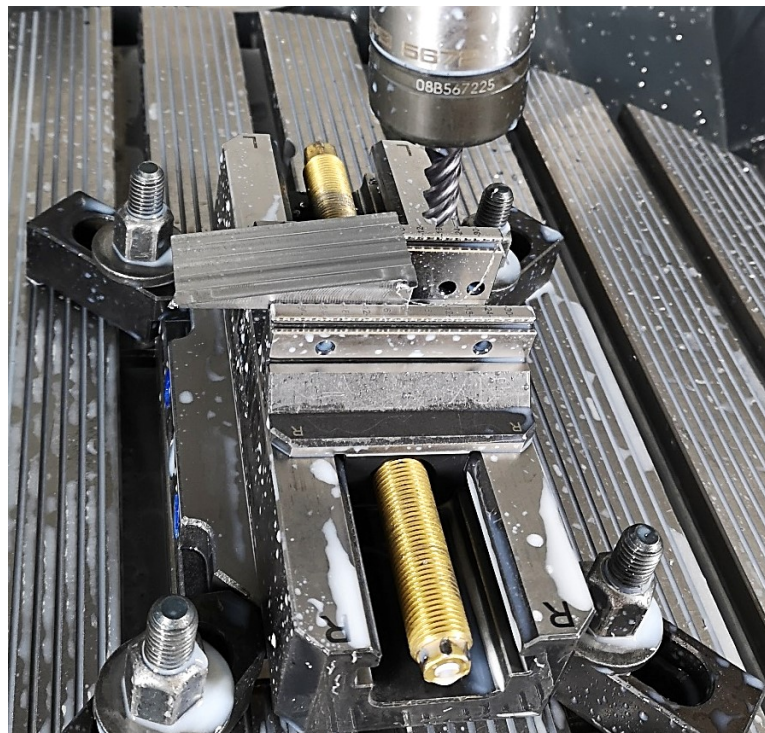
Na druhé upnutí byla odebrána většina materiálu z plochy pod daným úhlem. Toho bylo dosaženo hrubovací operací Cavity Mill pomocí nástroje č. 1. Osa nástroje byla nastavena tak, aby se stůl stroje přizpůsobil ploše s daným úhlem klínu.



Obr. 81 Hrubování šikmé plochy klínu

- **Dokončení šikmé plochy**

Předchozí operace zanechala přídavek na dokončení 0,1 mm, který byl odstraněn v posledním kroku výrobního postupu. Ten byl vytvořen příkazem Floor Facing without Wall s dokončovacím nástrojem č. 2, jenž konal pohyby po dráze metodou Zig.



Obr. 82 Dokončení funkční plochy klínu

Tab. 15 Použité operace při výrobě úhlových klinů

	Název operace	Příkaz	Nástroj
1.	Vrtání děr $\varnothing 4$ mm	Drilling	č. 3
2.	Sražení hran děr	Cuts 3D Modeled Chamfers	č. 4
3.	Hrubování šikmé plochy	Cavity Mill	č. 1
4.	Dokončení šikmé plochy	Floor Facing without Wall	č. 2

8.4 Zátěžový tlačný trn

Výchozím polotovarem pro výrobu tlačného trnu byla obdélníková tyč 20 x 10 mm o délce 115 mm, potřebná délka byla nakráčena na pásové pile. Tato tyč byla nalezena ve skladu materiálu výrobní laboratoře, přesná třída oceli není známa.

Tyč byla do čelistí svěráku upnuta nejprve na výšku spolu s dvěma podpěrnými kvádry materiálu, aby se zvýšila tuhost, stabilita upnutí a zamezilo se nežádoucím vibracím při řezném procesu. Nejprve byla vyrobena tvarová plocha trnu, až poté následovalo frézování upínací části. Tab. 16 zaznamenává použité nástroje při výrobě zátěžového trnu.

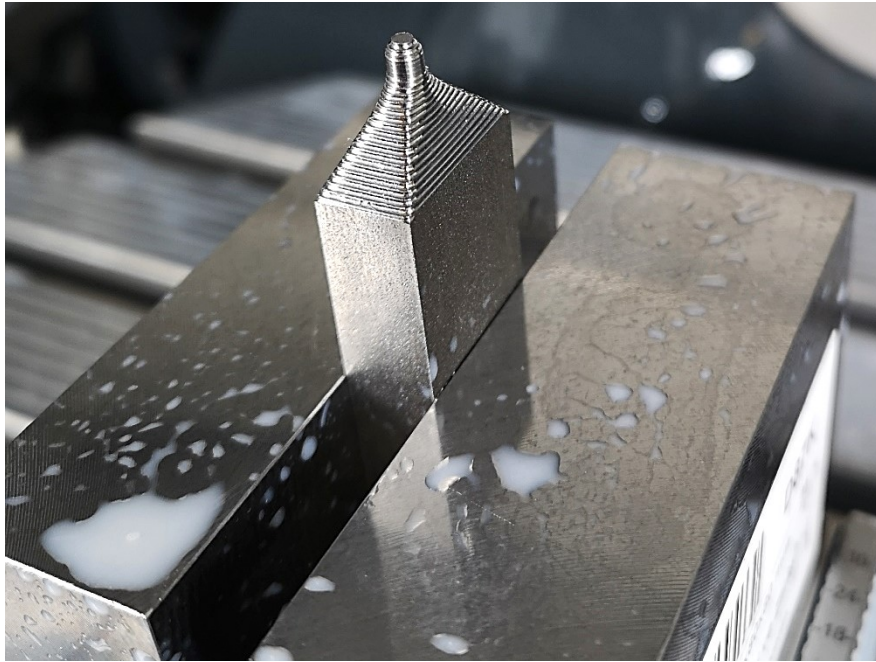
Vyráběný trn se od původního návrhu značně liší, což bude vysvětleno v další kapitole.

Tab. 16 Nástroje a jejich řezné podmínky použité při výrobě tlačného trnu

Číslo nástroje	Označení	Průměr [mm]	Délka řezné části [mm]	Délka [mm]	Počet břitů	Otáčky n [ot/min]	Řezná rychlost v_c [m/min]	Posuv na zub f_z [mm/zub]	Hloubka řezu a_p [mm]
1.	FM_D10_L22_R0	10,0	22,0	75,0	4	3820,0	120,0	0,050	0,3
2.	FD_D10_L40_R0.4	10,0	2,5	75,0	2	6525,0	205,0	0,065	0,5
3.	FM_D6_L12_R3	6,0	50,0	75,0	2	7958,0	150,0	0,024	0,1

- **Hrubování tvarové plochy**

Vyhrubování tvarové plochy, jejichž kulová část přichází do kontaktu s testovanou břitovou destičkou, proběhlo pomocí hrubovací operace Cavity Mill s nástrojem č. 2. Tato operace po sobě zanechala 0,2 mm přídavek na dokončení, který byl následně odstraněn.



Obr. 83 Výsledek po hrubovací operaci

- **Dokončení tvarové plochy**

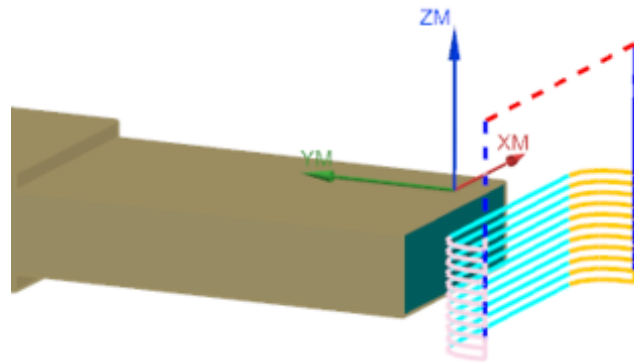
Dokončení tvaru se uskutečnilo za použití kulové frézy č. 3 s nastavenou hloubkou úběru 0,1 mm. Při tomto kroku bylo využito obráběcí operace Zlevel Profile Steep, která je určena k dokončování strmých ploch.



Obr. 84 Dokončení tvarové plochy kulovou frézou

- **Zarovnání čelní plochy**

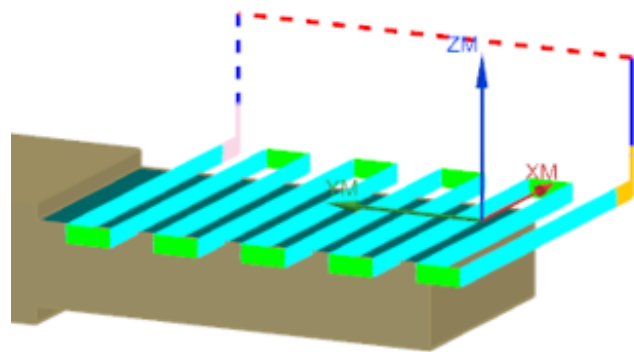
Na druhé upnutí trnu se nejprve zarovnálo druhé čelo, aby se odstranily stopy po řezu od pásové pily. Tato operace proběhla za použití nástroje č. 1 s hloubkou řezu po 1 mm.



Obr. 85 Srovnání druhého čela

- **Frézování vybraní pro uchycení**

Posledním krokem při výrobě tlačného trnu bylo vytvoření dvou plošek pro upnutí v čelistech zkušebního stroje. Nejprve byla ofrézována jedna strana a pro přepnutí obrobku byl stejný program spuštěn znovu. Pro tuto operaci byl vybrán nástroj č. 1.



Obr. 86 Frézování upínacích ploch

Tab. 17 Sled výrobních operací tlačného trnu

	Název operace	Příkaz	Nástroj
1.	Hrubování tvarové plochy	Cavity Mill	č. 2
2.	Dokončení tvarové plochy	Zlevel Profile Steep	č. 3
3.	Zarovnání čelní plochy	Zlevel Profile Steep	č. 1
4.	Frézování ploch pro upnutí	Floor Facing without Wall	č. 1

8.5 Sestavení vyrobeného přípravku

Když byly vyrobeny jednotlivé díly přípravku, tak mohly být složeny a přišroubovány k sobě do celkové sestavy. Před samotným složením bylo zapotřebí některé hrany dílů ještě ručně srazit pilníkem a smirkovým papírem, aby nedošlo k poranění od vzniklých otřepů při obrábění a také, aby díly vzájemně lícovaly.



Obr. 87 Sestavený upínací přípravek bez klínu

Dále následovalo přidání úhlových klínů a záměna přitlačných šroubů za kratší.



Obr. 88 Sestavený upínací přípravek s 5° klínem



Obr. 89 Sestavený upínací přípravek s 10° klínem



Obr. 90 Sestavený upínací přípravek s 15° klínem

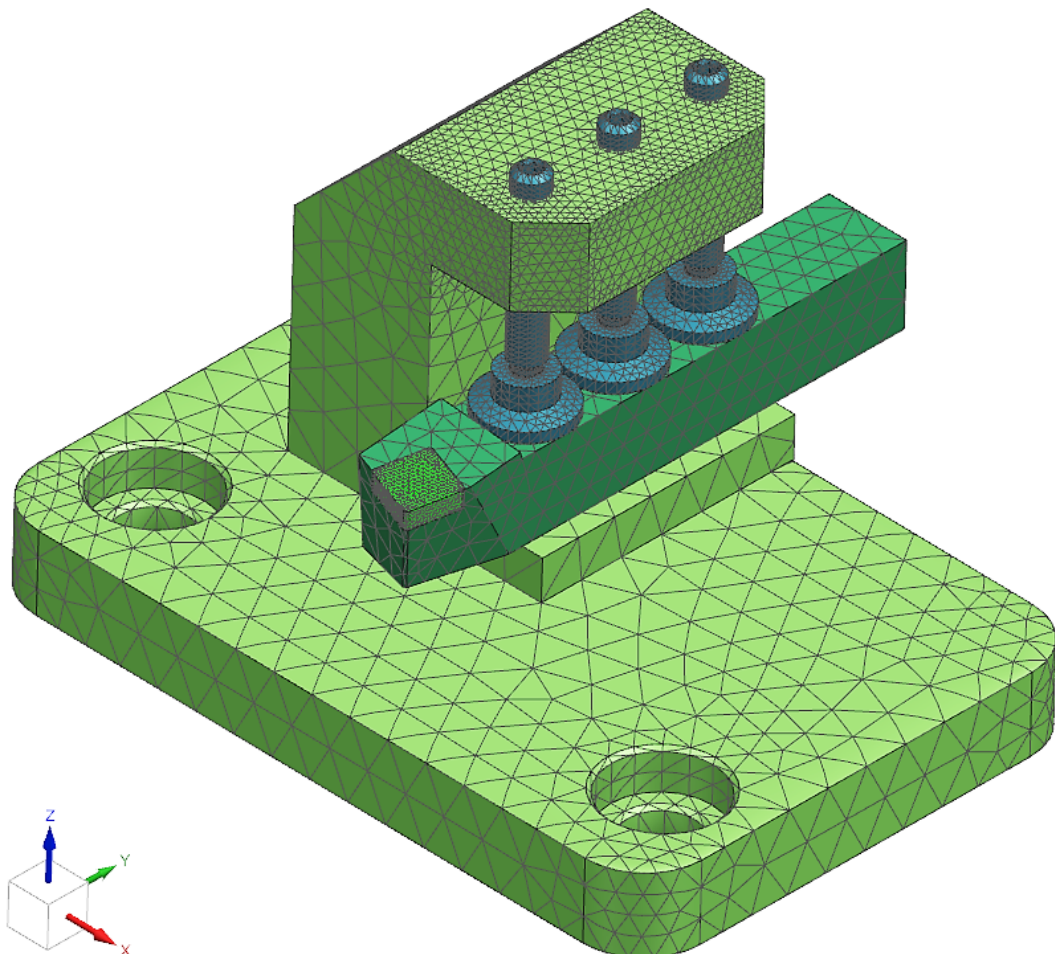
9 POPIS CHOVÁNÍ UPÍNACÍHO PŘÍPRAVKU

Pro určení a popis chování navrženého upínacího přípravku bylo uskutečněno několik simulovaných i reálných testů. První test byl proveden pomocí FEM analýzy. Další dva testy proběhly přímo na zkušebním stroji ve výrobní laboratoři.

9.1 FEM simulace

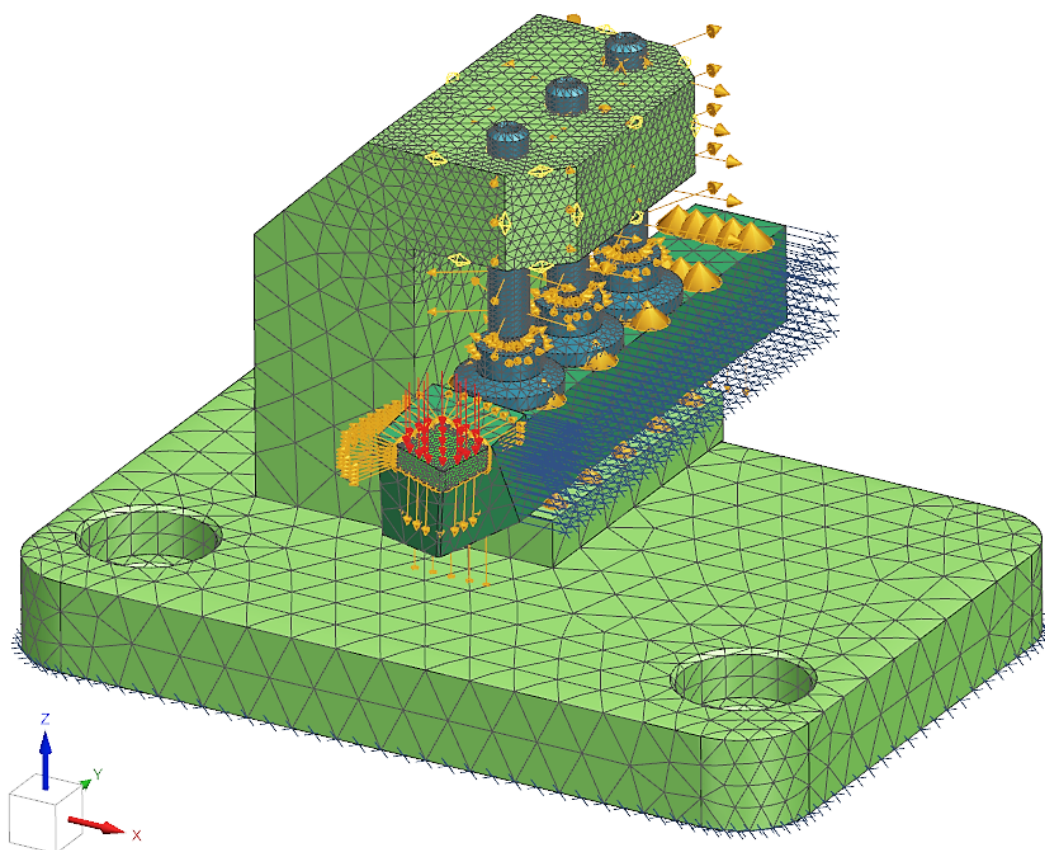
Aby se zjistil pevnostní stav celé sestavy pod zatěžující silou, byl k tomu využit software NX 12 s řešičem Nastran. Pro pevnostní analýzu byla sestava zjednodušena a některé prvky se spojily do jednoho celku. Konkrétně základová deska s upínacím adaptérem byla vymodelována jako jeden kus. Poté už byly všechny ostatní díly vloženy do jedné sestavy.

Každému dílu se přiřadil materiál a poté byly jednotlivé díly vysítovány pomocí 3D Tetrahedronů. Velikost síťovacích prvků byla zvolena automaticky, jen v místech namáhání (břitová destička, a horní část adaptéru) byla síť zjemněna. Také na samotných šroubech s kulovým čepem a přítlačných podložkách byla zvolena jemnější síť.



Obr. 91 Vysítovaná zjednodušená sestava upínacího přípravku

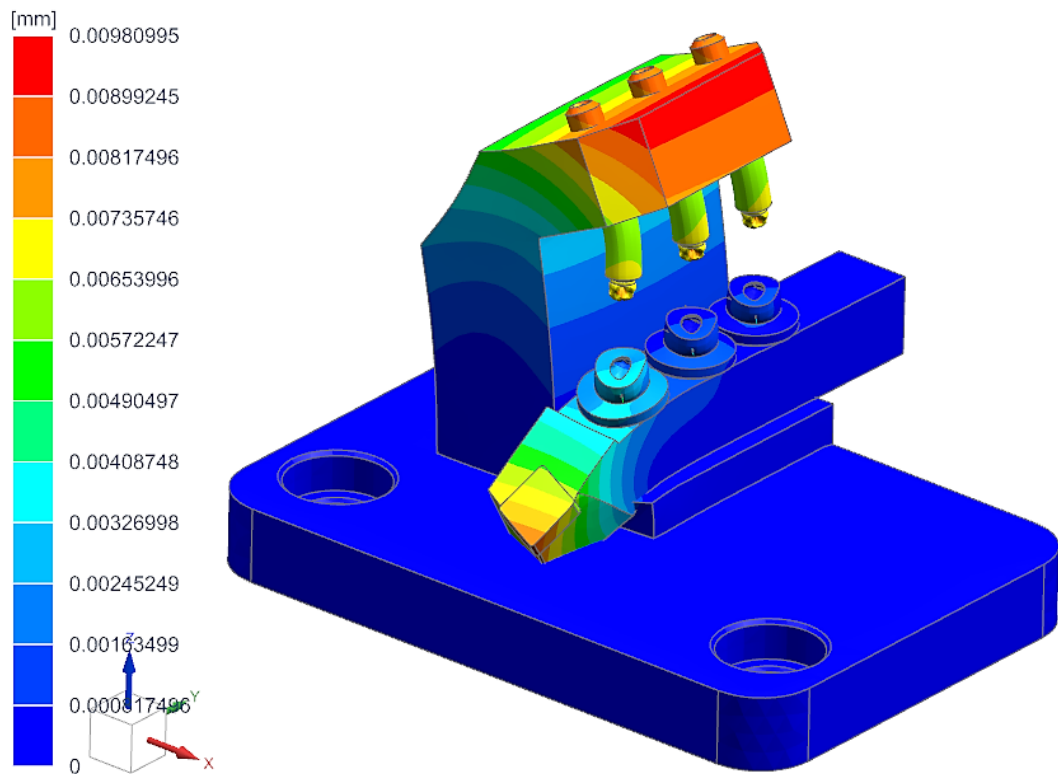
Když byla sestava vysíťována, mohly být přidány omezující podmínky a zatěžující síla $F=1000\text{ N}$ na horní plochu destičky. První omezující vazbou bylo fixní uložení na spodní ploše desky s adaptérem. Druhou vazbou byla jednoduchá podpěra na boku soustružnického nože, která zamezila pohybu v ose X. Taktéž byly nastaveny jednotlivé interakce u součástí, které jsou spolu v kontaktu. Břitová destička byla napevno „přilepena“ k noži. Mezi nožem a tělem přípravku byl nastaven vzájemný kontakt. Taktéž všechny přítlačné podložky byly nastaveny do kontaktu s horní plochou nože. Dosedací kulové plochy podložek a šroubů byly také ve vzájemném kontaktu. Šrouby pak byly „přilepeny“ do válcových otvorů v adaptéru. Všechny omezení, zatížení a vzájemné interakce jsou znázorněny na *Obr. 92*.



Obr. 92 Nastavení podmínek sestavy pro simulaci

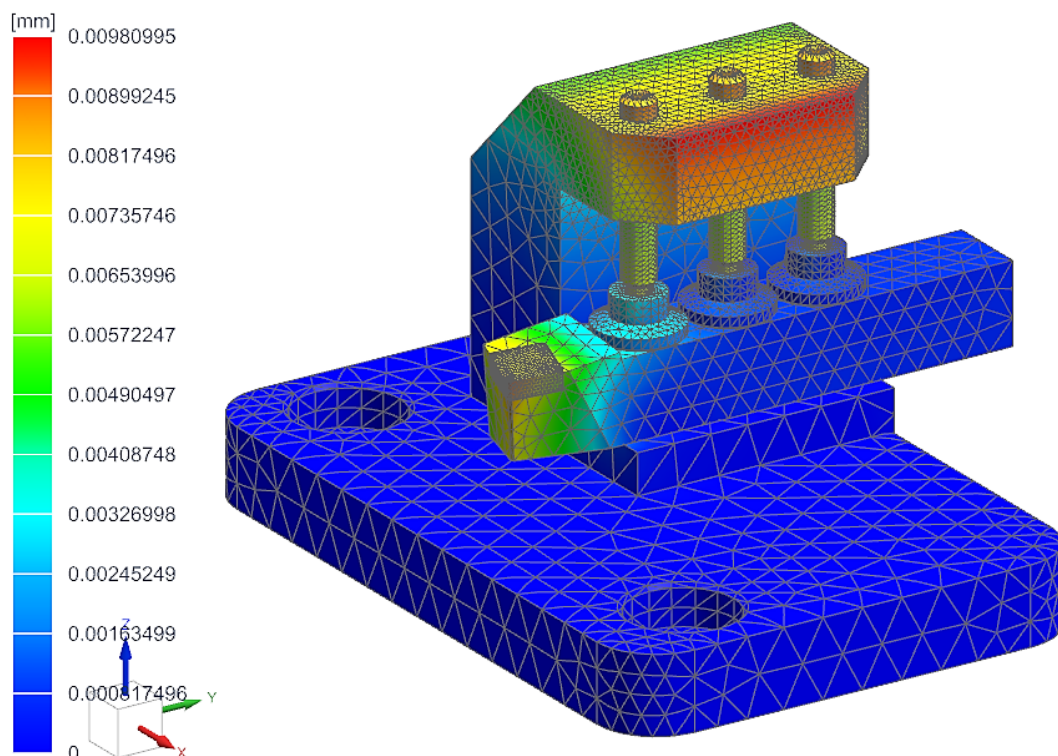
Po nastavení potřebných podmínek v sestavě byl spuštěn výpočet analýzy. Když byl dokončen výpočet, mohly být zobrazeny jednotlivé výsledky simulace.

Pro kontrolu a ověření správného nastavení všech okrajových podmínek analýzy bylo nejprve zvoleno vykreslení deformací o velikosti 10 % z celkového rozměru sestavy. Toto vykreslení deformací bylo vybráno, aby se zjistilo chování sestavy přípravku pod působícím silovým zatížením.



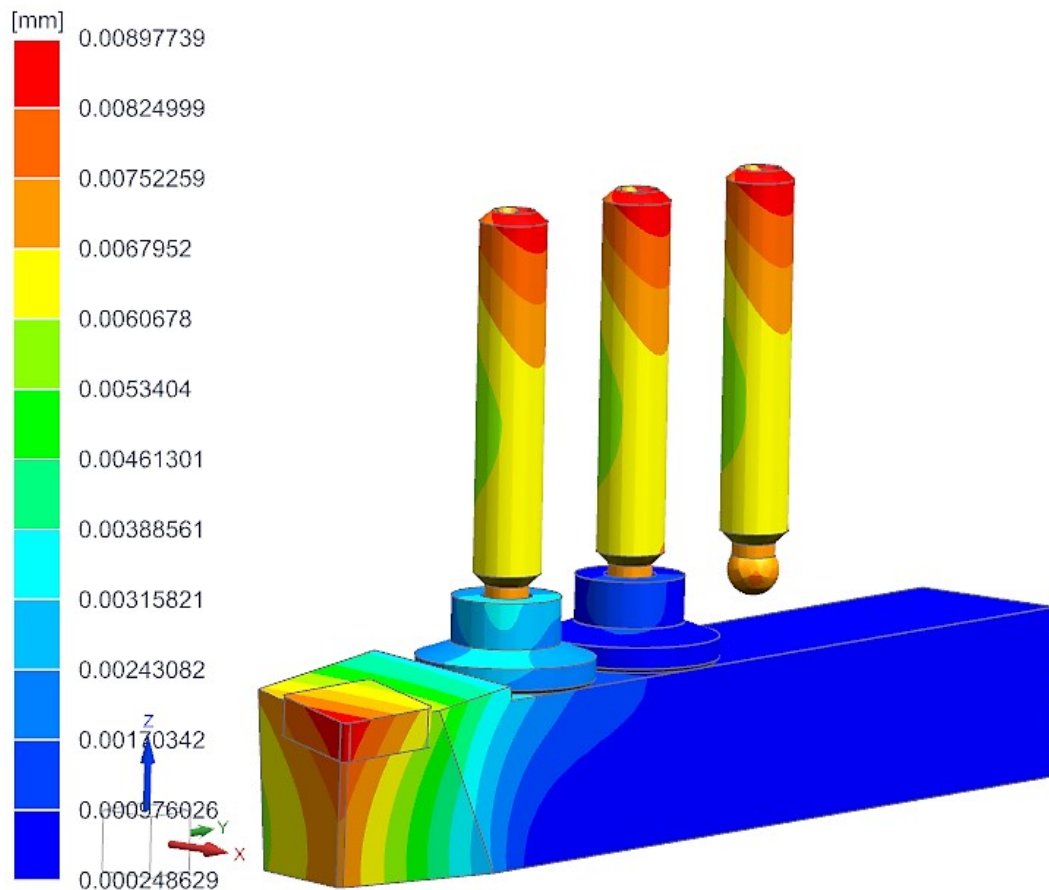
Obr. 93 Zobrazení celkového deformačního posunutí v měřítku 10 %

Na následujícím obrázku je barevně znázorněna skutečná deformace v měřítku 1:1. K maximálnímu posunutí dochází na horní hraně adaptéru, a to o 0,00981 mm.



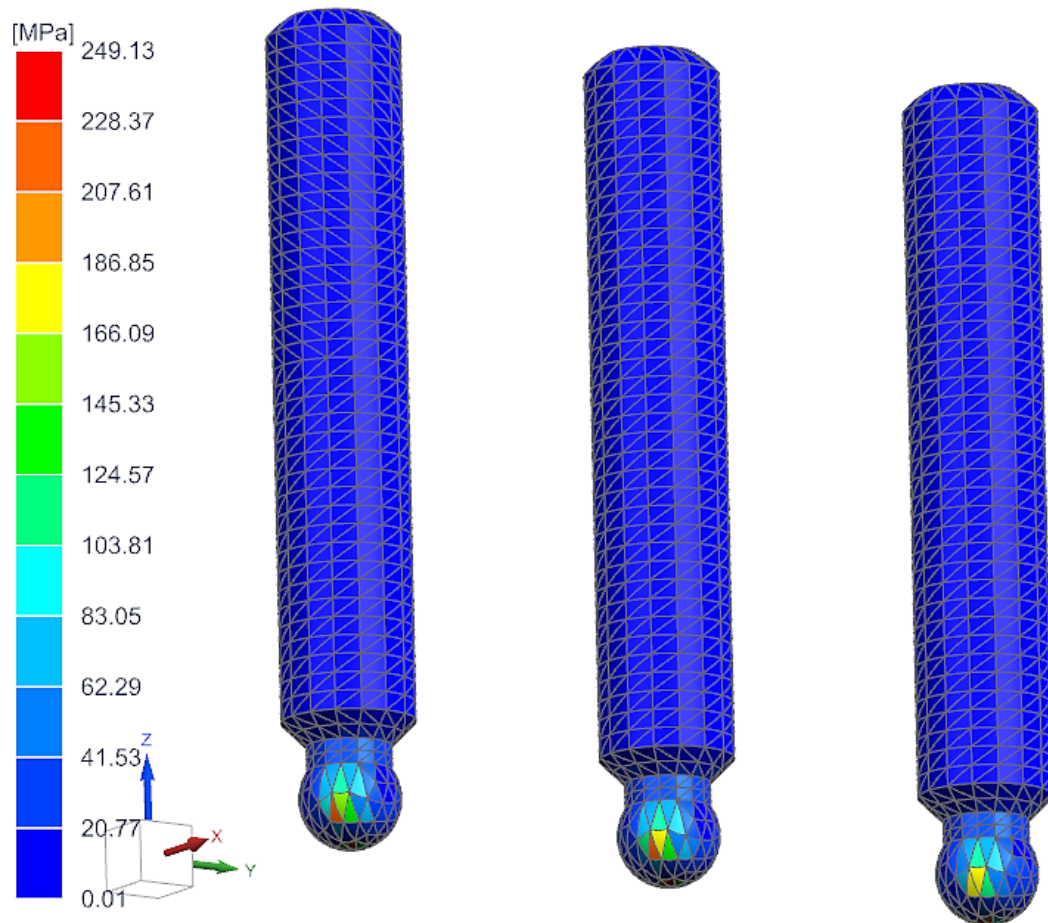
Obr. 94 Zobrazení deformačního posunutí v měřítku 1:1

Pro přehlednější vykreslení výsledků bylo potlačeno tělo přípravku a byl ponechán jen soustružnický nůž s přítláčnými šrouby a podložkami. Při tomto zobrazení vyšlo maximální deformační posunutí na 0,00898 mm.



Obr. 95 Deformace na soustružnickém noži a šroubech v měřítku 1:1

Dalším výsledkem je nárůstu napětí, které je vyvolané zatěžující silou, k největšímu nárůstu dochází na styčných kulových plochách šroubů a podložek. Konkrétně na kulovém čepu šroubu je hodnota napětí identifikována na 223,3 MPa.

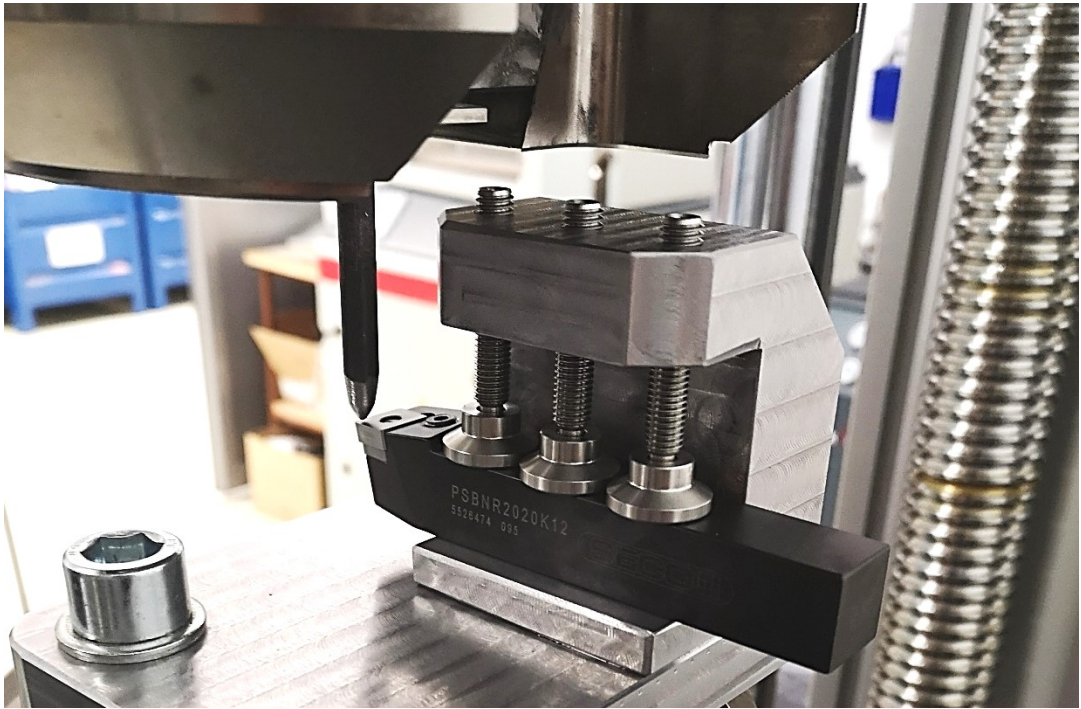


Obr. 96 Napěťové pole na kulové čepu přitlačného šroubu

9.2 Zkušební test pod statickým zatížením

Jakmile byly vyrobeny všechny díly přípravku, které se následně složily do celkové sestavy, tak se přistoupilo k prvnímu zátěžovému testu. Při tomto experimentálním testu byl použit zkušební trn, který byl vybroušen na ruční brusce z kulatiny neznámé třídy oceli o průměru $\varnothing = 8$ mm.

Poté, co byl soustružnický nůž umístěn a zajištěn ve správné poloze v upínacím adaptéru přípravku vůči zkušebnímu trnu (Obr. 97), mohlo být spuštěno postupné zatěžování. Při tomto zatěžování se s narůstající silou bohužel zvětšovala i deformace na vybroušené špičce trnu. Špička se částečně vtlačila do objemu trnu. Když deformace dosáhla hodnotu posunutí špičky o 2,3 mm, tak došlo k vychýlení osy trnu a sklouznutí po ploše zatěžované břitové destičky. Před tím, než se tak stalo bylo dosaženo maximálního vyvinutého zatížení $F = 10\,400$ N, poté byl test přerušen.



Obr. 97 Uspořádání přípravku a trnu při experimentálním statickém testu

Poškození zkušebního trnu bylo nevratné. Jako doplňující informace byla vypočtena kritická síla vzpěrné únosnosti použitého trnu.

$$J = \frac{\pi \cdot d^4}{64} = \frac{\pi \cdot 8^4}{64} = 201,1 \text{ mm}^4 \quad (8)$$

- kde:
- J – kvadratický moment průřezu [mm^4]
- π – Ludolfovo číslo [-]
- d – průměr zkušebního trnu [mm]

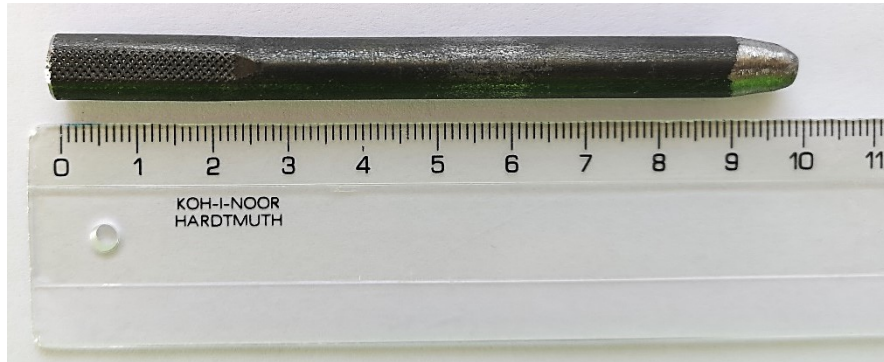
Dle typu uložení byl použit příslušný vzorec pro výpočet kritické síly.

$$F_{kr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J}{4 \cdot l^2} = \frac{\pi^2 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 201,1}{4 \cdot 100^2} = 10\,420,1 \text{ N} \quad (9)$$

- kde:
- F_{kr} – kritická síla [N]
- π – Ludolfovo číslo [-]
- E – modul pružnosti v tahu [MPa]

- J – kvadratický moment průřezu [mm^4]
- l – délka zkušebního trnu [mm]

Po určení kritické síly bylo zjištěno, že při experimentálním testu se dosažená zátěžová síla přiblížila vypočtené hodnotě kritické síly. Toto zjištění spolu se značnou deformací špičky trnu ale i faktem, že plocha břitové destičky je hladká, vedlo ke sklouznutí a selhání trnu.



Obr. 98 Zkušební trn po statickém zátěžovém testu

Proto bylo opuštěno od původního návrhu výroby tlačného trnu s kruhovým průřezem o průměru $\varnothing = 10$ mm z oceli 19 421 a snahou bylo najít vhodný polotovar s větším kvadratickým momentem průřezu. Zvětšením průřezu se dosáhlo větší tuhosti a stability, a také možnosti lepšího upnutí v čelistech zkušebního stroje. V materiálovém skladu výrobní laboratoře byla nalezena obdélníková tyč 20 x 10 mm, u které byla také vypočítána kritická síla při vzpěru. Požadovanou mezní hodnotou pro použití tyče bylo 80 000 N, což také podle vztahu (11) bylo splněno a tato tyč mohla být použita pro výrobu tlačného trnu.

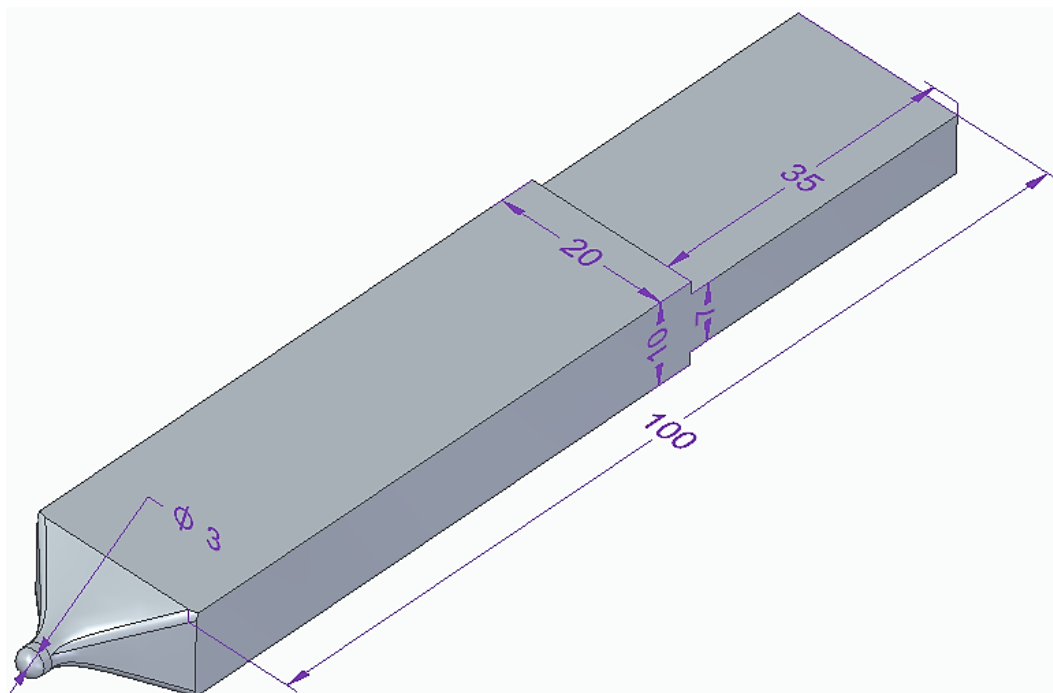
$$J_x = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{20 \cdot 10^3}{12} = 1666,67 \text{ mm}^4 \quad (10)$$

kde:

- J_x – kvadratický moment průřezu k ose x [mm^4]
- b – šířka obdélníkové tyče [mm]
- h - výška obdélníkové tyče [mm]

$$F_{kr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_x}{4 \cdot l^2} = \frac{\pi^2 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 1666,67}{4 \cdot 100^2} = 86\,359,2 \text{ N} \quad (11)$$

Samotný tlačný trn byl před výrobou přemodelován a upraven podle dostupného polotovaru. 3D model finální podoby trnu je možné vidět na *Obr. 99*.

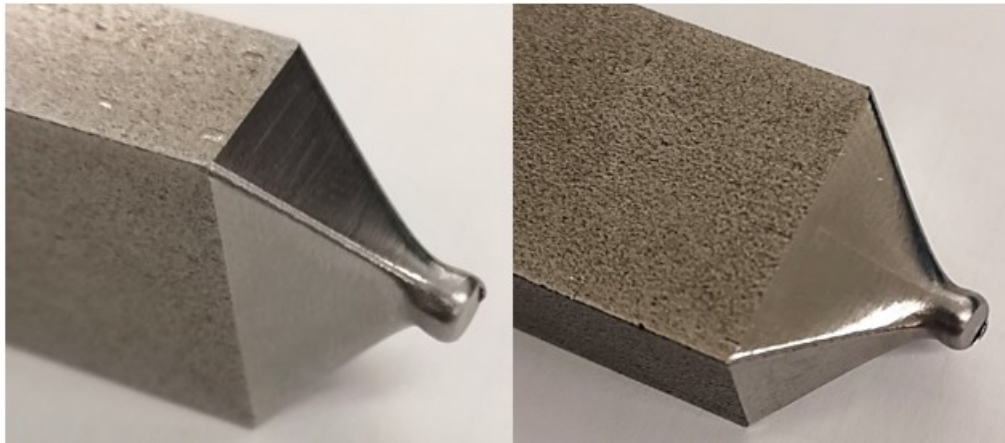


Obr. 99 3D model finální verze tlačného trnu

9.3 Zkušební test pod cyklickým zatížením

Když byl upínací přípravek otestován statickým zatížením a přepracovaná druhá verze tlačného trnu byla vyrobena, mohlo být přistoupeno k cyklickému testu. Zkušební stroj byl upraven tak, že byly odmontovány vymešovací vložky, které neumožňovaly pohyb pružin při statické zkoušce. Dále také byly povoleny dosedací šrouby podstavy stroje, aby nedocházelo k přenosu vibrací a chvění stroje do podlahy laboratoře. Podstava stroje tímto opatřením nebyla pevně ukotvena vůči podloze, ale byl jí umožněn pohyb na dosedacích pružinách.

Při manipulaci a nastavování správné polohy tlačného trnu proti břitové destičce upevněné v nožovém držáku došlo nedopatřením k provedení „tlačné statické zkoušky“ tím, že tlačný trn naboural do horní plochy destičky. Kontaktní kulová plocha se plasticky zdeformovala a tento trn nebylo možné dále testovat. Před odjetím horní čelisti stroje a odlehčení trnu byla zaznamenána hodnota tlačné síly přibližně 6000 N. Samotný trn po podrobnějším prozkoumání nejevil známky dalších deformací (vzpěr, otlacení upínacích ploch), pouze již zmíněnou zdeformovanou kontaktní kulovou plochu.



Obr. 100 Zdeformovaný tlačný trn

Naštěstí byl dle dříve zadaného požadavku a vytvořeného výkresu dodán na poslední chvíli trn z nástrojové oceli 19 421. Daný trn byl umístěn na svou pozici a sevřen v čelistech.



Obr. 101 Upínací přípravek s tlačným trnem při cyklickém testu

Před spuštěním cyklování byly nastaveny vybrané parametry testu. Maximální zatěžovací síla byla nastavena na -1000 N a minimální hodnota byla -500 N s frekvencí přibližující se 50 Hz. Testování bylo manuálně přerušeno, kdy proběhlo více než 55 000 cyklů.

Získané výstupní informace z cyklického testu jsou v práci uvedeny jako přílohy. Prvním výstupem je přiblížený průběh zatěžující síly z posledního úseku testu. Příloha P II ukazuje křivky síly se sinusovým průběhem. A poslední příloha zaznamenává pojezd horní čelisti.

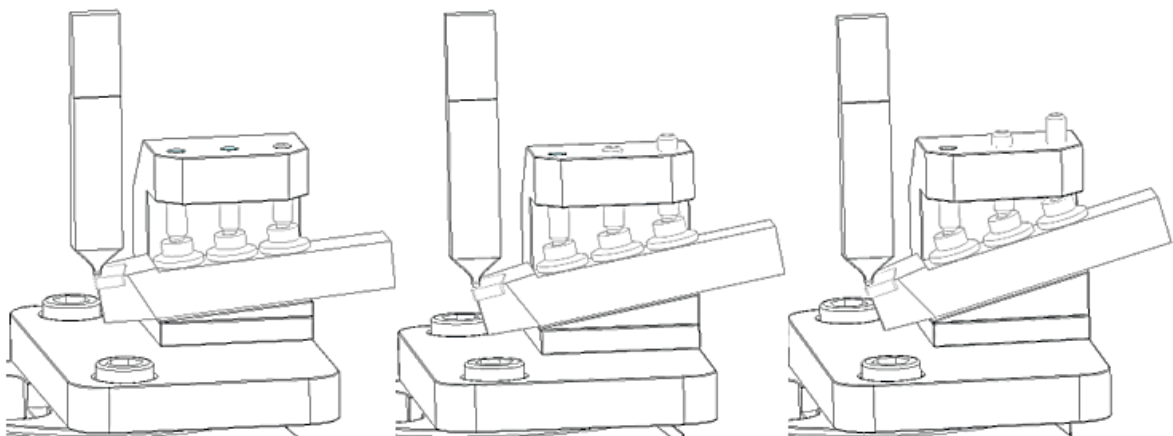
Po ukončení testu byl přípravek i s trnem prohlédnut. Žádné patrné poškození na přípravku ani na břitové destičce nebylo objeveno. Pouze kontaktní plocha tlačného trnu byla slabě zdeformována.

9.4 Diskuze chování upínacího přípravku

Při tvorbě upínacího přípravku byly zkonstruovány dva návrhy, ze kterých byla vybrána první varianta, tedy ta, s úhlovými klíny a přítlačnými výkyvnými podložkami. První návrh byl vybrán hlavně z důvodu univerzálnosti upnutí více typů soustružnických nožových držáků a možnosti libovolného polohování v upínacím adaptéru.

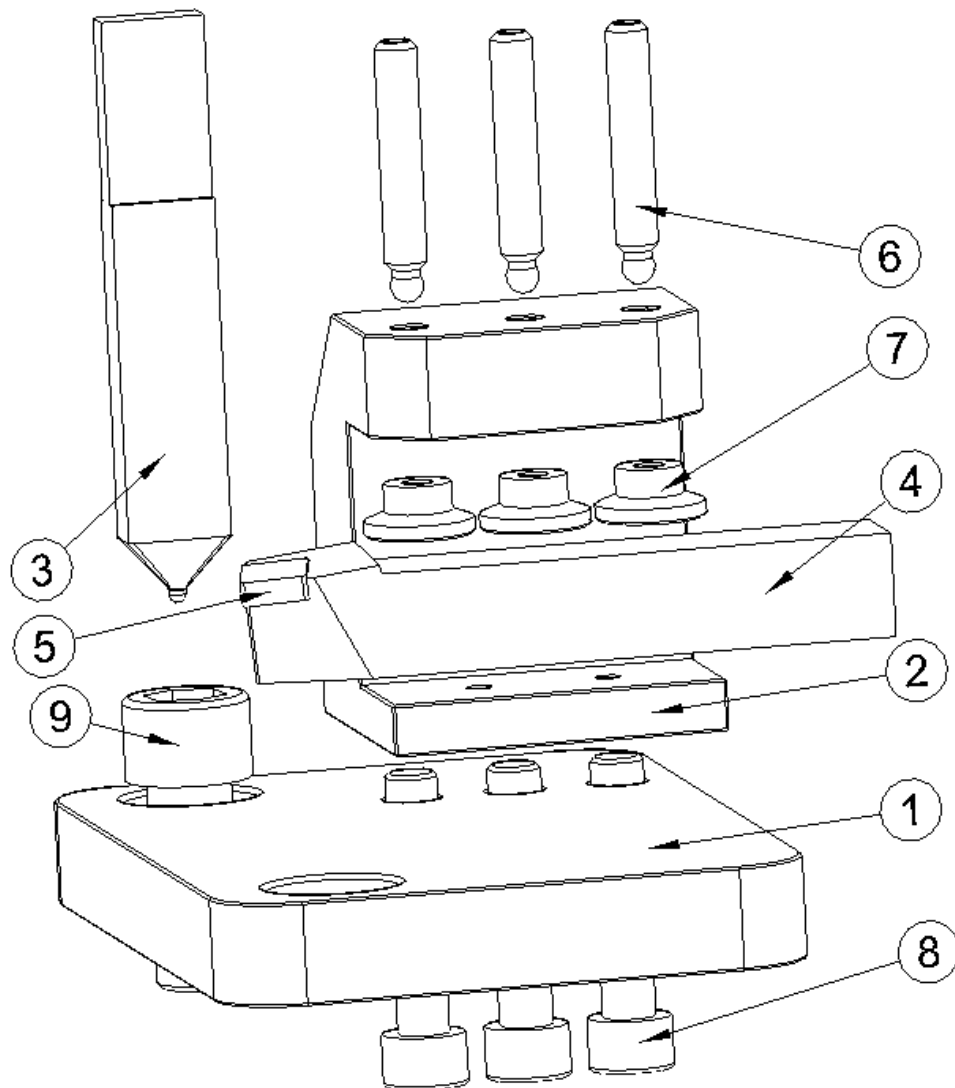
Poté, co byly dodány potřebné polotovary na výrobu jednotlivých prvků přípravku, mohl být zahájen samotný výrobní proces. Polotovary byly nejprve zbaveny okujené povrchové vrstvy a srovnány pro lepší manipulaci. Pak následovalo vytvoření obráběcího programu pomocí CAD softwaru. U každého dílu byl podrobně popsán výrobní postup s použitými nástroji a jejich řeznými podmínkami.

Následně byly vyrobené díly složeny do kompletní sestavy, která se otestovala zátěžovými zkouškami. Zátěžové zkoušky proběhly se třemi verzemi tlačných trnů. Během samotných testů bylo prokázáno, že upínací přípravek je funkční, stabilní a nepodléhá deformačním účinkům, tento fakt je doplněn i výsledky z FEM simulace. Jediným místem se sklonem k deformačnímu posunutí se při testování jeví tlačný trn. Tento trn, přenášející silové tlakové zatížení, by bylo vhodné vylepšit tepelným zpracováním, nebo jak bylo navrženo, vyrobit jej ze slinutého karbidu.



Obr. 102 Upínací přípravek s klímem 5 °, 10 °, 15 °

Na *Obr. 103* je zobrazen pohled na rozloženou sestavu upínacího přípravku pro cyklické zatěžování obráběcích nástrojů.



Obr. 103 Rozložená sestava upínacího přípravku (1-základová deska, 2-upínací adaptér, 3-tlačný trn, 4-soustružnický nůž, 5-břitová destička, 6-šroub s kulovým čepem, 7-přítlačná podložka, 8-imbusový šroub M10x40, 9-imbusový šroub M16x40)

ZÁVĚR

V teoretickém rozboru byl popsán obráběcí proces spojený s dalšími jeho náležitostmi, jako jsou vznikající řezné síly, řezivost nástroje nebo obrobiteľnosť materiálu. Další kapitola se zabývá přehledem materiálů používaných při výrobě obráběcích nástrojů. Na ni navazuje část věnující se technologii povlakování řezných nástrojů spolu se způsoby hodnocení vytvořených tenkých vrstev. Zkoumání vlastností povlaků je zásadní z pohledu oblasti optimálního použití daného druhu povlaku pro vybranou obráběcí operaci, s tím je spojena i jeho životnost a ekonomické zhodnocení ve výrobním sektoru. Ovšem konvenčně používané metody testování a jejich výstupy se někdy jeví jako nedostačující, proto byly vyvinuty cyklické rázové testy, které jsou popsány v poslední kapitole teoretické části. Tato kapitola také poskytuje prvotní informace pro konstrukční návrh upínacího přípravku, který je dále rozebrán v praktické části práce.

Konstrukční návrh přípravku se odvíjel od čelistí zkušebního stroje, pro které měl být přímo použit. Pro experiment byl vybrán soustružnický nůž PSBNR2020K12 s příslušnými vyměnitelnými břitovými destičkami ze slinutého karbidu s CVD povlakem. Při vytváření a modelování přípravku se pracovalo se staženým 3D modelem nástroje. Nosným prvkem samotného návrhu je základová deska připevněná k čelní ploše spodní čelisti zkušebního stroje. Na této desce je přišroubován upínací adaptér, který vymezuje polohu obráběcího nástroje. Ze dvou návrhů přípravku byla po jejich srovnání vybrána první verze, která putovala do výrobního procesu. Výrobní postup jednotlivých dílů je popsán a shrnut v příslušných kapitolách 8.1 až 8.4. Při výrobě byl brán zřetel na bezpečnost přítomných osob v laboratoři a nezpůsobení škody na CNC frézce spolu s jejími obráběcími nástroji.

Po vyrobení a dodání všech potřebných dílů upínacího přípravku, následovala jejich kompletace do sestavy. Složená sestava přípravku podstoupila zátěžové testy se třemi verzemi tlačných trnů. Přípravek se jeví jako spolehlivý a nepodléhá deformačním účinkům od přenášeného tlačného zatížení. Jediným deformovaným prvkem byl zátěžový tlačný trn. Proto by bylo vhodné tento trn vylepšit a navrhnout znova. Například lépe propracovat upínací plochy a co nejvíce je maximalizovat do celé šířky čelistí. Také by bylo vhodné použít kvalitnější nástrojovou ocel (např. rychlořeznou ocel třídy 19 861) a kontaktní polokulovou plošku indentoru termálně zakalit, nebo přímo celý tlačný trn vyrobit ze slinutého karbidu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOCMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. ISBN 9788072047222.
- [2] HUMÁR, Anton, 2003. *Technologie obrábění - 1. část: Studijní opory pro magisterskou formu studia* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně – Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-1cast.pdf. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE.
- [3] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA, 2006. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN ISBN 80-214-2374-9.
- [4] ČSN ISO 3002-1, 1993. *Rezné nástroje. Základné veličiny pri rezaní a brúsení: Časť 1: Geometria aktívnej časti rezných nástrojov. Základné termíny, súradnicové sústavy, nástroje a pracovné úhly, lamače triesky*.
- [5] ČEP, Robert a Jana PETRŮ, 2013. *Úvod do teorie obrábění: 4 Opotřebení řezných nástrojů* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, s. 1-29 [cit. 2021-04-05]. ISBN 978-80-248-3013-1. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_002/%C3%A9vod%20do%20teorie%20obr%C3%A1b%C4%Bn%C3%AD/02%20Text%20pro%20e-learning/%C3%A9vod%20do%20teorie%20obrabeni%2004%20Opot%C5%99eben%C3%AD%20%C5%99ezn%C3%BDch%20n%C3%A1stroj%C5%AF.pdf
- [6] PETŘÍK, Jan, 2015. *Obrobitelnost a vlastnosti obráběných materiálů. MM Průmyslové spektrum: Pohony ve strojírenství – převody, ložiska a spojky. Čerpadla a kompresory*. [online]. 24. 06. 2015, (7, 8) [cit. 2021-04-05]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/obrobitelnost-a-vlastnosti-obrabenych-materialu>
- [7] Technické informace: *Typy nožů pro soustružení. MARKAGRO s.r.o.: OBRÁBĚCÍ NOŽE, PARAMETRY OBRÁBĚNÍ, SLINUTÉ KARBIDY (DRUHY A POUŽITÍ)* [online]. [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <http://www.markagro.cz/cs/technicke-informace/56-soustruzeni/173-obrabeci-noze-parametry-obrabeni-slinute-karbidy-druhy-a-pouziti.html>

- [8] KOČMAN, Karel. *Speciální technologie: obrábění*. 3., přeprac. a dopl. vyd. Brno: CERM, 2004, 227 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 8021425628.
- [9] Cutting tool materials. *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>
- [10] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing, 2008, 235 s. ISBN 9788025422502
- [11] HOFMANN, P. Obrábění zasucha – ano, či ne? (2. část). *MM – Průmyslové spektrum*. 2/2001. s. 8-10. ISSN 1212-2572.
- [12] HUMÁR, Anton. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. Brno: CCB, s.r.o. Brno, 1995. 265 s. ISBN 80-85825-10-4.
- [13] ČSN ISO 513, 2015. *Klasifikace a použití tvrdých řezných materiálů k obrábění kovů s určenou řeznou hranou: Označování skupin a podskupin použití*.
- [14] *ALL ABOUT CEMENTED CARBIDE: How is it made* [online]. [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <http://www.allaboutcementedcarbide.com/how-is-it-made/>
- [15] GRÝČ, Jan, 2016. Nová generace povlakovaných cermetů. *MM Průmyslové spektrum: Servis a údržba výrobních provozů. Zabezpečení jakosti výroby. Maziva, technické oleje a řezné kapaliny*. [online]. 13. 04. 2016, (4) [cit. 2021-04-05]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nova-generace-povlakovanych-cermetu>
- [16] ČEP, Robert a Jana PETRŮ, 2013. *Technologie obrábění v příkladech: 1 Materiály řezných nástrojů* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, s. 1-113 [cit. 2021-04-05]. ISBN 978-80-248-3014-8. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_003/Technologie%20obrabeni%20v%20p%C5%99%C3%ADkladech.pdf
- [17] KRŽIŽ, Antonín, 2006. *Tenké vrstvy* [online]. Západočeská univerzita v Plzni, ATeam – materiálový výzkum. [cit. 2021-04-05]. Dostupný z: https://www.opi.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf
- [18] SOSNOVÁ, Martina a Antonín KRŽIŽ, 2006. *Kluzné vrstvy a metody hodnocení adhezivně-kohezivního a tribologického chování* [online]. Plzeň. Dostupné také z:

- https://www.opi.zcu.cz/FRVS_zprava_dalsi_studium_sosnova.pdf. Výzkumná práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní.
- [19] PODANÝ, Pavel a Antonín KRÍŽ, 2006. *Předdepoziční procesy při výrobě tenkých vrstev* [online]. Plzeň: Západočeská Univerzita v Plzni, Katedra materiálu a strojírenské technologie, 1-7 [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/podany_metal06.pdf
- [20] BOBZIN, Kirsten, 2017. High-performance coatings for cutting tools. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. Elsevier, (18), 1-9. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.11.004>
- [21] NOVÁK, Zdeněk, 2004. Výběr nových řezných nástrojů. *MM Průmyslové spektrum: Technologie, stroje a řezné nástroje v třískovém obrábění* [online]. 15. 12. 2004, (12) [cit. 2021-04-06]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyber-novych-reznych-nastroju>
- [22] RAMESH, K., Serdar OZBAYRAKTAR a Habib SARIDIKMEN, 2012. Aero-lap polishing of poly crystalline diamond inserts using Multicon media. *Journal of Manufacturing Processes*. Elsevier, (14), 167-173. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2011.12.003>
- [23] ŠÍMA, Michal a Roman JANKŮ, 2007. Mechanická úprava monolitních nástrojů před PVD povlaky. *MM Průmyslové spektrum: Řezné nástroje v třískovém obrábění* [online]. 25. 04. 2007, (4) [cit. 2021-04-06]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/mechanicka-uprava-monolitnich-nastroju-pred-pvd-povlaky>
- [24] BAPTISTA, Andresa et al., 2018. Sputtering Physical Vapour Deposition (PVD) Coatings: A Critical Review on Process Improvement and Market Trend Demands. *MDPI: Coatings*. (8, 402). Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.3390/coatings8110402>
- [25] ZINDULKA, Ondřej a Vjačeslav SOCHORA, 2016. PVD povlak CrNx – když tloušťka není na závadu. *MM Průmyslové spektrum: 1. veletržní vydání* [online]. (9) [cit. 2021-04-06]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/pvd-povlak-crnx-kdyz-tloustka-neni-na-zavadu>

- [26] BENELMEKKI, Maria a Andreas ERBE, 2019. Chapter 1 - Nanostructured thin films–background, preparation and relation to the technological revolution of the 21st century. *Frontiers of Nanoscience*. Elsevier, (14), 1-34. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102572-7.00001-5>
- [27] ŠÍMA, Michal et al., 2004. Měření vlastností povlaků na nástrojích. *MM Průmyslové spektrum: Měření ve strojírenství, Řízení jakosti a TQM* [online]. (6) [cit. 2021-04-06]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/mereni-vlastnosti-povlaku-na-nastrojich>
- [28] Anton Paar: *Coating thickness measurement: Calotest series* [online]. [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://www.anton-paar.com/corp-en/products/details/calotest/>
- [29] HOLUBÁŘ, P., ZINDULKA, O., JÍLEK, M. *Měření vlastností povlaků na nástrojích. MM Průmyslové spektrum*. Duben 2010, s. 36. ISSN 1212-2572.
- [30] HOUDEK, Josef a Karel KOUŘIL, 2004. Odolnost slinutých karbidů proti teplotním a mechanickým rázům. *MM Průmyslové spektrum: Řezné nástroje v kovoobrábění a dřevoobrábění* [online]. 14. 04. 2004, (4) [cit. 2021-04-06]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/odolnost-slinutych-karbidu-proti-teplotnim-a-mechanickym-razum>
- [31] CEP, Robert et al., 2009. *Influence of Thermal and Mechanical Shocks to Cutting Edge Tool Life* [online]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 1-4 [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.193.4737&rep=rep1&type=pdf>
- [32] E. DOWLING, Norman, c2013. *Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*. 4rd ed. England: Pearson Education Limited. ISBN 978-0-13-139506-0.
- [33] *Porušování při cyklickém zatěžování: Konstruování strojů – strojní součásti* [online]. Brno [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: http://www.fsiforum.cz/upload/soubory/database-predmetu/5KS/_prednasky/prednaska2.pdf. Přednáška. Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně.
- [34] LAUSCHMANN, Hynek, 2007. *Mezní stavy I: Únava materiálu*. Praha: Nakladatelství ČVUT. ISBN 978-80-01-03671-6.

- [35] RŮŽIČKA, Milan. *Únavové křivky a faktory, které je ovlivňují* [online]. Praha [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: http://www.kmp.tul.cz/system/files/duz_2017_2_ru.pdf. Přednáška. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní.
- [36] KNOTEK, O. et al., 1994. Behaviour of CVD and PVD coatings under impact load. *Surface and Coatings Technology*. Elsevier, (68-69), 253-258. Dostupné z: doi: [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(94\)90170-8](https://doi.org/10.1016/0257-8972(94)90170-8)
- [37] BOUZAKIS, K.-D. et al., 2004. The inclined impact test, an efficient method to characterize coatings' cohesion and adhesion properties. *Thin Solid Films*. Elsevier, (469-470), 254-262. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2004.08.093>
- [38] LEDRAPPIER, Florent et al., 2007. Damage Phenomena Observed on PVD Coatings Submitted to Repeated Impact Tests. *Plasma Processes and Polymers*. (4), 835-839. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1002/ppap.200732001>
- [39] ANTONOV, M. et al., 2009. Assessment of gradient and nanogradient PVD coatings behaviour under erosive, abrasive and impact wear conditions. *Wear*. Elsevier, (267), 898-906. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.12.045>
- [40] DANIEL, Josef et al., 2020. Comparison of Lifetime of the PVD Coatings in Laboratory Dynamic Impact Test and Industrial Fine Blanking Process. *MDPI: Materials*. (13, 2154), 1-11. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.3390/ma13092154>
- [41] Dynamic and Fatigue Testing Systems: Vibrophores. *Zwick/Roell* [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://www.zwickroell.com/products/dynamic-and-fatigue-testing-systems/vibrophores/>
- [42] Měřicí, kontrolní a testovací stroje, měřidla, optické přístroje, snímače, měřicí ústředny: Stroj zkušební dynamický vibrační Zwick/Roell |Vibrophore 100. *Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně: Fakulta technologická* [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://ft.utb.cz/wp-content/uploads/2019/03/Vibrophore-100.jpg>
- [43] DMU 50 3. generace. *DMG MORI* [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/frezovani/petiose-frezovani/dmu/dmu-50>
- [44] Soustružení: PSBNR2020K12. *Seco Tools* [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://www.secotools.com/?terms=PSBNR2020K12&type=allsearchresults&action=search&ion=products>

- [45] Přítlačná podložka GN 631.5. *Elesa+Ganter* [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z:
<https://www.elesa-ganter.cz/cs/cze/Machine-elements--Stainless-Steel-Thrust-pads--GN6315>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

η	Účinnost obráběcího stroje [-]
α	Úhel [°]
σ	Napětí [MPa]
ε	Deformace [-]
\varnothing	Průměr [mm]
π	Ludolfovo číslo [-]
σ_a	Amplituda napětí
σ_c	Mez únavy [MPa]
ε_z	Úhel záběru vniknutí břitu do materiálu [°]
C_{Fc}, C_{Ff}, C_{Fp}	Materiálové konstanty [-]
x_{Fc}, x_{Ff}, x_{Fp}	Exponenty vlivu a_p [-]
y_{Fc}, y_{Ff}, y_{Fp}	Exponenty vlivu f [-]
3D	Trojdimenzionální
$A_{\gamma 1}$	První hlavní čelo
$A_{\alpha 1}$	První hlavní hřbet
$A_{\gamma 2}$	Druhé hlavní čelo
$A_{\alpha 2}$	Druhý hlavní hřbet
$A'_{\alpha 1}$	První vedlejší hřbet
$A'_{\alpha 2}$	Druhý vedlejší hřbet
A_D	Jmenovitý průřez třísky [mm ²]
Al_2O_3	Oxid hlinitý
a_p	Šířka záběru ostří, (hloubka řezu) [mm]
Ar	Argon

b	Šířka obdélníkové tyče [mm]
BeO	Oxid berylnatý
C	Uhlík
CAM	Počítačová podpora obrábění
CNC	Počítačem řízený obráběcí stroj
Co	Kobalt
Cr	Chrom
Cr ₃ C ₂	Karbid chromu
CVD	Metoda chemického nanášení povlaků z plynné fáze
ČSN	Česká technická norma
d	Průměr zkušebního trnu [mm]
E	Modul pružnosti v tahu [MPa]
F	Síla [N]
f	Posuv za otáčku [mm.ot ⁻¹]
F _c	Řezná síla [N]
FEM	Konečně prvková metoda
F _f	Posuvová síla [N]
F _{kr}	Kritická síla [N]
F _p	Pasivní síla [N]
FR	Poměr poškozené oblasti povlaku
f _z	Posuv na zub [mm/zub]
h	Výška obdélníkové tyče [mm]
H ₂	Vodík
CH ₄	Methan
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
J	Kvadratický moment průřezu [mm ⁴]

J_x	Kvadratický moment průřezu k ose x [mm^4]
k_c	Měrná síla [MPa]
l	Délka zkušebního trnu [mm]
MgO	Oxid hořečnatý
Mo	Molybden
n	Otáčky [ot/min]
N_2	Dusík
NbC	Karbid niobu
NC	Číslicové ovládání obráběcích strojů
N_f	Počet cyklů do porušení
NH_4	Amonný kationt
Ni	Nikl
PKD	Polykrystalický diamant
PKNB	Polykrystalický kubický nitrid bóru
P_m	Celkový výkon obráběcího stroje [kW]
PVD	Metoda fyzikálního napařování z plynné fáze
R	Poloměr kuličky [μm]
r_1	Poloměr vnitřní kružnice, ohraničující povlak ze strany substrátu [μm]
r_2	Vnější poloměr kulového vrchlíku [μm]
R_e	Mez elasticity [MPa]
R_m	Mez pevnosti [MPa]
RO, HSS	Rychlořezná ocel
S	Nástrojové hlavní ostří
S'	Nástrojové vedlejší ostří
Si_3N_4	Nitrid křemičitý
SiC	Karbid křemíku

SK	Slinutý karbid
T	Trvanlivost nástroje [min]
t	Tloušťka povlaku [μm]
Ta	Tantal
TaC	Karbid tantalu
ThO ₂	Oxid thořičitý
Ti	Titan
TiAlN	Nitrid titanu a hliníku
TiC	Karbid titanu
TiCl ₄	Chlorid titaničitý
TiCN	Karbido-nitrid titanu
TiN	Nitrid titanu
UO ₂	Oxid uraničitý
V	Vanad
v _c	Řezná rychlost [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]
W	Wolfram
WC	Karbid wolframu
ZrO ₂	Oxid zirkoničitý

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1</i> Základní plochy při obrábění [2]	12
<i>Obr. 2</i> Ostří a plochy na soustružnickém noži (1-stopka, 2-základna, 3-řezná část, 4-špička, S-nástrojové hlavní ostří, S'-nástrojové vedlejší ostří, $A_{\gamma 1}$ -první hlavní čelo, $A_{\gamma 2}$ -druhé hlavní čelo, $A_{\alpha 1}$ -první hlavní hřbet, $A_{\alpha 2}$ -druhý hlavní hřbet, $A'_{\alpha 1}$ -první vedlejší hřbet, $A'_{\alpha 2}$ -druhý vedlejší hřbet [1]	13
<i>Obr. 3</i> Řezné síly a odpory při podélném soustružení [2]	14
<i>Obr. 4</i> Graf závislosti $T-v_c$ [dle 5]	17
<i>Obr. 5</i> Typy radiálních nožů pro soustružení [7]	19
<i>Obr. 6</i> Závislost tvrdosti materiálu na teplotě [dle 11]	21
<i>Obr. 7</i> Vliv mechanických vlastností řezných materiálů na pracovní podmínky [10]	22
<i>Obr. 8</i> Vlastnosti nástrojových materiálů [2]	23
<i>Obr. 9</i> Závislost tvrdosti karbidů na teplotě [12]	26
<i>Obr. 10</i> Výroba slinutých karbidů [2]	27
<i>Obr. 11</i> Schéma slinovací pece [2]	30
<i>Obr. 12</i> Vliv různých typů povlaků na šíření trhlin [10]	31
<i>Obr. 13</i> Schéma struktury cermetu – vlevo, struktura cermetu na bázi TiCN – vpravo [2]	32
<i>Obr. 14</i> Keramika Si_3N_4 vyztužená SiCw [2]	34
<i>Obr. 15</i> Odklon trhliny protáhlým vláknem Si_3N_4 [10]	34
<i>Obr. 16</i> Postup výroby vyměnitelných břitových destiček z PKNB [dle 2]	35
<i>Obr. 17</i> Systém tenká vrstva – substrát [17]	36
<i>Obr. 18</i> Porovnání tloušťky tenké vrstvy a lidského vlasu [18]	37
<i>Obr. 19</i> Rozdíl mezi úpravou proudem tvrdých a měkkých částic [dle 17]	38
<i>Obr. 20</i> Úprav řezných hran kartáčem [17]	38
<i>Obr. 21</i> Břit před a po úpravě omíláním [23]	39
<i>Obr. 22</i> Schéma principu iontového čištění [18]	40
<i>Obr. 23</i> Schéma vzniku PVD povlaku [10]	41
<i>Obr. 24</i> Rotační držák pro PVD [25]	41
<i>Obr. 25</i> Schéma povlakovacího zařízení pro metodu CVD [2]	42
<i>Obr. 26</i> Hloubkový koncentrační profil vrstvy TiAlSiN na substrátu z SK [dle 17]	45
<i>Obr. 27</i> Schéma zařízení: 1-vzorek, 2-podložka, 3-unašeč, 4-brousící kulička, 5-diamantová pasta [dle 27]; Zařízení CAT ² c firmy Anton Paar [28]	46
<i>Obr. 28</i> Princip výpočtu tloušťky [10]	46
<i>Obr. 29</i> Kvalifikace morfologie vtisku [18]	48
<i>Obr. 30</i> Princip vrypové zkoušky [29]	48
<i>Obr. 31</i> Princip tribometrického měření „Ball (PIN)-on-DISK“ [18]	49

<i>Obr. 32 Tribologická stopa ve vícevrstevném povlaku [17]</i>	49
<i>Obr. 33 Amplitudy složky řezné síly [dle 31]</i>	50
<i>Obr. 34 Hlavní složka řezné síly v závislosti na čase a úhlu záběru [dle 31]</i>	51
<i>Obr. 35 Zátěžový cykl a související terminologie [32]</i>	52
<i>Obr. 36 Únavová křivka napětí – oblasti únavové pevnosti a životnosti [35]</i>	53
<i>Obr. 37 Schéma hysterezní smyčky napětí – deformace [34]</i>	54
<i>Obr. 38 Cyklická deformační křivka [34]</i>	55
<i>Obr. 39 Průběh křivek životnosti [34]</i>	55
<i>Obr. 40 Wöhlerova křivka: 1-s mezi únavy (oceli), 2- bez meze únavy (slitiny neželezných kovů) [34]</i>	56
<i>Obr. 41 Výsledky rázové zkoušky u PVD a CVD povlaků v systému Ti-C-N [dle 36]</i>	57
<i>Obr. 42 Výsledky FEM simulace pro šikmou rázovou zkoušku s cylindrickým indentorem [dle 37]</i>	58
<i>Obr. 43 Definice poškozené oblasti povlaku [dle 37]</i>	59
<i>Obr. 44 Šíření odstranění povlaku během rázové zkoušky [dle 37]</i>	59
<i>Obr. 45 Napěťová pole odvozená v 3D FEM modelu pro rázovou zkoušku [dle 37]</i>	60
<i>Obr. 46 Detailní pohled na kruhové trhliny na obvodu rázového poškození na povlaku P3 po 500 nárazech při 1600 N s použitím ocelového indentoru o průměru 5 mm [dle 38]</i>	62
<i>Obr. 47 Degenerace kruhových trhlin na odlupování v povlaku P5 [dle 38]</i>	63
<i>Obr. 48 Průběh poškození povlaku pod nárazem 80 mJ [dle 39]</i>	63
<i>Obr. 49 Zkušební stroj Vibrophore 100 od firmy Zwick/Roell [42]</i>	66
<i>Obr. 50 Pětiosá CNC frézka DMU 50 3. generace [43]</i>	67
<i>Obr. 51 Schéma nástroje [44]</i>	68
<i>Obr. 52 3D model sestavy prvního návrhu přípravku pro cyklický rázový test (1-základová deska, 2-upínací adaptér, 3-tlačný trn, 4-soustředěný nůž, 5-břitová destička, 6-šroub s kulovým čepem, 7-přítlačná podložka</i>	69
<i>Obr. 53 3D model základové desky s hlavními rozměry</i>	70
<i>Obr. 54 3D model upínacího adapteru s hlavními rozměry</i>	70
<i>Obr. 55 3D model tlačného zátěžového trnu</i>	71
<i>Obr. 56 3D model klínu s úhlem 15°</i>	71
<i>Obr. 57 Všechny verze použití klínů (vlevo – kladné úhly, vpravo – záporné úhly)</i>	72
<i>Obr. 58 Schéma dílů [dle 45]</i>	72
<i>Obr. 59 3D model sestavy druhého návrhu přípravku pro cyklický rázový test (1-základová deska, 2-upínací adaptér, 3-tlačný trn, 4-soustředěný nůž, 5-břitová destička, 6-šroub M10x40, 7-pérová podložka</i>	73
<i>Obr. 60 3D model upínacího adaptéru pro druhý návrh s hlavními rozměry</i>	74
<i>Obr. 61 Všechny verze upnutí nástroje (vlevo – kladné úhly, vpravo – záporné úhly)</i>	74

<i>Obr. 62 Srovnání prvního a druhého návrhu ve verzi s 15° sklonem nástroje.....</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 63 Zakoupené polotovary před obrobením a zarovnáním.....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 64 Hrubování horní plochy desky</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 65 Průběh simulace vrtací operace</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 66 Rozfrézování všech děr na první upnutí</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 67 Průběh zbytkového obrábění zaoblení rohů desky</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 68 Srážecí operace prvního upnutí desky.....</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 69 Simulace dokončovací operace spodní plochy desky</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 70 Frézování osazení pro hlavy šroubů</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 71 Finální podoba základové desky</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 72 Vyhrubování kapsy adaptéru</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 73 Dokončení rohů adaptéru.....</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 74 Dokončení rohů v kapse</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 75 Vrtání otvorů Ø 5 mm</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 76 Vrtání děr pro závity M10</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 77 Hrubování sražení</i>	<i>85</i>
<i>Obr. 78 Dokončená plocha sražení</i>	<i>86</i>
<i>Obr. 79 Vyrobený upínací adaptér položený na základové desce</i>	<i>87</i>
<i>Obr. 80 Vrtání děr Ø 4 mm do spodní strany klínu.....</i>	<i>88</i>
<i>Obr. 81 Hrubování šikmé plochy klínu</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 82 Dokončení funkční plochy klínu</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 83 Výsledek po hrubovací operaci</i>	<i>91</i>
<i>Obr. 84 Dokončení tvarové plochy kulovou frézou</i>	<i>91</i>
<i>Obr. 85 Srovnání druhého čela.....</i>	<i>92</i>
<i>Obr. 86 Frézování upínacích ploch</i>	<i>92</i>
<i>Obr. 87 Sestavený upínací přípravek bez klínu</i>	<i>93</i>
<i>Obr. 88 Sestavený upínací přípravek s 5° klínem</i>	<i>93</i>
<i>Obr. 89 Sestavený upínací přípravek s 10° klínem</i>	<i>94</i>
<i>Obr. 90 Sestavený upínací přípravek s 15° klínem</i>	<i>94</i>
<i>Obr. 91 Vysíťovaná zjednodušená sestava upínacího přípravku.....</i>	<i>95</i>
<i>Obr. 92 Nastavení podmínek sestavy pro simulaci.....</i>	<i>96</i>
<i>Obr. 93 Zobrazení celkového deformačního posunutí v měřítku 10 %</i>	<i>97</i>
<i>Obr. 94 Zobrazení deformačního posunutí v měřítku 1:1</i>	<i>97</i>
<i>Obr. 95 Deformace na soustružnickém noži a šroubech v měřítku 1:1</i>	<i>98</i>
<i>Obr. 96 Napěťové pole na kulové čepu přitlačného šroubu</i>	<i>99</i>

<i>Obr. 97</i>	<i>Uspořádání přípravku a trnu při experimentálním statickém testu</i>	<i>100</i>
<i>Obr. 98</i>	<i>Zkušební trn po statickém zátěžovém testu</i>	<i>101</i>
<i>Obr. 99</i>	<i>3D model finální verze tlačného trnu</i>	<i>102</i>
<i>Obr. 100</i>	<i>Zdeformovaný tlačný trn</i>	<i>103</i>
<i>Obr. 101</i>	<i>Upínací přípravek s tlačným trnem při cyklickém testu</i>	<i>103</i>
<i>Obr. 102</i>	<i>Upínací přípravek s klínem 5 °, 10 °, 15 °</i>	<i>104</i>
<i>Obr. 103</i>	<i>Rozložená sestava upínacího přípravku (1-základová deska, 2-upínací adaptér, 3-tlačný trn, 4-soustružnický nůž, 5-břitová destička, 6-šroub s kulovým čepem, 7-přítlačná podložka, 8-imbusový šroub M10x40, 9-imbusový šroub M16x40)</i>	<i>105</i>
<i>Obr. 104</i>	<i>Průběh hodnot zatěžující síly v poslední části cyklického testu</i>	<i>123</i>
<i>Obr. 105</i>	<i>Sinusový průběh křivek minimální a maximální zatěžující síly</i>	<i>124</i>
<i>Obr. 106</i>	<i>Záznam průběhu zdvihů čelisti</i>	<i>125</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1</i> Hodnoty exponentu <i>m</i> pro vybrané nástrojové materiály [5]	17
<i>Tab. 2</i> Označení nožů pro soustružení dle ISO [dle 7]	19
<i>Tab. 3</i> Základní rozdělení slinutých karbidů do skupin [10, 13]	26
<i>Tab. 4</i> Srovnání vlastností základních povlakovacích materiálů [dle 10]	44
<i>Tab. 5</i> Charakteristiky testovaných povlaků [dle 38]	61
<i>Tab. 6</i> Vybrané technické parametry testovacího zařízení Vibrophore 100 [dle 41]	66
<i>Tab. 7</i> Technické údaje CNC frézky DMU 50 [dle 43]	67
<i>Tab. 8</i> Technická specifikace soustružnického nože [dle 44]	68
<i>Tab. 9</i> Porovnání zásadních faktorů mezi 1. a 2. návrhem	75
<i>Tab. 10</i> Použité nástroje a jejich řezné podmínky pro výrobu základové desky	77
<i>Tab. 11</i> Přehled operací při výrobě základové desky	81
<i>Tab. 12</i> Přehled nástrojů a řezných podmínek použitých při výrobě adaptéru	82
<i>Tab. 13</i> Souhrn operací výrobního postupu upínacího adaptéru	87
<i>Tab. 14</i> Nástroje a jejich řezné podmínky použité při výrobě úhlových klínů	88
<i>Tab. 15</i> Použité operace při výrobě úhlových klínů	90
<i>Tab. 16</i> Nástroje a jejich řezné podmínky použité při výrobě tlačného trnu	90
<i>Tab. 17</i> Sled výrobních operací tlačného trnu	92

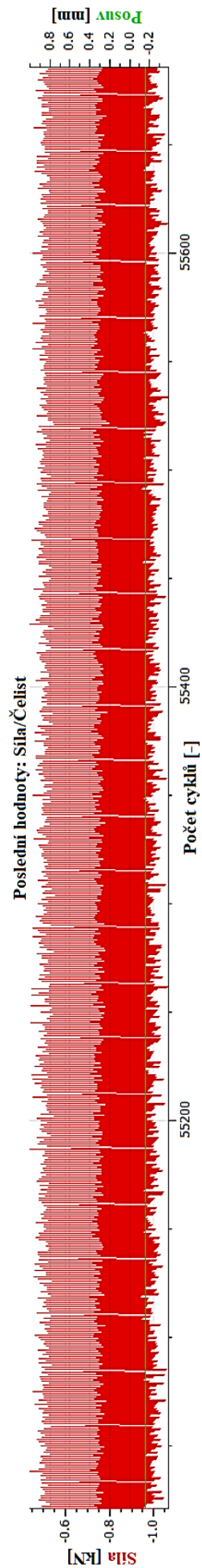
SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Výstup cyklické zkoušky – Síla

Příloha P II: Výstup cyklické zkoušky – Křivky síly

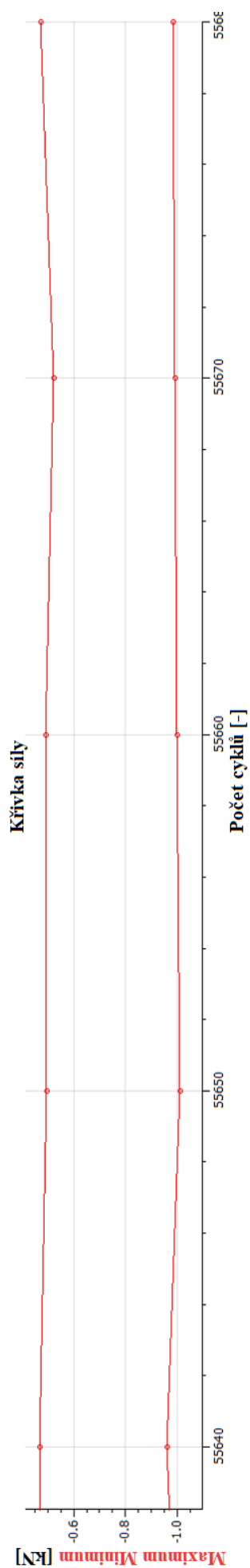
Příloha P III: Výstup cyklické zkoušky – Zdvih čelisti

PŘÍLOHA P I: VÝSTUP CYKLICKÉ ZKOUŠKY – SÍLA



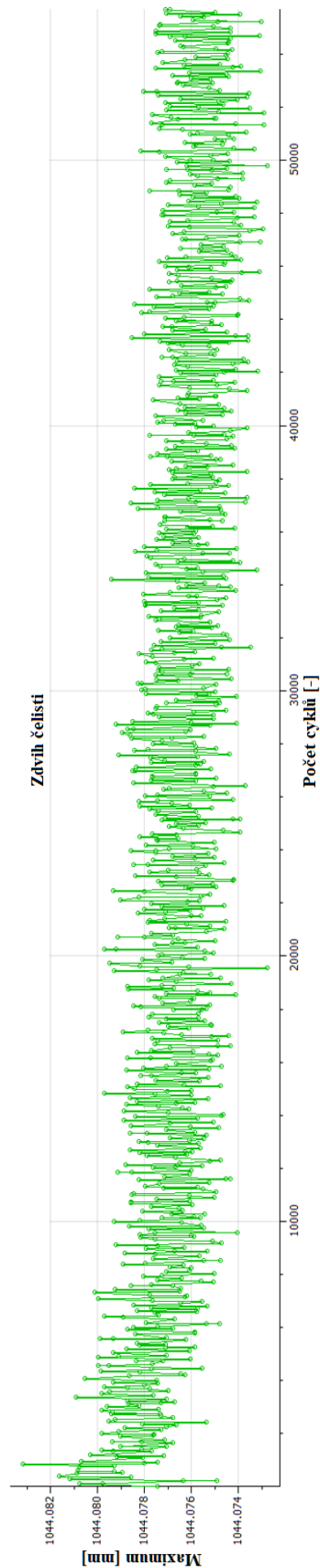
Obr. 104 Průběh hodnot zatěžující síly v poslední části cyklického testu

PŘÍLOHA P II: VÝSTUP CYKLICKÉ ZKOUŠKY – KŘIVKY SÍLY



Obr. 105 Sinusový průběh křivek minimální a maximální zatěžující síly

PŘÍLOHA P III: VÝSTUP CYKlickÉ ZKOUŠKY – ZDVIH ČELISTI



Obr. 106 Záznam průběhu zdvihů čelisti