



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**ANALÝZA ÚČINKU CHLAZENÍ FORMY NA TRVANLIVOST
TVÁŘECÍCH NÁSTROJŮ**

ANALYSIS OF MOLD COOLING ON TOOL LIFE OF FORMING TOOLS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Bambušek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Martin Bambušek**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.**
Akademický rok: 2019/20

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

Analýza účinku chlazení formy na trvanlivost tvářecích nástrojů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Analýza možností zvyšování trvanlivosti tvářecích nástrojů pomocí nových materiálů, otěruvzdorných povlaků a chlazení. Aplikace chlazení formy pomocí stlačeného vzduchu a rozbor dosažených výsledků v praxi.

Cíle bakalářské práce:

Rozbor možností zvyšování trvanlivosti tvářecích nástrojů pomocí nových materiálů, otěruvzdorných povlaků a chlazení.

Aplikace chlazení formy pomocí stlačeného vzduchu a rozbor dosažených výsledků v praxi.

Vyhodnocení dosažených technologických a ekonomických výsledků.

Seznam doporučené literatury:

SUBRAMANIAN, C., STRAFFORD K. N. Towards optimization in the selection of surface coatings and treatments to control wear in metal-forming dies and tools. Materials & Design. Volume 14, Issue 5, 1993. pp. 291–298.

BOBZIN, K. et al. (Cr,Al)N/(Cr,Al)ON Oxy-nitride Coatings deposited by Hybrid dcMS/HPPMS for Plastics Processing Applications. Surface & Coatings Technology 308. 2016. 394–403.

YAMAMOTO, K. HIROTAKA I., KUJIME S. Nano-multilayered CrN/BCN coating for anti-wear and low friction applications. Surface & Coatings Technology 201, 2007. 5244–5248.

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

PÍŠKA, M., a kol. Speciální technologie obrábění. Učební text pro FSI, ISBN 978-80-214-4025-8, CERM, Brno, 2009, s. 248.

HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Praha: MM publishing, 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2-50-2.

BUNSHAH, R. F. Handbook of hard coatings. Noyes Publications/William Andrew Publishing, N. York. 2001, pp. 550. ISBN 0-8155-1437-7.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je rozbor možností zvyšování trvanlivosti tvářecích nástrojů. Do těchto možností je zahrnuta volba nových materiálů, povlakování, tepelné zpracování, chemicko-tepelné zpracování a chlazení nástroje. Experimentální část analyzuje vliv chlazení tvářecího nástroje stlačeným vzduchem. Tento způsob chlazení je dále porovnáván s jinou metodou chlazení, a to konformním chlazením kapalinou, a také s nechlazeným nástrojem.

Klíčová slova

zvýšení trvanlivosti, vliv chlazení na trvanlivost nástroje, tváření za tepla, přenos tepla

ABSTRACT

The aim of this bachelor's thesis is to analyze the possibilities of increasing the durability of forming tools. These options include choice of new materials, coating, heat treatment, chemical-thermal treatment and tool cooling. The experimental part analyzes the effect of cooling the forming tool with compressed air. This is further compared to another method of cooling, namely conformal liquid cooling, and also with an uncooled tool.

Key words

increase of durability, influence of cooling on tool life, hot forming, heat transfer

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BAMBUŠEK, Martin. Analýza účinku chlazení formy na trvanlivost tvářecích nástrojů [online]. Brno, 2020, 61 s, [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125384>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Analýza účinku chlazení formy na trvanlivost tvářecích nástrojů** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

23.06.2020

Datum

Martin Bambušek

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu bakalářské práce panu prof. Ing. Miroslavovi Píškovi, CSc. a panu Ing. Zdeňkovi Horákovi za ochotu, trpělivost, cenné rady a připomínky při vypracování práce. Dále bych rád poděkoval panu RNDr. Alešovi Muroňovi, Ph.D. za možnost uskutečnění experimentu, panu Ing. Martinovi Petrencovi, Ph.D. a jeho týmu za pomoc při práci v laboratoři a paní Ing. Barboře Kopečkové za konzultace při vyhodnocení průtoku vzduchu.

OBSAH

ABSTRAKT	3
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 TVÁŘENÍ.....	10
1.1 Tváření pružinové oceli za studena.....	10
1.2 Tváření vysokopevnostní oceli za tepla	11
2 ZVÝŠENÍ TRVANLIVOSTI TVÁŘECÍCH NÁSTROJŮ.....	13
2.1 Volba materiálu	13
2.1.1 1.2379 – AISI D2.....	13
2.1.2 1.2344 – AISI H13.....	14
2.1.3 Karbidová ocel.....	15
2.1.4 Tenasteel®	15
2.2 Povlakování.....	16
2.2.1 Metody povlakování	16
2.2.2 Oxinitridové povlaky	17
2.2.3 CrN/BCN povlaky	17
2.3 Tepelné zpracování	18
2.3.1 Konvenční metody tepelného zpracování.....	18
2.3.2 Nekonvenční metody tepelného zpracování	19
2.4 Chemicko-tepelné zpracování.....	21
2.4.1 Nitridování	21
2.4.2 Cementování	21
2.5 Chlazení nástroje.....	21
2.5.1 Způsoby přenosu tepla	21
2.5.2 Metody chlazení.....	23
3 APLIKACE CHLAZENÍ STŘIŽNÉHO NÁSTROJE POMOCÍ STLAČENÉHO VZDUCHU.....	25
3.1 Popis původního stavu	27
3.2 Aplikace stlačeného vzduchu	28
3.3 Rozbor technologických výsledků	29
4 PŘEDBĚŽNÉ POROVNÁNÍ TRVANLIVOSTI S DALŠÍM TYPEM CHLAZENÍ NÁSTROJE	44

FSI VUT	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	List	8
---------	------------------	------	---

5	PŘEDBĚŽNÉ EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ.....	47
6	DISKUZE	53
7	ZÁVĚR	54
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	55
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	59

ÚVOD

V současnosti je kladen obrovský důraz na zvyšování trvanlivosti tvářecích nástrojů, nejen kvůli ekologičnosti, ale také kvůli ekonomičnosti. Toho se dá docílit např. pomocí volby vhodných materiálů, otěruvzdorných povlaků, tepelným zpracováním nebo eliminací vznikajícího tepla za pomoci chlazení.

Teplo má zásadní vliv na trvanlivost tvářecího nástroje. Dochází ke vzniku teplotních trhlin, rychlejšímu opotřebení střižné hrany nástroje a celkové snížení trvanlivosti. U tvářecích procesů teplo vzniká hlavně díky tření mezi materiálem a nástrojem nebo přímým přenosem tepla, kdy materiál s o hodně vyšší teplotou je v blízkém kontaktu s nástrojem. Toto teplo se snažíme v co největší možné míře eliminovat právě za pomoci chladicího systému. Chladicí médium má celkem tři funkce. Tou hlavní je snížení teploty nástroje. Další je mazací funkce, ke snížení tření, a poslední je odstranění nečistot z povrchu materiálu (např. okuje).

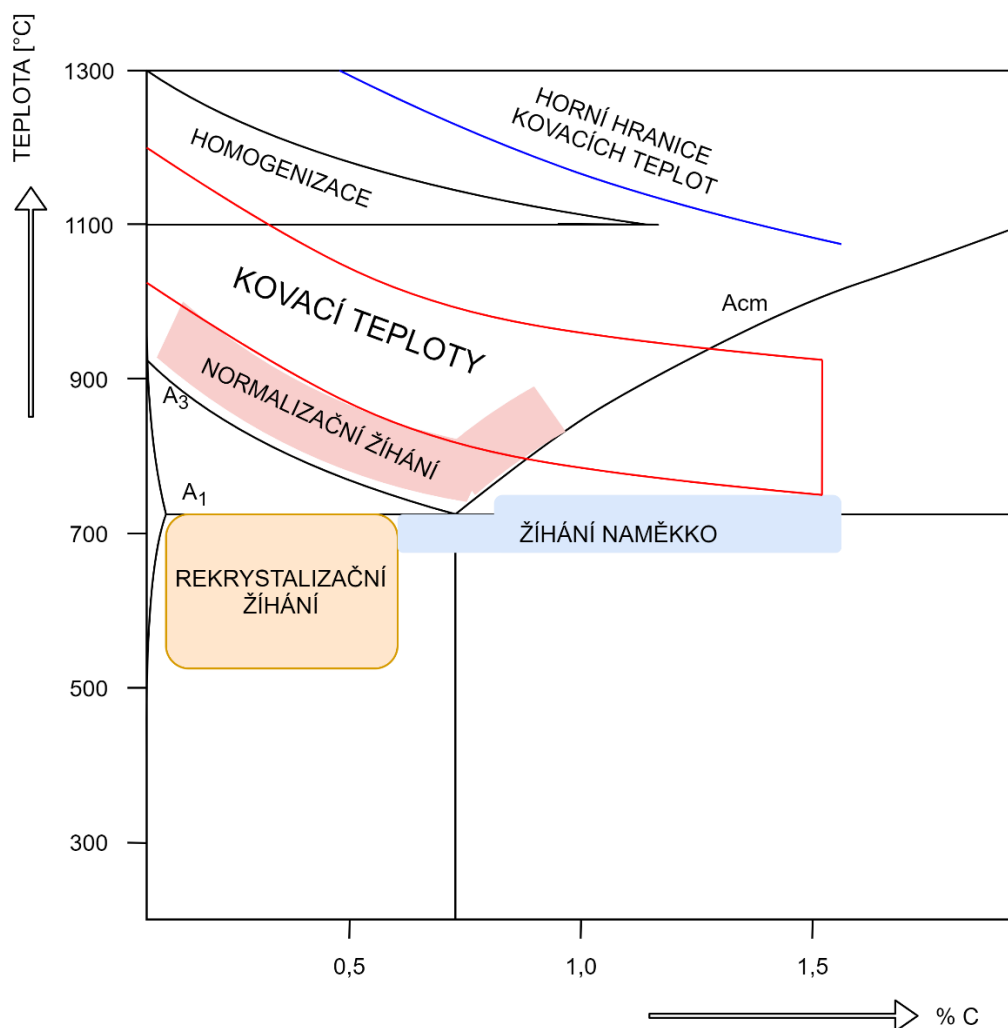
Obecně lze říct, že chlazení je možné provést za pomoci kapalin nebo stlačených plynů. Dále je také možné chladit nástroj dvěma způsoby. Konformním způsobem, tedy soustavou kanálků utvořených v nástroji, které chladí nástroj v celém objemu, nebo přivedením chladicího média zvenčí za pomoci trysky.

Tato práce se zabývá rozbořem účinku chlazení střižného nástroje pomocí stlačeného vzduchu a teoretickým rozbořem možností zvýšení trvanlivosti tvářecích nástrojů. V první kapitole je rozebrána problematika tváření pružinových a vysokopevnostních ocelí za studena a tepla. Ve druhé kapitole jsou řešeny různé možnosti zvýšení trvanlivosti tvářecích nástrojů. Do těchto možností je zahrnuta volba nových materiálů, povlakování, tepelné zpracování, chemicko-tepelné zpracování a chlazení nástroje. Ve třetí kapitole je proveden test chlazení střižného nástroje pomocí stlačeného vzduchu, rozbor dosažených výsledků, vyhodnocení růstu teplotních trhlin a opotřebení nástroje. Ve čtvrté kapitole je srovnání technologických výsledků nechlazeného nástroje, chlazeného vodou a chlazeného stlačeným vzduchem. V páté kapitole je následně rozbor ekonomických výsledků pro nástroj chlazený vzduchem a vodou vůči původnímu nechlazenému nástroji.

1 TVÁŘENÍ

1.1 Tváření pružinové oceli za studena

Při tváření za studena materiál dosahuje výrazně nižších teplot, než je teplota rekrytalizace. Pro lepší představivost o výšce teplot rekrytalizačního žíhání lze využít diagram Fe–Fe₃C na obrázku 1.1. Jsou potřebné vysoké síly pro překonání odporů v materiálu, což značně namáhá stroj i nástroj. Touto metodou však získáváme vysokou přesnost rozměrů a kvalitu povrchu, jelikož nevznikají okraje. [1, 2]



Obr. 1.1 Schematické zobrazení pásem žihacích a kovacích teplot ocelí v diagramu Fe–Fe₃C.

Tváření pružinové oceli za studena sebou nese mnoho významných problémů. Charakteristickým znakem této oceli je totiž vysoká mez kluzu, díky které se materiál může do určité míry stlačovat, ohýbat, natahovat nebo kroutit a po odtížení se vrátí do původní polohy. Takové chování značně znesnadňuje plastickou deformaci. Mez kluzu lze samozřejmě překročit, ale je k tomu nutná velká působící síla a v materiálu mohou vznikat trhliny. [3, 4]

Pružinová ocel nachází velké uplatnění v mnoha odvětvích průmyslu, zejména v automobilním na výrobu pružin a stabilizátorů. Dále např. nožů, čepele pil a obecně všech součástí, kde je nutná vysoká mez kluzu. [4]

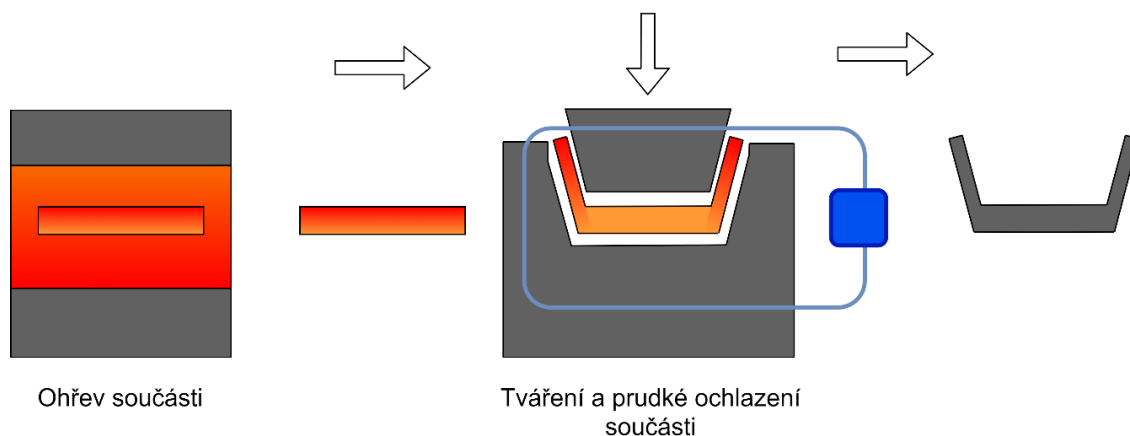
Příklad chování takového materiálu je možné ukázat na výrobě trubky z plechu pružinové oceli o tloušťce 0,1 mm. K výrobě lze využít např. ruční ohýbačku. Pás plechu o určitých rozměrech je pevně upnut mezi čelistmi ohýbačky a ohnut o úhel 75°. Čelisti se poté uvolní, plech se vysune a poté opět ohne o stejný úhel. Pokud se bude celý proces opakovat, původní pás plechu se zdeformuje do trubky. Další možností výroby může být za pomoci profilovací linky. Ta se skládá ze sad profilovacích válců upevněných ve stolici. Pás plechu prochází jednotlivými sadami a je postupně tvářen až do konečného tvaru profilu. Pro výrobu trubky z pružinové oceli se použije linka, skládající se ze tří částí. V první části se nejprve ohýbají hrany plechu. Zde jsou nutné čtyři sady válců, kdežto u profilování obyčejné oceli, by byla použita pouze jedna sada. V další části, kde je devět válců, se tváří celý profil trubky a v poslední části, s dvanácti válci, je trubka stlačována. Na výstupu tedy vznikne profil o kruhovém průřezu. Všechny válce musí mít stejnou rozteč, aby se kvůli odpružení minimalizovala deformace oceli. [3, 5]

Jak je patrné, vysoké odpružení značně znesnadňuje zpracování pružinové oceli. Ať už se jedná o složitější výrobní profilovací linku, oproti tváření běžných ocelí, nebo nutnost opakovaného a zdlouhavého ohýbání.

1.2 Tváření vysokopevnostní oceli za tepla

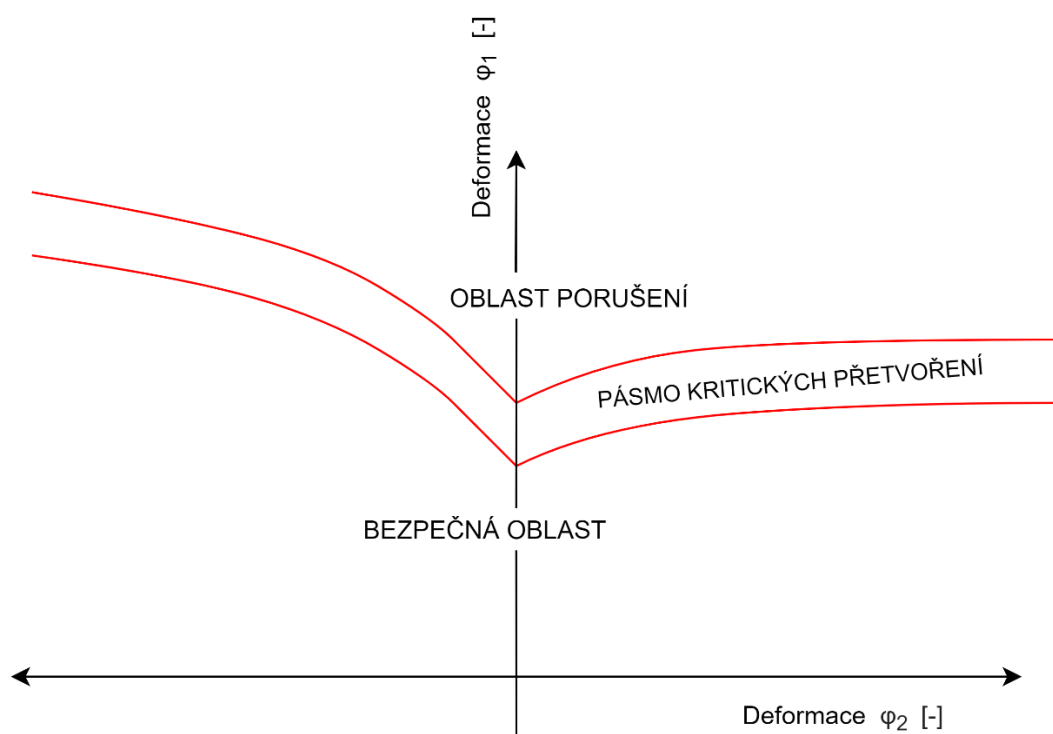
Tváření za tepla obecně probíhá za teplot vyšších, než je teplota rekrytalizace, viz obr. 1.1. Vysoké tlaky na materiál nejsou potřebné, jelikož s rostoucí teplotou roste tvárnost, tudíž je stroj méně silově namáhán. Dochází také k opakovanému obnovování zrna, což prakticky umožňuje neomezené přetvoření. S vysokou teplotou materiálu přichází také řada problémů. Z ekonomického hlediska je velká spotřeba energie na ohřev. Stroj je značně tepelně namáhán a kvůli okujím je horší kvalita povrchu materiálu. [1]

V předchozí podkapitole je uvedeno, že tváření ocelí s vysokou mezí kluzu za studena je značně složitý proces. Právě tváření takového materiálu za tepla může celý problém zjednodušit. Jako příklad lze uvést metodu ražení za tepla, která má využití např. pro výrobu B-sloupků v automobilovém průmyslu. Častým materiálem pro výrobu těchto sloupků je ocel 22MnB5, jelikož dobře splňuje poměr pevnost ku hmotnosti. V praxi se přístřih plechu ohřeje až na teplotu vzniku austenitu, kde po určitou dobu setrvá, než dojde k úplné austenitizaci. Rychle se umístí do formy s chladicím systémem, kde se vyrazí požadovaný tvar a zároveň zakalí a dojde k utvoření martenzitické struktury. Celý proces je schematicky znázorněn na obrázku 1.2. [7, 8, 6]



Obr. 1.2 Schematicky znázorněný průběh ražení vysokopevnostní oceli za tepla.

Tvařitelnost materiálu je však omezena diagramem mezní tvařitelnosti. Příklad takového diagramu je na obrázku 1.3. S každým materiálem se také liší i mezní diagramy. Na tvar křivky mezní tvařitelnosti má také vliv teplota tváření, tloušťka materiálu, způsob tváření nebo stav nástroje. S rostoucí teplotou a tloušťkou materiálu, se celá křivka diagramu posouvá nahoru. Může se také měnit sklon částí diagramu, pokud se bude měnit např. koeficient deformačního zpevnění. Pro mnoho ocelí má však tvar V. [7, 6]



Obr. 1.3 Diagram mezní tvařitelnosti.

Při tváření oceli 22MnB5 o teplotě 800 °C tvařitelnost klesá spolu s tloušťkou materiálu. O tloušťce 1,8 mm je materiál stále v bezpečné části diagramu. Při 1,6 mm se nachází již na hraně bezpečnosti a při 1,4 mm již vznikají trhliny a ocel se dostává do oblasti porušení. Důvodem poklesu tvařitelnosti kvůli teplotě je změna v krystalické mřížce materiálu. Při 800 °C je v mikrostruktuře austenitická FCC mřížka, kdežto na rozmezí 700–600 °C dochází k fázovému přechodu na feritovou BCC mřížku. [7]

2 ZVÝŠENÍ TRVANLIVOSTI TVÁŘECÍCH NÁSTROJŮ

Na začátek je nejprve nutné rozlišit význam dvou pojmů. Trvanlivost a životnost nástroje. První ze zmiňovaných pojmů udává dobu od prvního okamžiku uvedení nástroje do výroby, až po jeho opotřebení na předem stanovenou hodnotu. Poté musí být nástroj vyměněn a přebroušen. Nástroj nemůže být přebrušován nesčetněkrát. Opět musí být stanovena jistá hranice, kolikrát jej lze opakovaně používat. Životnost pak je součet všech trvanlivostí nástroje. [1]

Nástroje se prací opotřebovávají a je nutné sledovat stav nástroje a míru opotřebení, aby neklesala efektivita výroby. Převážně lze hovořit o pěti typech opotřebení:

Abraze – Jde o otěr mezi tvrdými částicemi materiálu a částicemi nástroje. [1]

Adheze – Na kontaktní plochu mezi nástrojem a obrobkem působí tlak a vysoké teploty. Dochází ke tvorbě mikrosvarů, které se pohybem nástroje nebo obrobku ihned utrhnou. [1]

Únava materiálu – Pomalé a kumulující poškození materiálu vlivem opakovaného zatěžování. Trhliny se materiálem postupně šíří z povrchového vrubu, až dojde k úplnému dolomení materiálu. [1]

Oxidace – Vznikají chemické sloučeniny mezi povrchem nástroje a vnějším prostředím, které nástroj znehodnocují. [1]

Teplotní trhliny – Dochází k vytvoření hřebenovitých trhlin, které jsou kolmé na dilatující část nástroje. [1]

2.1 Volba materiálu

Materiálů vhodných ke tváření je obrovské množství, od měkkých kovů a slitin (např. hliník, měď, slitiny zinku), až po tvrdé kovy a slitiny (např. uhlíkové oceli, vysoko legované oceli, slitiny titanu). Se širokou škálou materiálů existuje i neméně velký výběr nástrojových materiálů vhodných ke tváření, od různých polymerů, slitin zinku, ocelí až po keramiku. [9]

2.1.1 1.2379 – AISI D2

Tab. 2.1 Chemické složení oceli 1.2379 [9].

Prvek	C	Mn	Si	Cr	W	Mo	V	Ni max.	Co	P max.	S max.
Složení [%]	1,50- 1,60	0,15- 0,45	0,10- 0,40	11,0- 12,0		0,60- 0,80	0,90- 1,10			0,030	0,030

Číselným označením EN 1.2379. Jedná se v podstatě o běžnou nástrojovou ocel, která má však široké využití, např. pro střížné i lisovací nástroje, zvláště pro tvarově složité nástroje pro stříhání transformátorových plechů. Dále pro jednoduché nástroje na protlačování a tažení nebo hladké a profilovací válce. Tento materiál nachází také uplatnění při výrobě nožů na tabulových nůžkách nebo nožů na stříhání drátu. Ocel je také možné použít i při výrobě vysoce namáhaných forem pro tváření skla, porcelánu a keramiky. [10]

Mezi charakteristické vlastnosti patří velmi vysoká pevnost v tlaku a odolnost proti opotřebení. Dobrá je také stálost rozměrů při tepelném zpracování. Velmi obtížně se brousí, tváří za tepla a má ztíženou obrobiteľnosť v žíhaném stavu. Díky vysokému obsahu chromu je velice dobrá korozivzdornost na vzduchu i ve vodě. Ve stavu žíhaném na měkko dosahuje tvrdosti max. 255 HB. Ve zušlechťeném stavu získává tvrdost min. 60 HRC. Chemické složení je možné vidět v tabulce 2.1. [10,11]

Pro srovnání vlastností s jiným materiálem je použita ocel 1.2510. Ta má využití pro práci za studena, zejména na výrobu různých forem, razníků, kalibrů, ale také obráběcích nástrojů. Pro porovnání jsou oba materiály vytvrzeny na stejnou tvrdost povrchu 700 HV (60 HRC). Přestože oba materiály mají stejnou tvrdost, jejich chování je zcela odlišné. Při adhezivním opotřebení má při relativně nízkých kluzných rychlostech (15–30 m/s) ocel 1.2510 až dvanáctkrát lepší vlastnosti, než 1.2379. Při vyšších kluzných rychlostech (75 m/s), se ale prospěch obrací díky tomu, že se na povrchu oceli 1.2379 začne tvořit oxidační vrstva. Ta způsobuje to, že se primárně opotřebovává sama vrstva. U oceli 1.2510 se však oxidační vrstva netvoří v takové míře, aby se opotřebovávala pouze sama vrstva, proto má horší vlastnosti při vyšších rychlostech. U abrazivního opotřebení si vede ocel 1.2379 až dvakrát lépe díky karbidům v mikrostruktuře, které jsou tvrdší než abrazivní médium. [12]

2.1.2 1.2344 – AISI H13

Tab. 2.2 Chemické složení oceli 1.2344 [9].

Prvek	C	Mn	Si	Cr	W	Mo	V	Ni max.	Co	P max.	S max.
Složení [%]	0,37- 0,43	0,30- 0,50	0,90- 1,20	4,80- 5,50		1,20- 1,50	0,90- 1,10			0,030	0,030

Číselným označením EN 1.2344. Ocel s vysokou pevností za tepla a odolností proti popouštění i oťeru. Houževnatá s dobrou odolností proti vzniku trhlinek tepelné únavy. Vhodná ke kalení na vzduchu a v oleji s velmi dobrou prokalitelností. Uvádí se, že prokalení je v celém průřezu až do průměru 150 mm. Je dobře tvárná za tepla a dobře obrobiteľná ve stavu žíhaném na měkko, obtížně se ale brousí. Po žíhání na měkko dosahuje tvrdosti max. 250 HB. Po zušlechťení dosahuje tvrdosti min. 51 HRC. Chemické složení oceli je zapsáno v tabulce 2.2. [10]

Má poměrně široké využití pro práci za tepla. Nástroje pro kovací lisy, čelisti, razníky, matrice, zápustkové vložky. Nože pro stříhání za tepla, ostříhovací matrice a prostříhovací trny. Nástroje na protlačování součástí z lehkých slitin za tepla. Velmi namáhané formy pro tlakové lití slitin lehkých kovů, pohyblivé i nepohyblivé díly, které jsou v kontaktu s tekutým kovem, vtoková pouzdra, rozdělovače. [10, 11]

Jako konkurenční materiály je možné využít ocel 1.2365. Ta je také využívána pro tváření za tepla, zejména na zápustky, zápustkové vložky, různé čelisti nebo trny. Oba materiály jsou tvrzeny na 44 HRC. Pokud je porovnávána pevnost materiálů z mikrostrukturálního hlediska, tak ocel 1.2344 má lepší pevnost ve vztahu k mikrostruktuře. [13]

2.1.3 Karbidová ocel

Tab. 2.3 Chemické složení karbidové oceli [14].

Prvek	C	Si	Mn	Cr	Ni	Co	W
Složení [%]	2,8	1,1	0,25	25,5	0,4	0,8	7,9

Jde o relativně nový typ materiálu, který byl navrhnout pro vysokou odolnost vůči opotřebení a korozivzdornost. Jedná se v podstatě o slitinu bílé litiny s vysokým obsahem chromu a slinutého karbidu. Charakteristickými vlastnostmi je dobrá slévateľnost a vysoká odolnost vůči opotřebení díky vyššímu obsahu karbidu ve slitině. Materiál může mít v odlitém stavu tvrdost až 63 HRC, kdežto běžné oceli, např. předchozí zmíněné materiály, dosahují takových tvrdostí až po tepelném zpracování. Chemické složení je zapsáno v tabulce 2.3. Využití má v mnoha odvětvích, kde je vysoké opotřebení, chemické působení nebo vysoké změny teplot, např. nástroje na tváření plechů, v těžebním průmyslu nebo injekční nástroje pro výrobu plastů. [14]

Karbidová ocel může být také tepelně zpracována precipitačním zpevněním. Materiál se zahřeje až na 1040 °C a pak je ochlazen na pokojovou teplotu. Struktura se změní z austenitické na martenzitickou a karbidy se nerozpouštějí, ale zůstávají v tuhém stavu. Pokud se vyžaduje nižší tvrdost, tak materiál může být žíhán. [14]

V porovnání s běžnými nástrojovými oceli vykazuje karbidová ocel mnohem větší odolnost vůči adhezi. Tuto vlastnost získává vysokým počtem a vhodnou velikostí karbidů ve struktuře materiálu. [14]

2.1.4 Tenasteel®

Tab. 2.4 Chemické složení oceli Tenasteel® [15].

Prvek	C	S max	Mn	Cr	Mo	V
Složení [%]	1,00	0,005	0,35	7,50	2,60	0,30

Další poměrně nový typ materiálu určený hlavně pro náročné aplikace tváření kovů za studena. Ocel byla zvláště vyvinuta jako náhrada oceli typu 1.2379, která je také uvedena dříve v této práci. Jedním z hlavních důvodů pro vývin nového materiálu byla příliš vysoká křehkost staršího typu materiálu. Chemické složení oceli je zapsáno v tabulce 2.4. Ocel Tenasteel® vyniká vyšší pevností v tlaku a je také vhodná pro široké spektrum povlakovacích technologií. Díky snížení obsahu chromu oproti oceli 1.2379 se výrazně zlepšila obrobiteľnost. Odolnost vůči abrazi je podobná, jako u oceli 1.2379. Nižší podíl uhlíku a chromu je kompenzován legujícími prvky, které utváří jemnější a tvrdší karbidy oproti karbidům chromu v oceli 1.2379. [10, 15]

Využití má v mnoha směrech, stejně jako běžné typy oceli určených pro tváření za studena. Jde zejména o střížné i lisovací nástroje kovů, hliníku, mědi, nerezové oceli atd. [10, 15]

Primárně je materiál dodáván v žíhaném stavu pro snazší obrobiteľnost. Tvrdost v takovém stavu dosahuje max. 250 HB. Pro získání optimálních mechanických vlastností se musí kalit a popouštět. Po celém procesu tepelného zpracování má materiál tvrdost min. 58 HRC. S vhodnou povrchovou úpravou se tvrdost povrchu ještě navýší. [15]

2.2 Povlakování

2.2.1 Metody povlakování

CVD

Celým názvem chemical vapour deposition. Jde o chemický povlakovací proces za vysokých teplot (často větší než 850 °C). Dochází k reakci chemických sloučenin, které jsou v plynném stavu přiváděny k povrchu nástroje. Výhodou je dobrá přilnavost povlaku k podkladu a poměrně vysoká hustota nanášených částic. Nevýhodou je právě ona zmíněná vysoká teplota. V praxi se takto nanáší tvrdé povlaky jako jsou např. TiC, TiN, TiCN atd. [16, 17]

PVD

Celým názvem physical vapour deposition. Z názvu tedy vyplývá, že jde o fyzikální povlakovací proces. Teploty jsou daleko nižší než u CVD (150–500 °C). Pevné látky jsou odpařeny nebo odprášeny v řízené atmosféře pomocí elektrického oblouku. Výhodou jsou nízké teploty při povlakování. Nevýhodou je nutnost pohybovat povlakovaným předmětem během procesu, aby došlo k rovnoměrnému nanesení částic. Takovým příkladem nutného pohybu s nástrojem při procesu jsou rotační držáky vrtáků na obrázku 2.1. [16, 17]



Obr. 2.1 Rotační držáky nástrojů [18].

Naprašování

Jde o jednu z PVD metod. Podstatou je elektrický výboj mezi katodou a anodou v plynné atmosféře. Na katodu dopadají elektrony inertního plynu, které uvolní z terče (povlakujícího materiálu) částice o potřebném chemickém složení. Ty se dále ukládají na podkladový materiál a utváří požadovanou tenkou vrstvu povlaku. [17]

Magnetronové naprašování

Jde o zdokonalenou technologii klasického naprašování. Elektromagnetem nebo permanentním magnetem se před katodou vytvoří elektrické pole. Elektrony se poté pohybují podle siločar, čímž se prodlužuje dráha i doba v blízkosti terče a zvyšuje se šance na ionizaci dalších atomů plynu. To umožňuje udržet výboj při nižším tlaku i napětí, což se projeví na větší čistotě nanášených vrstev. [17]

2.2.2 Oxinitridové povlaky

Tvrdé nitridové povlaky na bázi chromu jsou často nanášeny na nástroj pro mnoho aplikací, jakožto účinná ochrana nástroje vůči adhezi a abrazi. Zvláště se pak dále využívají oxinitridové povlaky na bázi chromu (Cr) s vyšším obsahem kyslíku (O_2) např. při zpracování a výrobě plastů. Nástroje zpracovávající plasty jsou totiž vystavovány mnoha vlivům, zejména vysokým teplotám, adhezivnímu i abrazivnímu opotřebení nebo korozi. [17]

Nitrid chromu (CrN) se velice často používá jako povlak samotný nebo jako základní pro vícevrstvé povlakování. CrN v porovnání s jinými nitridy, např. nitrid titanu (TiN), vykazuje velice dobrou přilnavost k základnímu materiálu. Rozšířením binární sloučeniny CrN hliníkem (Al) na ternární sloučeninu nitrid chromu hliníku (Cr,Al)N se vylepšují mechanické vlastnosti, odolnost vůči opotřebení a korozi. [17, 18]

V současnosti se vede několik výzkumů o aplikaci oxinitridových povlaků, např. (Cr,Al)ON, pro řezné a tvářecí nástroje. Hlavní výhodou takových povlaků jsou jejich mechanické vlastnosti a odolnost vůči korozi. Oxinitridové povlaky mohou být nanášeny na nástroj např. právě metodou založenou na magnetronovém naprašování, konkrétně se jedná o spojení magnetronového naprašování jednosměrným proudem s naprašováním vysokovýkonnými pulsy (DCMS/HPPMS). Pokud se bude při povlakovacím procesu zvyšovat tok O_2 , což vede ke zvýšení podílu O_2 ve sloučenině, nebude to mít příliš velký vliv na mechanické vlastnosti. Zhorší se však přilnavost k základnímu materiálu. Z hlediska smáčivosti povrchu nástroje jsou oxinitridové povlaky znatelně méně smáčivé, než např. (Cr,Al)N. Znamená to tedy, že na povrchu nástroje ulpí méně kapalného materiálu v porovnání s nitridovým povlakem nebo i s nepovlakovaným nástrojem. Povlaky s vyšším obsahem kyslíku jsou znatelně méně smáčivé než povlaky s nižším podílem. Velice výhodná je kombinace (Cr,Al)N, kvůli dobré přilnavosti k nástroji, s vrchní tenkou vrstvou (Cr,Al)ON, pro nízké přilnutí kapalného materiálu k povrchu povlaku. [17]

2.2.3 CrN/BCN povlaky

Nitrid chromu (CrN) je už částečně popsán v předchozí podkapitole. Další prvky, kterými lze zlepšit tvrdost nebo odolnost vůči oxidaci, jsou např. hliník (Al), křemík (Si)

nebo bór (B). Přidáním právě B do sloučeniny CrN se zlepší jednak tvrdost, ale také tribologické vlastnosti. Společným nanášením vrstev CrN a BCN metodou, založenou na principu magnetronového naprašování, vznikne nanovrstvý povlak se zcela odlišnými vlastnostmi oproti pouhému povlaku CrN. [17, 18]

BCN vrstvy jsou amorfní, proto zastavují růst zrn v CrN vrstvě a jsou tedy menší než u samostatného povlaku CrN, což zvyšuje tvrdost celého povlaku. Vrstvy BCN výrazně zlepšují tribologické vlastnosti, bude tedy nízký třecí koeficient a rychlost opotřebení. [18]

Koeficient tření je u CrN povlaku téměř konstantní o hodnotě 0,5. CrN/BCN má zpočátku také hodnotu mezi 0,4 – 0,5. S dalším zatížením koeficient náhle klesne na hodnotu 0,1, což je v podstatě hodnota blízká se hranici, kdy je už možné považovat povlak za samomazný. Vícevrstvý povlak CrN/BCN je tedy velice vhodný pro aplikace, kde je žádoucí nízké tření a opotřebení s minimálním mazivem. [18]

2.3 Tepelné zpracování

Zušlechtnutím materiálu nástroje lze výrazně prodloužit jeho trvanlivost. Je nutné brát zřetel na celý proces tepelného zpracování. Při příliš nízkých hodnotách tvrdosti by došlo k předčasnému opotřebení a v případě vysokých hodnot se sníží houževnatost nástroje.

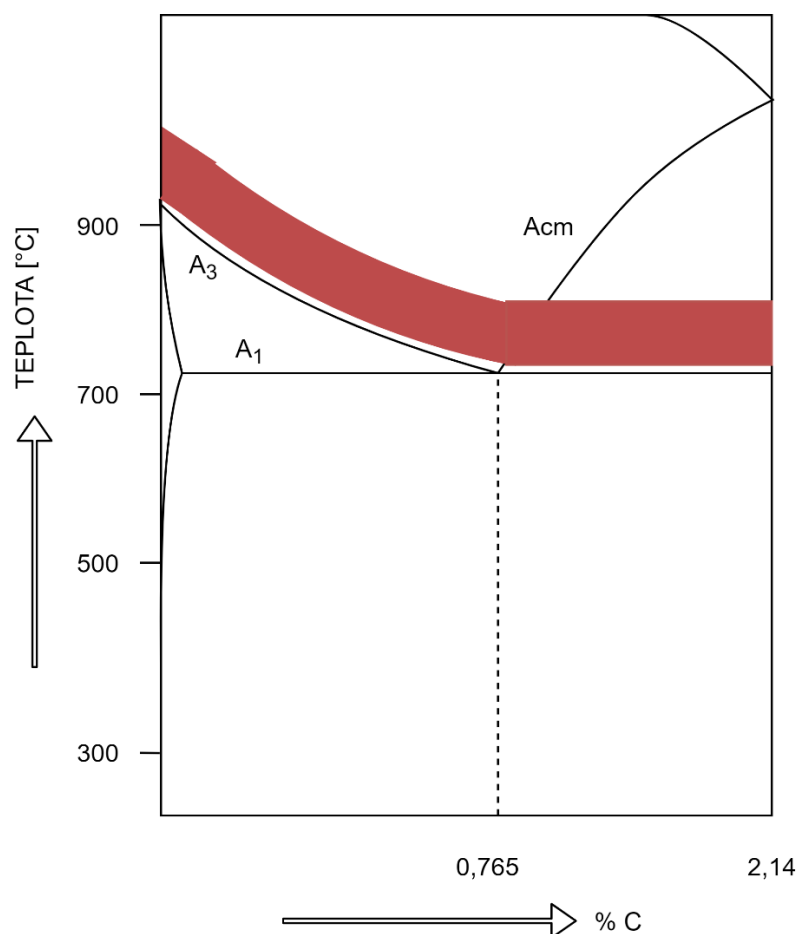
2.3.1 Konvenční metody tepelného zpracování

Žihání

V tomto procesu se polotovary ohřejí na danou teplotu, setrvají určitou dobu na téže teplotě a následuje pomalé ochlazení na vzduchu nebo v peci. Žihá se za účelem zjemnění struktury, rekrytalizace, dosažení nízké tvrdosti, ke snížení vnitřního pnutí v materiálu atd. Několik druhů žihání je již znázorněno v podkapitole 1.1 na obrázku 1.1. [20]

Kalení a popouštění

Tímto způsobem tepelného zpracování se zvyšuje tvrdost oceli díky vytvoření zcela nebo částečně nerovnovázné struktury. Povrch je pak tvrdý a odolný proti opotřebení. Kalení se skládá z ohřevu na austenitizační teplotu, setrvání na teplotě a následné prudké ochlazení např. ve vodě. Výška austenitizační teploty se odvíjí od podílu obsahu uhlíku v oceli, viz obr. 2.2. Dojde ke vzniku martenzitické nebo bainitické struktury s velmi vysokou tvrdostí. Pro dosažení martenzitické struktury musí být rychlost ochlazování stejná nebo větší, než je kritická ochlazovací rychlost. Bainitická struktura začne vznikat při rychlostech nižších než kritická rychlost. [20, 21, 22]



Obr. 2.2 Kalící teploty.

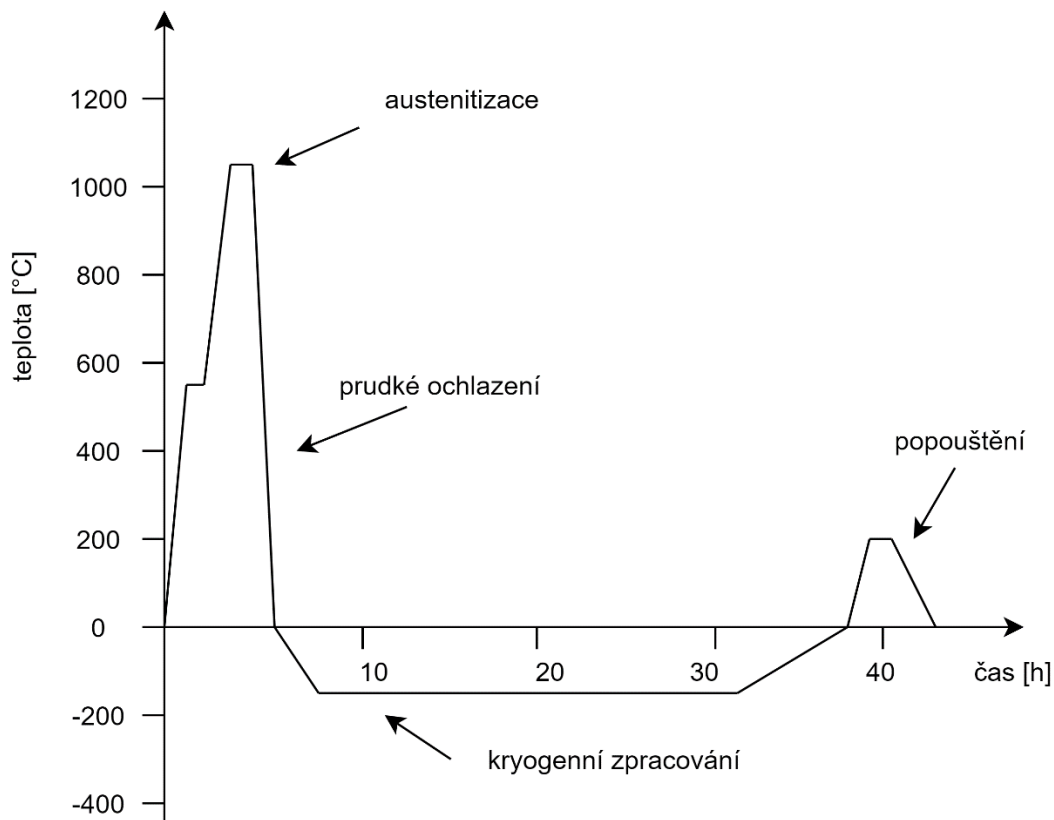
Kalená ocel je velmi tvrdá, křehká a se značným vnitřním pnutím, proto po kalení následuje popouštění. Ocel se ohřeje pod teplotu A_1 , setrvá zde dostatečně dlouhou dobu a poté se ochladí. Popouštění by mělo následovat ihned po kalení, neboť vnitřní pnutí by mohlo způsobit vytvoření trhlin v materiálu. Při teplotách do 360 °C dochází ke snížení vnitřního pnutí a rozpouštění zbytkového austenitu. U teplot do 650 °C dojde ke zvýšení houževnatosti, aniž by výrazně utrpěly pevnostní vlastnosti. [20, 21, 22]

2.3.2 Nekonvenční metody tepelného zpracování

Kryogenní zpracování

Obecně je známo, že v materiálu mohou být dva typy zbytkového napětí, a to tlakové a tahové. Tlakové je považováno za prospěšné, jelikož uzavírá trhliny a zabraňuje jejich vzniku. Tahové naopak trhliny rozšiřuje a tím vznik nových trhlin ještě posiluje. Vytvořením co největšího tlakového zbytkového napětí se mohou výrazně zlepšit celkové vlastnosti materiálu. Takové napětí lze do materiálu vnést pomocí kryogenního zpracování. Do celého procesu tepelného zpracování se zařadí ihned po ochlazení z austenitizační teploty, viz obr. 2.3. Pro dosažení kryogenních teplot se využívá tekutý kyslík (-138 °C) nebo tekutý dusík (-196 °C). Ideálnější jsou nižší teploty, protože dochází k větší transformaci zbytkového austenitu na martenzit, tudíž se vytvoří větší zbytkové tlakové napětí. Při nižších teplotách precipitují v martenzitu také karbidy o velikosti nanočástic, což má za následek celkové zlepšení v odolnosti vůči opotřebení. Je však stále nutné

na konec celého procesu zařadit popouštění, neboť součást má pořád příliš velké vnitřní pnutí, kterého se dá zbavit pouze popouštěcím procesem. [23]



Obr. 2.3 Průběh tepelného zpracování s použitím kryogenního procesu.

Tepelné zpracování ve vakuu

Zasazením konvenčního tepelného zpracování do vakua se dosáhne krátký a ekonomicky úsporný proces. Do předních výhod pak v takovém případě patří absence vrstvy oxidů, možnost sledování teploty vsázky skrze vložené termočlánky, na obsluhu není taková zátěž, rovnoměrné teplotní pole, možnost různě intenzivního ochlazování atd. Samozřejmě celý proces má i své nevýhody, zejména ve složitější aparatuře, avšak klady ve značné míře převyšují zápory, proto je dnes vakuový způsob stále rozšířenější. Dosažení teploty a její následné udržení po určitý čas kontrolují termočlánky, které jsou vloženy u součásti. Jako ochranná atmosféra i ochlazovací médium se používají vysokotlaké plyny, zejména dusík nebo jeho směsi. Dusík má totiž podstatně vyšší bezpečnost při práci než konvenční solné a olejové lázně. Chladicí médium je přiváděno přímo do topné komory. Je zajištěno konstantní chemické složení, což znamená vysokou čistotu prostředí. To způsobí, že dojde ke vzniku rovnoměrného teplotního pole a k rychlému ohřátí součásti. Pokud by vznikla netěsnost vakuové komory a dovnitř by vniklo malé množství vzduchu s oxidem uhličitým, nastalo by okamžité okoujení a zhoršení kvality povrchu. [24]

2.4 Chemicko-tepelné zpracování

2.4.1 Nitridování

Jde o proces sycení povrchu oceli dusíkem, který reaguje s látkami obsažených v oceli a vytváří tvrdou nitridační vrstvu. Nitridace probíhá kolem teplot 500 °C po dobu až 60 hodin. Uplatňuje se již na zušlechtěný materiál. Díky relativně nízkým teplotám nedochází ke vzniku vnitřního pnutí, což je velikou výhodou celého procesu, je však velmi časově náročný. Výsledná povrchová vrstva má vysokou tvrdost, odolnost proti opotřebení a únavě. Hloubka vrstvy bývá zpravidla do 0,1 mm. [25, 26, 27]

Nitridace oceli, která byla kalena za teplot nižších než 1000 °C a popouštěna pod 200 °C, vytvoří tvrdší povrchovou vrstvu než pouze u kalené oceli. Nicméně u odolnosti vůči abrazivnímu opotřebení si vede taková nitridovaná ocel výrazně hůře než referenční kalená ocel, kvůli tomu, že ze struktury se během abraze odstraňují přímo primární karbidy, které jsou nositeli tvrdosti ve struktuře. Nitridování oceli, jenž byla kalena za teplot vyšších než 1000 °C a popouštěna nad 500 °C, je o poznání lepší. Tím, že byla dosažena sekundární tvrdost a ve struktuře jsou jemnější karbidy, má ocel daleko lepší odolnost vůči otěru a celkové mechanické vlastnosti. [26]

2.4.2 Cementování

Dalším způsobem, jak zlepšit mechanické vlastnosti, je cementace. Stejně jako u nitridace se jedná o sycení povrchu materiálu nekovovým prvkem, v tomto případě se jedná o uhlík. Vysoké povrchové tvrdosti součástí se dosahuje následným kalením a popouštěním, přičemž jádro zůstává stále houževnaté. Teploty cementování se obvykle pohybují kolem 900 °C. Cementování má využití např. u ozubených a řetězových kol, čepů, drážkovaných hřídelí atd. [27]

Stále častějším zpracováním je tzv. vakuové cementování. To má využití zejména ve vysoce pokročilých procesech zpracování součástí pro letecký a automobilový průmysl. Hlavními výhodami vakua během procesu, jak je již uvedeno dříve v textu, je zkrácení celkového času zpracování, nedochází k oxidaci na povrchu materiálu, vysoká efektivita a nižší spotřeba energie. Další výhodou je vznik tlakového zbytkového napětí na povrchu. Díky tomuto napětí se může výrazně prodloužit životnost např. součástí namáhaných na vysokocyklickou únavu. [28]

2.5 Chlazení nástroje

2.5.1 Způsoby přenosu tepla

Teplo se do nástroje může dostat třemi způsoby, a to kondukcí (vedení), konvekcí (proudění) a radiací (sálání). Stejnými způsoby se však totéž teplo může nástroji odebrat.

Konduktce – Jedná se o vedení tepla v materiálu. Jakou rychlostí se bude teplo materiálem přenášet určuje tzv. tepelná vodivost materiálu. Dochází k vnitřnímu přenosu tepelné energie z míst s vyšší teplotou do míst s nižší teplotou vzájemnými srážkami částic materiálu. V praxi to následně znamená, že nástroj získává teplo z ohřátého materiálu, se kterým je v kontaktu. Částice s vyšší energií z materiálu předávají tuto energii částicím z nástroje, ve kterém se toto teplo dál šíří. Pokud je nástroj v opakovaném kontaktu

s materiálem s vyšší teplotou za relativně krátký časový úsek (např. sériová výroba), dochází ke kumulaci tepla v nástroji a snížení jeho trvanlivosti. [29]

Snadným řešením tohoto problému je snížení počtu styků nástroje s materiálem. Nástroj setrvává v klidu, než dojde k vnitřnímu vyrovnání teplot a poté se toto teplo odvede přirozenou konvekcí. Z ekonomického hlediska to ovšem není dobré řešení, neboť se jedná o poměrně dlouhou dobu, kdy nebude nástroj vyrábět a výrobci tak bude ucházet zisk.

Dalším, a rychlejším, možným řešením je, aby teplo z nástroje bylo přenášeno přímým dotykem do jiného, chladnějšího, materiálu. Avšak ani tento způsob by v sériové výrobě neměl přílišné uplatnění.

Konvekce – Přenos tepla se také může odehrávat mezi pevnými látkami a kapalinami nebo plyny.

Přenos konvekcí se dělí na:

- přirozený,
- nucený.

U přirozené konvekce nástroj samovolně předává teplo okolní kapalině nebo vzduchu, který se díky změně hustoty odnáší dále od materiálu.

Pokud by se toto proudění okolního prostředí urychlilo (např. ventilátorem), nastává konvekce nucená. Vzhledem k většímu průtokovému množství prostředí se dokáže odvést mnohonásobně větší podíl tepla než u přirozené konvekce. [30]

V praxi takto funguje téměř většina chladicích systémů. Nástroj může být chlazen konformně, kde v soustavě kanálů proudí chladicí kapalina, která konvekcí přejímá teplo z nástroje, následně jej odvádí a předává dál např. do chladiče. Zpět se vrací již ochlazená kapalina a celý cyklus znovu pokračuje. Dalším způsobem je přímé chlazení. Na nástroj míří přímý proud chladicího média, které konvekcí teplo přebírá. Metody přímého a konformního chlazení jsou detailněji popsány v následující podkapitole 2.5.2.

Dále lze rozdělit proudění z hlediska hydrodynamického:

- laminární – částice proudí v jednotlivých, rovnoběžných vrstvách,
- turbulentní – chaotické, neuspořádané víření částic.

Při obtékání tělesa kapalinou nebo plynem se na povrchu tvoří tzv. mezní vrstva. Ta je charakteristická tím, že začíná na povrchu tělesa, kde je rychlost proudění nulová v důsledku ulpívání částic na povrchu, a končí v takovém místě, kde je rychlost rovna 99 % z celkové rychlosti proudění. [31]

Také mezní vrstva může být laminární nebo turbulentní. V laminární se teplo šíří kondukcí, což znamená, že klade určitý odpor při průchodu tepla touto vrstvou, jelikož vzduch má jinou vodivost oproti oceli. V případě turbulentní vrstvy je vodivost vzduchu zanedbatelná a nehraje příliš velkou roli. [31]

Radiace – Stejně jako v případě kondukce, dochází ke změnám vnitřní energie tělesa. Zde ovšem dále nastává takový efekt, že těleso vydává záření ve formě elektromagnetických vln do prostoru, který těleso obklopuje. Část záření, které dopadlo na nové těleso, se pohltí, část se odrazí a zbylá část tělesem projde. Jaký podíl se pohltí

a odrazí určuje nejen jakost povrchu, ale také jeho barva. Nejvíce záření odrazí světlé a lesklé povrchy. Naopak nejvíce jej pohltí tmavé a matné povrchy. [32]

Radiaci lze využít pro chlazení na atomární úrovni, např. pomocí laseru. Laser je světlo ve formě úzkého svazku. Světlo se skládá z fotonů, které mají určitou hybnost a energii. V podstatě se jedná o druh elektromagnetického vlnění. Laser je primárně využíván pro ohřívání na rekordně vysoké teploty, kdy se především ukládá energie fotonů. [32, 33]

Lze jej využít také pro chlazení. V tomto případě se ukládá hlavně hybnost fotonů. Atomy všech těles, plynů nebo kapalin jsou v neustálém pohybu. Čím je jejich teplota vyšší, roste také jejich rychlost pohybu. Princip laserového chlazení tkví v tom, že svazek fotonů proudí proti pohybu atomů a je naladěn na nepatrně nižší frekvenci. Chlazení funguje na několika úrovních. První je tzv. Dopplerovo chlazení. To posune frekvenci laseru tak, aby došlo k absorpci. Atomu je předána energie a impuls a jeho pohyb se zpomalí. Další úrovní je tzv. Zeemanův posuv v měnícím se magnetickém poli solenoidu, který zabezpečuje postupné doladování přechodu během postupného zpomalování atomů. [32, 33]

2.5.2 Metody chlazení

Chladicí médium může proudit vnitřní částí nástroje (konformní) a ochlazovat tak jeho celý objem nebo se přivede přímo na povrch nástroje.

Chlazení kapalinou

Konformní chlazení – V nástroji je vytvořena soustava chladicích kanálů, jejichž hlavní výhodou je chlazení v celém objemu nástroje. Vznikne uzavřený chladicí okruh, tudíž nedochází ke znečištění pracoviště a ani ke ztrátám chladicí kapaliny. Značnou nevýhodou je samotná výroba takto vnitřně chlazeného nástroje. Jedním způsobem, jakým lze utvořit síť kanálů, je navrtání stávajícího nástroje. Jde o relativně snadnou metodu, bohužel lze utvořit pouze jednoduchý systém kanálů a může být také narušena pevnost celého nástroje. Pro vytvoření složitějšího systému je nutné vyrobit nástroj zcela nový za pomoci složitějších technologií, např. slinování. Zvýší se tudíž cena nástroje a na daném technologovi je pak rozhodnutí, zdali je taková metoda chlazení opravdu přínosná.

Přímé chlazení – K nástroji je přivedena koncová tryska chlazení a přímým paprskem chladicího média je nástroj ochlazován. Jedná se však o poměrně problematický způsob chlazení nástroje. U tváření za studena může značně přispět ke snížení tření mezi materiálem a nástrojem, např. válcování. Při tváření za tepla je rozhodujícím faktorem pracovní teplota, která překračuje bod varu chladicích kapalin a docházelo by k rychlému odpaření. V případě olejových médií by mohlo vlivem teplot docházet k jejich vzplanutí. Přes mnohé nepřízně má však přímé chlazení své využití, a to ve formě vysokotlakého ostříku u válcování za tepla. Před projetím ohřátého materiálu válcovací stolicí je materiál zbaven povrchových nečistot, zejména okují, pomocí ostříku pod vysokým tlakem. Okuje by byly pod válci zatlačeny do materiálu a snížily by jakost a mechanické vlastnosti výsledného materiálu. Tento ostřík má také za úkol mazání kalibračních válců, čímž se snižuje jejich opotřebení.

Chlazení plynem

Hovořit o konformním chlazení plynem nemá příliš smysl, neboť účinnost by byla zanedbatelná, proto se v praxi používá pouze přímé chlazení. Převážně se jako chladicí médium používá stlačený vzduch, ovšem pro speciální účely lze použít i plyny, jako např. dusík. O stlačeném vzduchu se hovoří jako o velice čistém způsobu chlazení nástroje. Jeho přední výhodou je že nehoří, nevybuchuje a pracoviště neznečišťuje, tak jako je tomu u přímého chlazení kapalinou. Jeho hlavní nevýhodou je, že samotný vzduch má pouze chladicí účinek, nikoli mazací. Avšak vhodnou úpravou jeho složení lze docílit částečného mazacího efektu. Toto řešení má využití hlavně u tváření za nízkých teplot. Pokud se jedná o tváření za tepla, mazací účinek toho typu chlazení je zcela zanedbatelný. Značnou nevýhodou je také poměrně vysoké nebezpečí pro obsluhu stroje. Zbytky materiálu se totiž mohou z nechráněného prostoru nástroje rozptýlit do prostoru obsluhy.

3 APLIKACE CHLAZENÍ STŘIŽNÉHO NÁSTROJE POMOCÍ STLAČENÉHO VZDUCHU

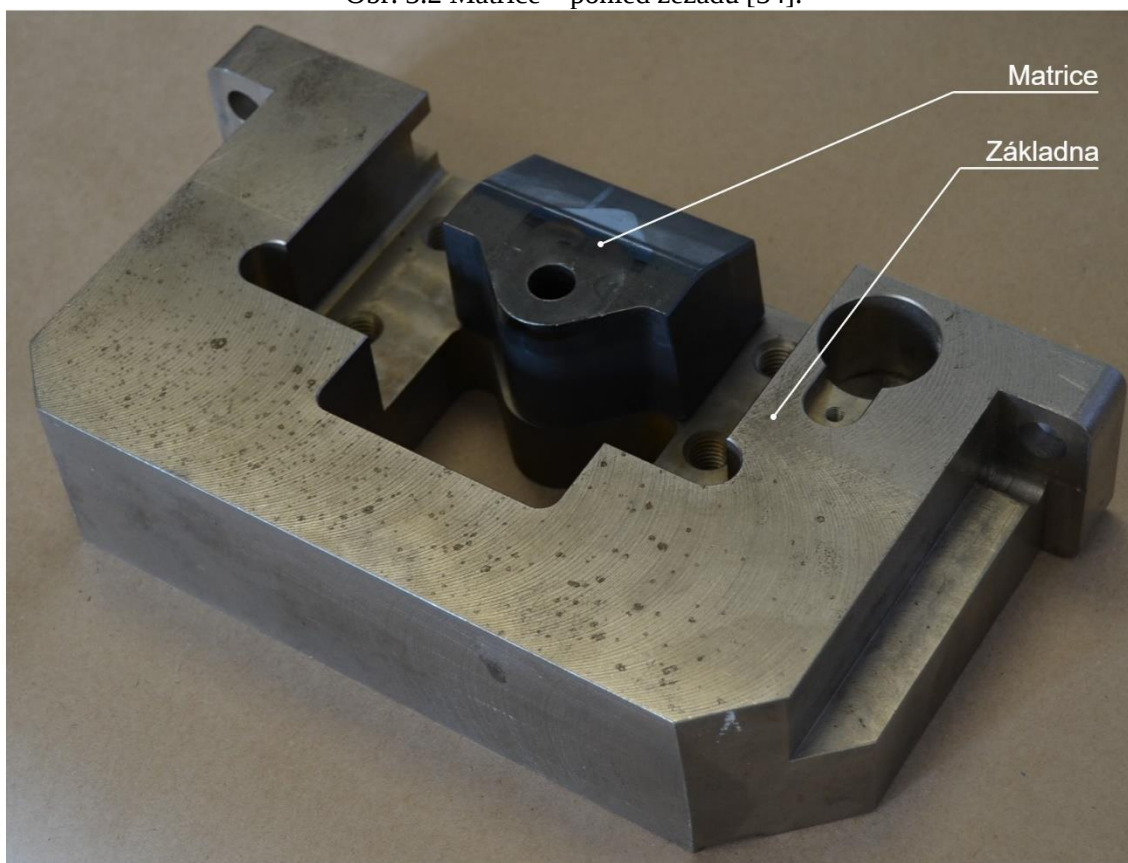
Cílem této části práce je vyhodnotit, jaký vliv má působení stlačeného vzduchu na střižný nástroj, konkrétně se jedná matrici pro střižnou aplikaci, viz obr. 3.1 a 3.2. Experiment byl proveden v blíže nespecifikované firmě zabývající se výrobou součástí pro automobilový průmysl.



Obr. 3.1 Matrice – pohled zepředu [34].



Obr. 3.2 Matrice – pohled zezadu [34].



Obr. 3.3 Základna s matricí před úpravou chlazení [34].

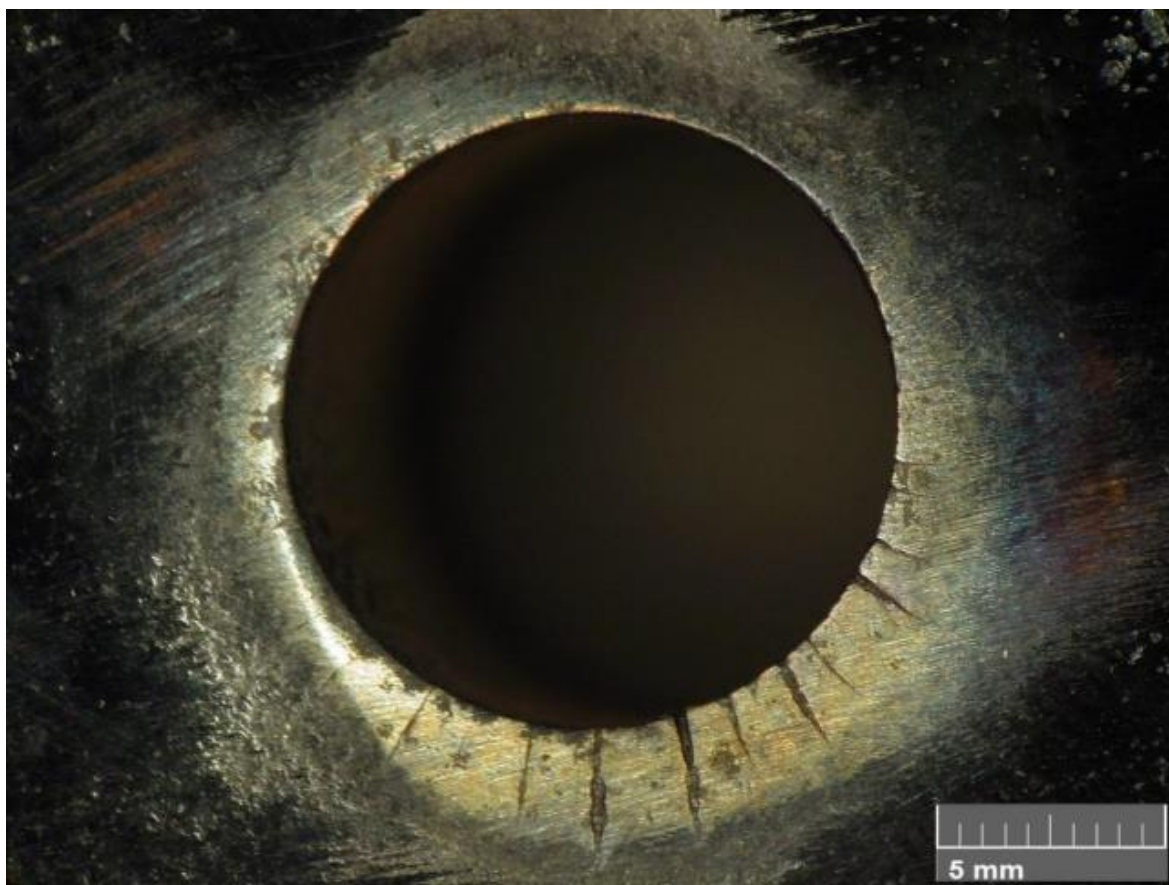
3.1 Popis původního stavu

Matrice slouží k vytvoření koncového prvku výrobku v několika krocích. Tento prvek je zobrazen na obrázku 3.7. Nejprve se zalisuje koncová část profilu výrobku, poté se přebytečný materiál zastříhne, tím se na konci výrobku vytvoří rádius a střižníkem se současně prostříhne otvor, který slouží k uchycení dalších komponentů přímo v místě aplikace výrobku. Střižník cestuje otvorem, který je utvořen v matrici. Celkem se na výrobku vytvoří dva koncové prvky. Celý tento proces výroby probíhá za vysokých teplot, které nejsou blíže specifikované. Jedná se tedy o tváření za tepla.

Na obrázku 3.3 je možné vidět základní sestavení nástroje. Matrice je uchycena v základně pomocí vymezovacího klínu. Do formy je následně vsazen střižník. Celá tato sestava je usazena na horní hydraulickou čelist stroje. Na spodní čelist je usazena totožná základna s matricí, avšak bez střižníku. Mezi tyto čelisti je vložen za pomoci robotického ramene již nahřátý materiál a následuje cyklus výroby koncového prvku výrobku. Pracovní místo stroje je ofukováno z externího přívodu stlačeného vzduchu pomocí trysky, za účelem odstranění okují a nečistot.

Teplo z materiálu se přímým dotykem přenáší do nástroje, ve kterém se následně kumuluje. Nástroj teplo velice špatně odvádí, což má za následek snížení trvanlivosti, rychlejší opotřebení a vznik teplotních trhlin kolem střižné hrany nástroje, viz obr. 3.4.

Za účelem odebrání tepla z nástroje se přivede proud stlačeného vzduchu do okolí střižné hrany, jelikož se jedná o nejkritičtější oblast na nástroji.



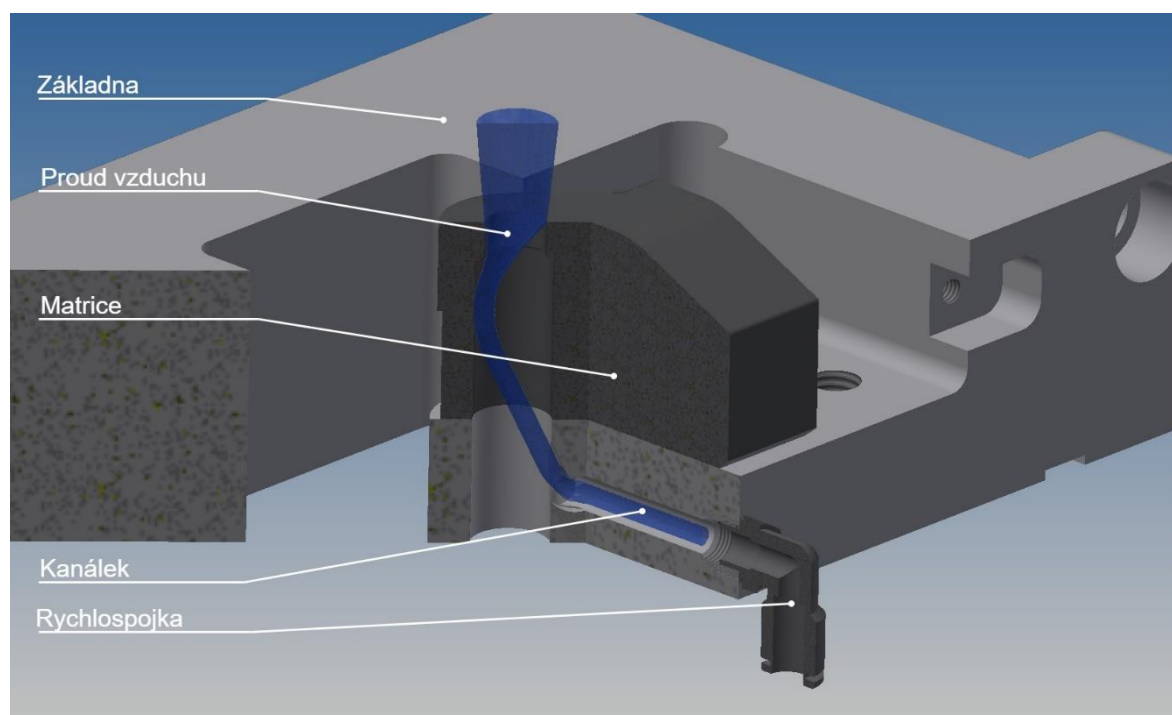
Obr. 3.4 Nástroj s trhlinami [35].

3.2 Aplikace stlačeného vzduchu

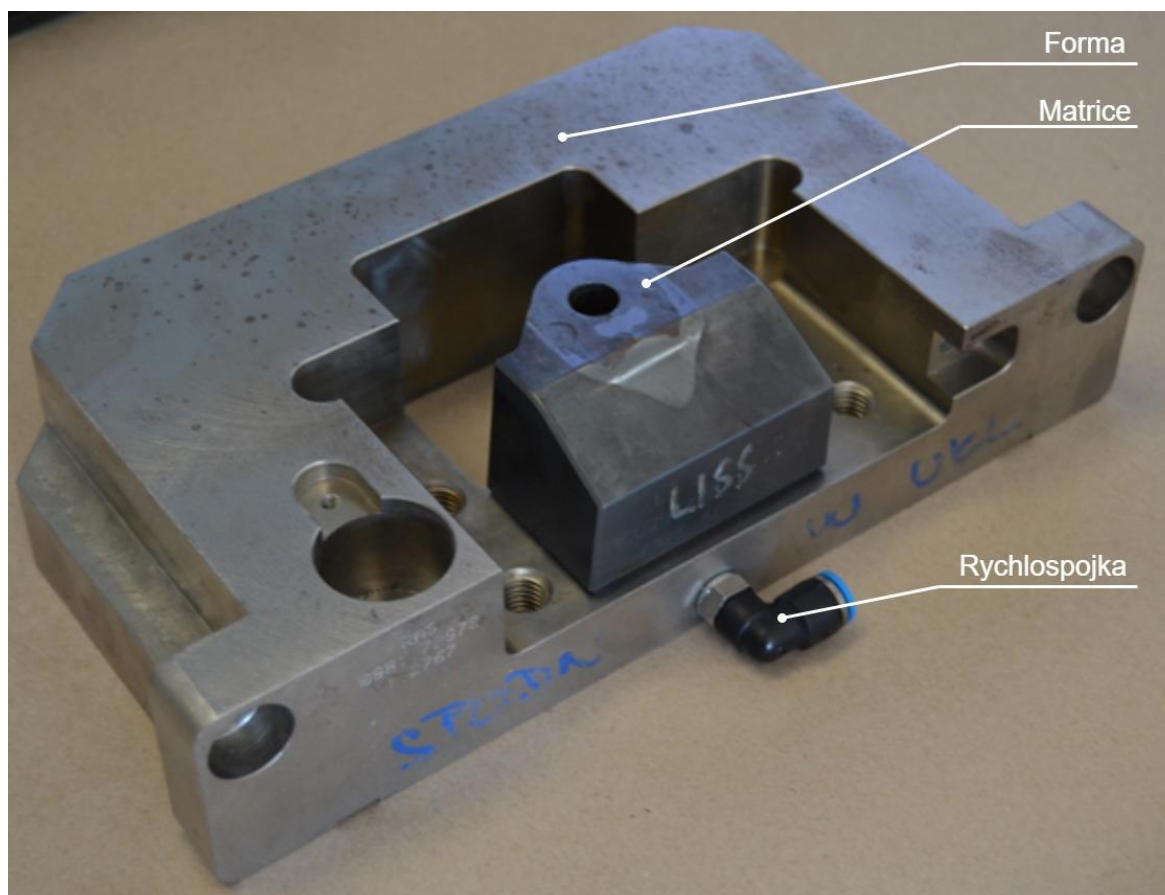
Pro chlazení vzduchem se využije stávající konstrukce střižnice a není tedy nutné do jejího tvaru jakkoli zasahovat. Nedojde tím ke zhoršení pevnosti nástroje. Vzduch bude proudit již zhotovenou dírou, kterou cestuje střižník. Pro přívod vzduchu se využije stávající rozvod, na který je napojená i tryska, která čistí pracovní prostor.

Upraví se základna, ve které je matrice uchycena, a to vytvořením kanálu, kterým bude proudit vzduch, viz obr. 3.5. Úprava se týká pouze základny upevněné na spodní čelisti stroje. Takto bude proud stlačeného vzduchu ovlivňovat střižnou hranu obou nástrojů. Nově vzniklý kanál musí proudění správně usměrnit až do místa otvoru matrice. Kanál je vytvořen pomocí metody EDM – hloubení, je ale také možné využít konvenční metody vrtání s použitím vhodných nástrojů. K připojení stlačeného vzduchu je využita rychlospojka. Výsledné sestavení je možné vidět na obrázku 3.6. [34]

Tlak stlačeného vzduchu pro chlazení nástroje je 5,5 bar. Celkový čas sepnutí spínače stlačeného vzduchu je 11 sekund. Pro výrobu jednoho kusu výrobku se spínač sepne dvakrát. Nejprve mezi vystřižením jednoho a druhého koncového prvku výrobku. Při rotaci robotického ramene, za účelem vystřižení koncových děr, vzniká prodleva 3 sekundy. Tehdy se spínač stlačeného vzduchu sepne a opět vypne. Podruhé se sepne, když dochází k odložení již hotového výrobku a uchopení nového výrobku. Tato část má 8 sekund. Dohromady je tedy 11 sekund doby stlačení vzduchu na výrobu jednoho kusu výrobku.



Obr. 3.5 Řez nástrojem po úpravě chlazení (podle Slaný M., Píška M.) [34].



Obr. 3.6 Základna s matricí po úpravě chlazení [34].

3.3 Rozbor technologických výsledků

Kontrola stavu nástroje se primárně provádí vizuálním zhodnocením výrobku. Tím, že nástroj prostřihává a lisuje materiál, vtiskává do něj také i své vady. Obsluha stroje provádí v pravidelných intervalech kontrolu náhodně vybraného kusu, zdali splňuje požadovaná kritéria. Kontroluje se celkový vzhled vystřiženého otvoru, čistota hrany a její okolí, tedy absence vzniklých trhlin a defektů z nástroje. Dále obsluha sleduje geometrické a rozměrové tolerance na speciálním stanovišti. Na obrázku 3.7 a 3.8 je zobrazen koncový prvek výrobku, který prošel kontrolou obsluhy, je tedy ve stavu tzv. „OK“. Pokud výrobek již nesplňuje výrobní požadavky, nástroj je vyměněn za nový.



Obr. 3.7 Vzhled koncového prvku ve stavu tzv. „OK“.



Obr. 3.8 Koncový prvek ve stavu tzv. „OK“.

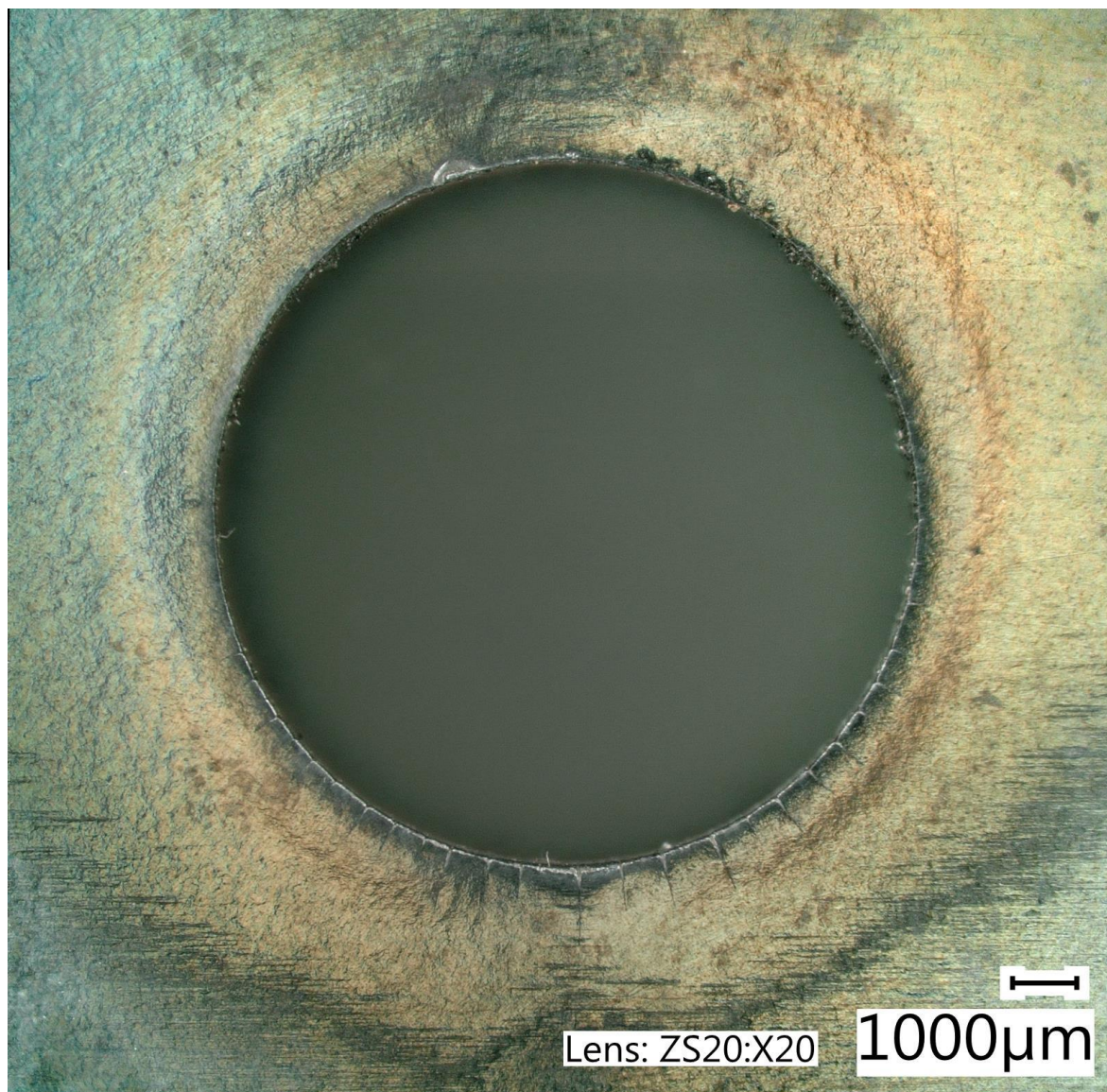
Byl kontrolován pouze nástroj upevněný v horní základně, protože se očekávají obdobné výsledky i na spodním nástroji. Střížná hrana nástroje byla monitorována pomocí mikroskopu. Počet kontrol s počtem vyrobených kusů je uveden v tabulce 3.1. Do počtu 582 kusů byla doba spuštění vzduchu pouze 2 sekundy. Za účelem zlepšení účinku chlazení byl původní čas zvednut na 11 sekund. Nejedná se o výsledný počet kontrol a počet vyrobených kusů, jelikož experiment byl pozastaven z důvodu odstávky výroby ve firmě, kde je projekt uskutečněn.

Tab. 3.1 Počet kontrol nástroje s počtem vyrobených kusů.

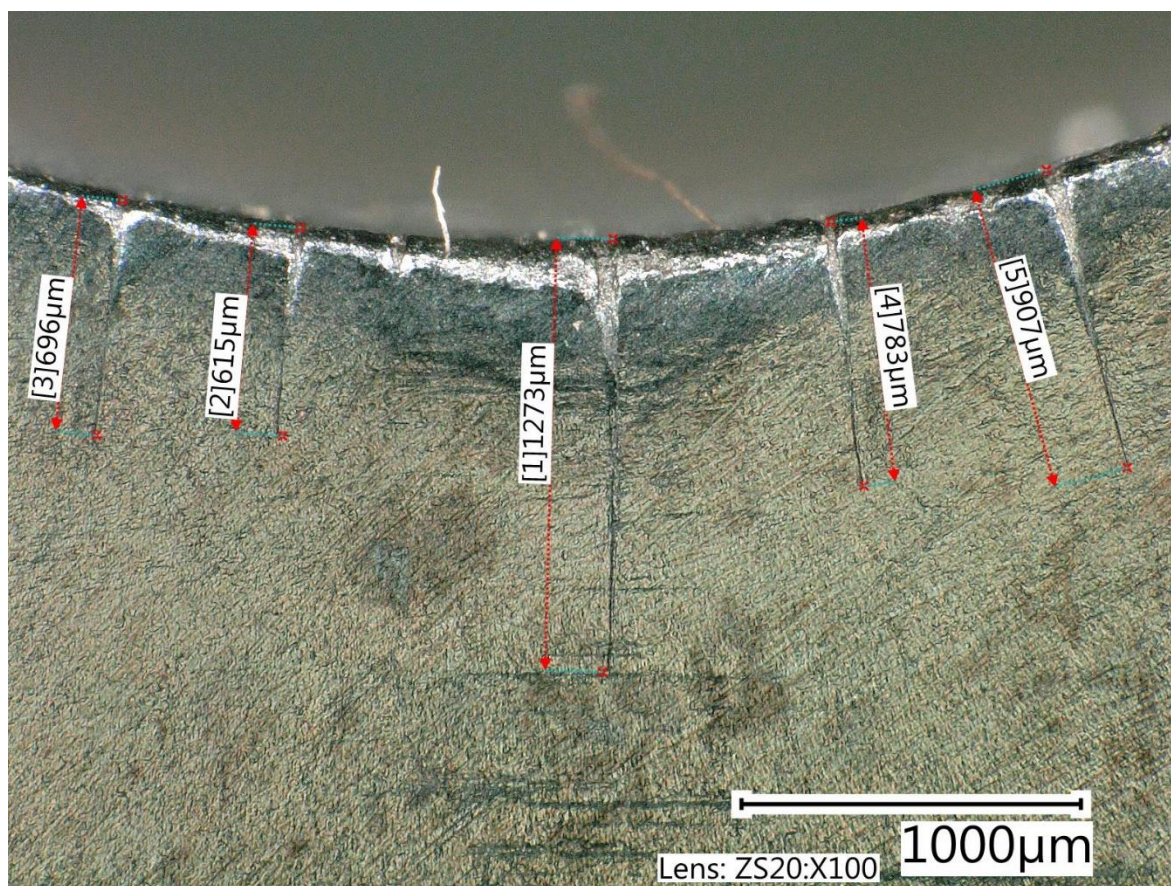
Číslo kontroly mikroskopem	Počet kusů vyrobených nástrojem
1.	3 543
2.	5 163
3.	8 562
4.	15 131

První kontrola

Na obrázku 3.9 je zobrazena celá střižná hrana. Na obrázku 3.10 jsou detailněji zabrány trhliny. Vzhledem k tomu, že nejvíce namáhaná část střižné hrany na teplotní únavu je spodní polovina, jsou okótovány pouze jedny z největších trhlín v této oblasti.



Obr. 3.9 Kontrola 1 – přehled střižné hrany.



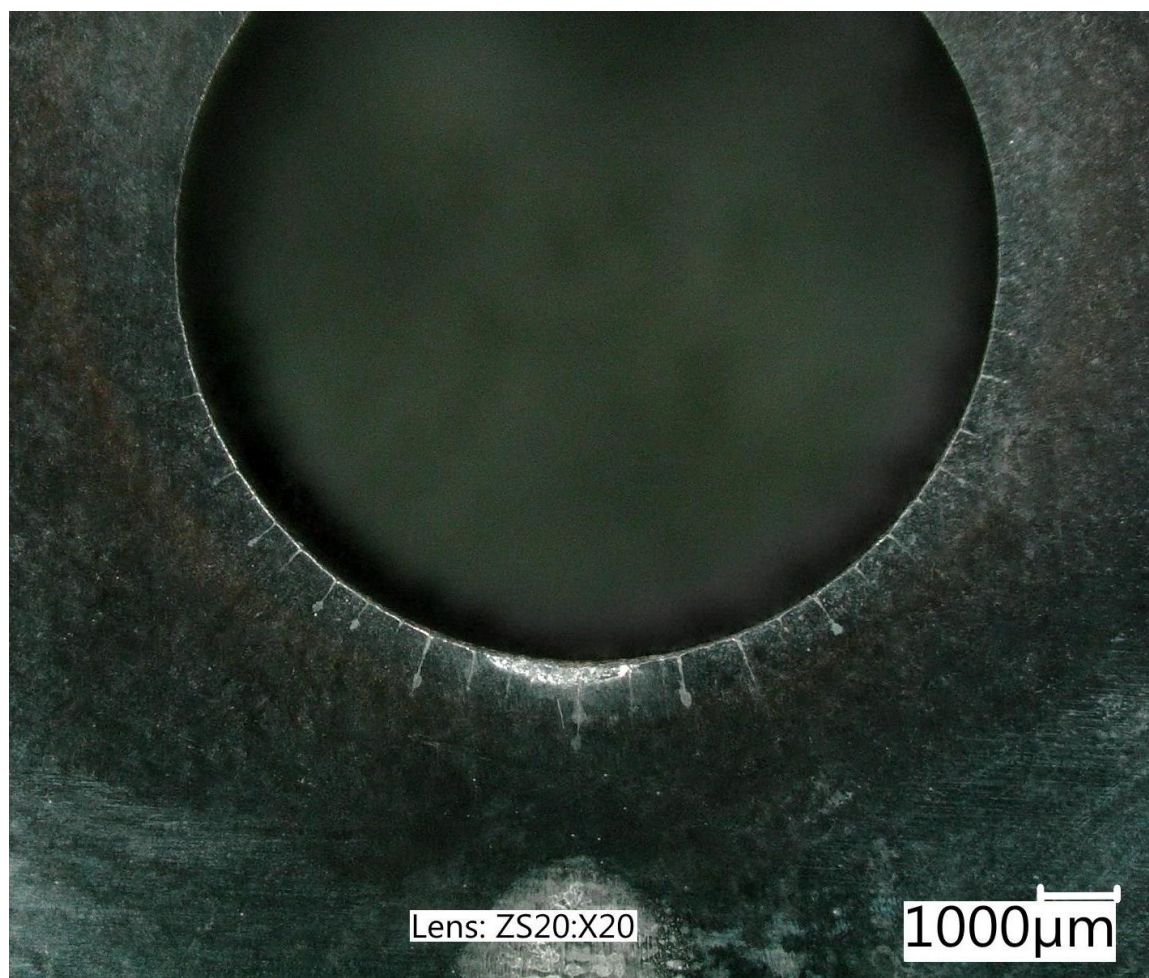
Obr. 3.10 Kontrola 1 – délky trhlin.

Druhá kontrola

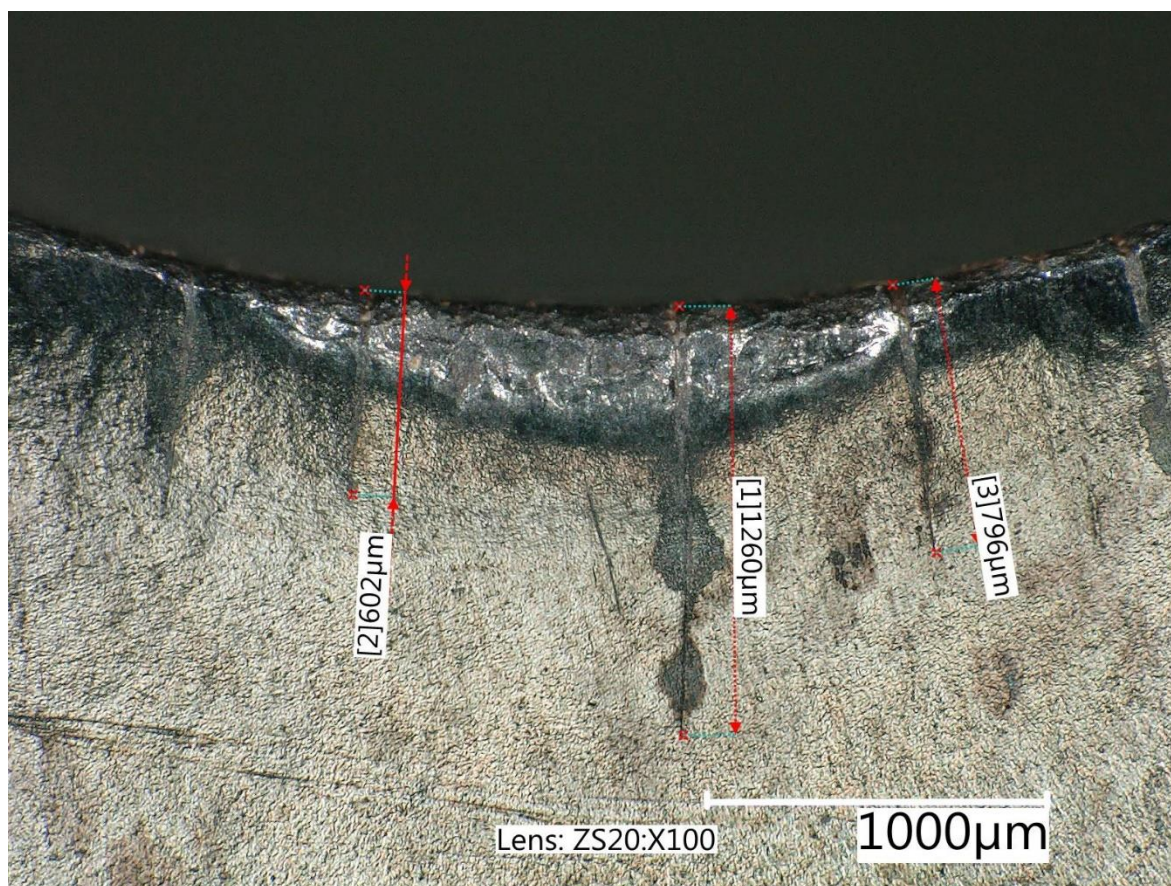
Na obrázku 3.11 je zobrazena střižná hrana. Je vidět pouze spodní část, jelikož na horní části nenastaly žádné změny. Již je patrný defekt přesně v polovině spodní části střižné hrany. Na výrobní kvalitu tento stav stále nemá žádný vliv.

Na obrázku 3.12 jsou okótovány trhliny. Defekt ve spodní polovině značně znesnadňuje přesné určení délky trhlin.

Kóty oproti prvnímu měření se jeví menší v řádech desítek mikrometrů. To může být způsobeno nepřesností měření délky trhlin nebo nově vzniklým defektem. K jeho vzniku přispělo mechanické poškození, ať už obsluhou při kontrole nástroje nebo špatným seřízením stroje.



Obr. 3.11 Kontrola 2 – přehled střížné hrany.

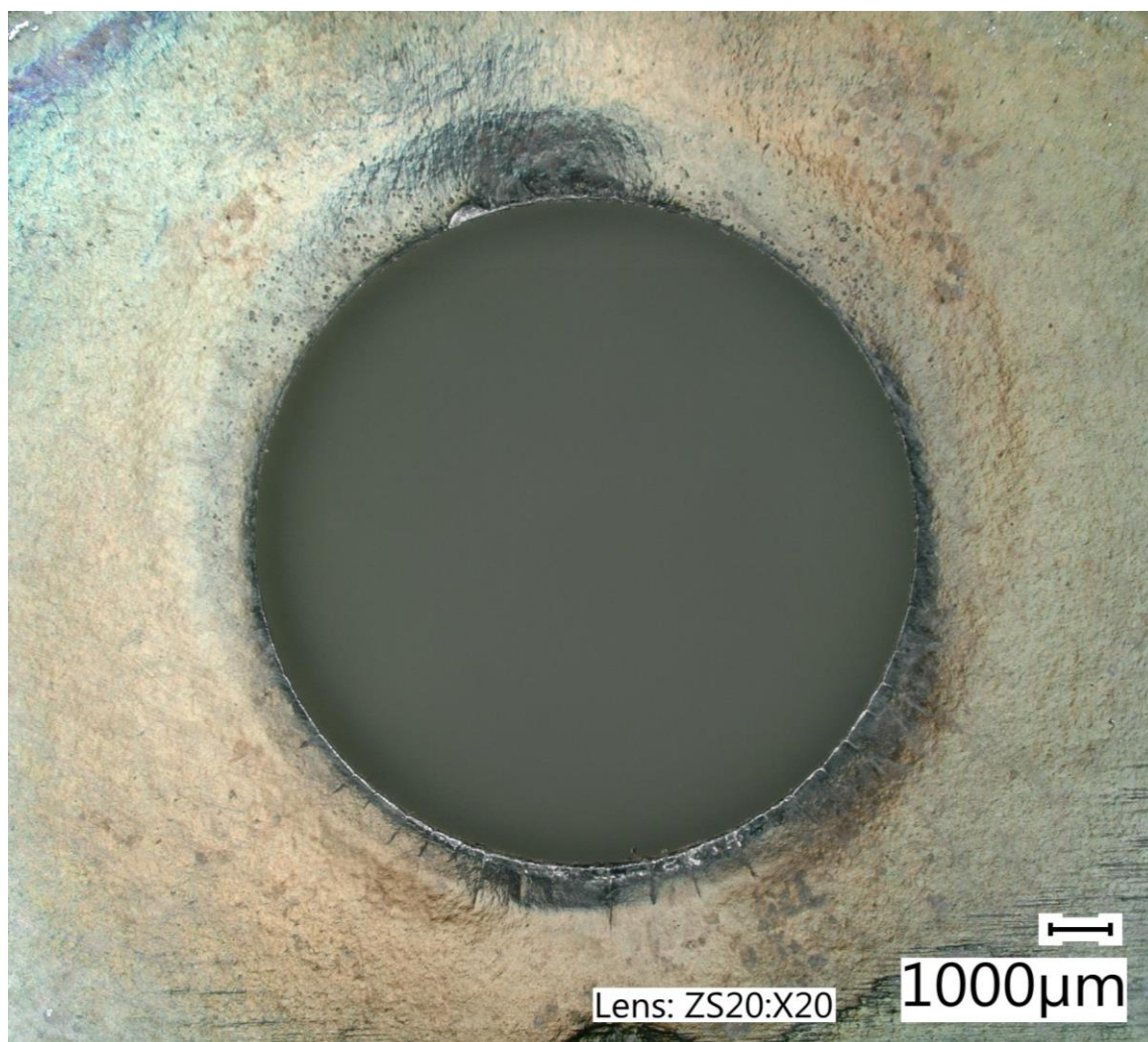


Obr. 3.12 Kontrola 2 – délky trhlin.

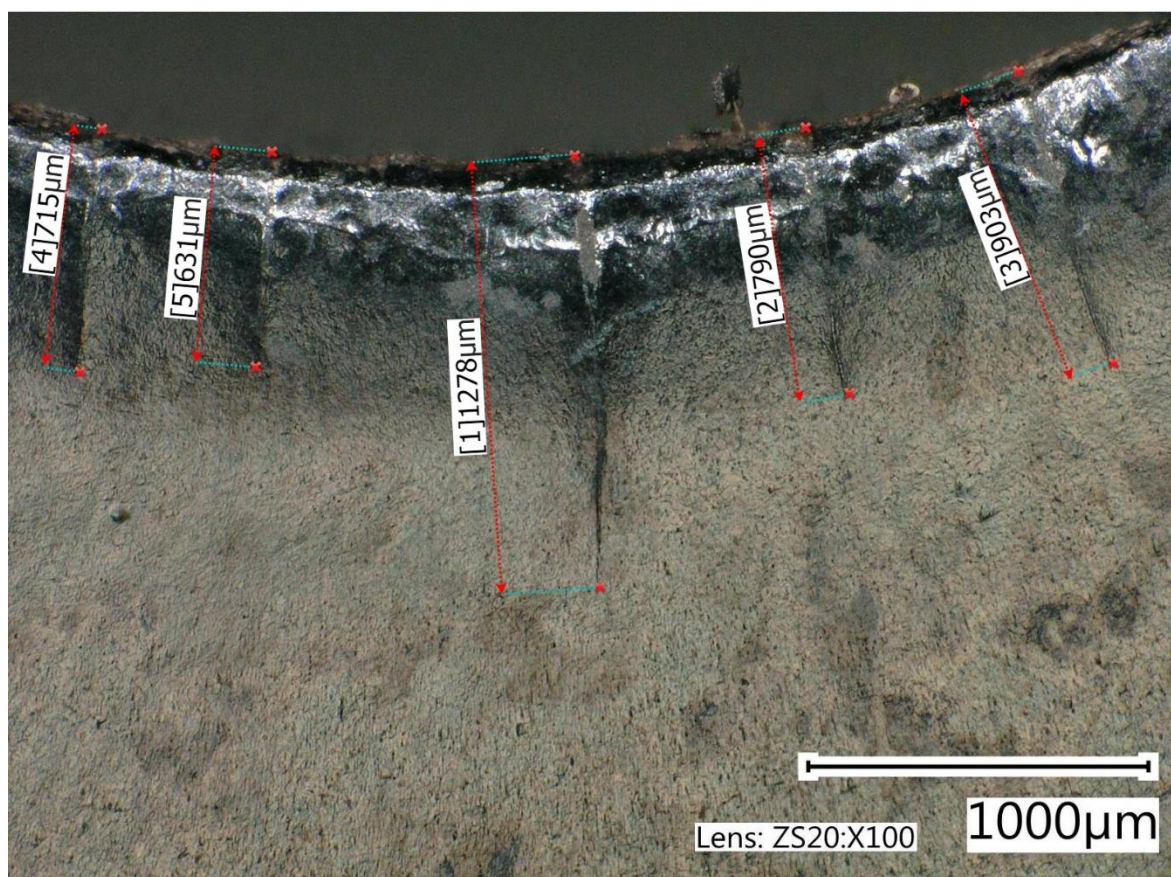
Třetí kontrola

Na matrici je patrné již částečné opotřebení, viz obr. 3.13. Trhliny razantním způsobem nerostou, avšak dochází k jejich postupnému rozšiřování a prohlubování, viz obr. 3.14. Na výrobní kvalitu tento stav stále nemá žádné negativní účinky.

Z jednotlivých měření vyplývá, že střížná hrana je také vystavena mechanickému poškození a postupně se otupuje. To může být způsobeno špatným seřízením stroje a tím dochází ke kolizi střížníku a střížnice.



Obr. 3.13 Kontrola 3 – přehled střížné hrany.



Obr. 3.14 Kontrola 3 – délky trhlín.

Čtvrtá kontrola

Celá matrice je zobrazena obrázku 3.15 a 3.16. Experiment bylo nutné pozastavit z důvodu odstávky výroby ve firmě. Pracovní plocha nástroje je blíže zobrazena na obrázku 3.17. Povrch nástroje a střížná hrana je ve zvětšení zobrazena na obrázku 3.18, 3.19 a 3.20.



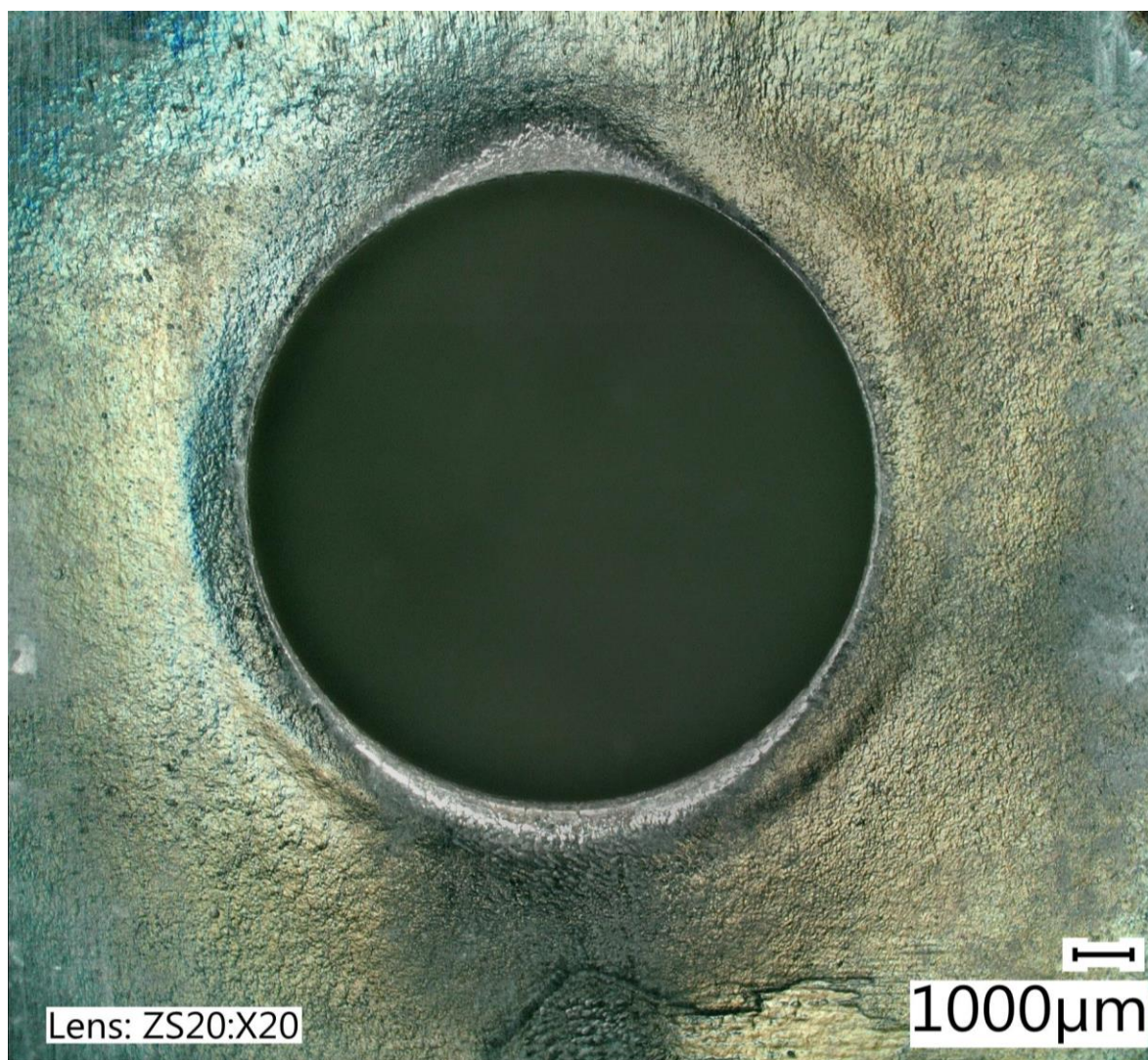
Obr. 3.15 Kontrola 4 – pohled zepředu na nástroj.



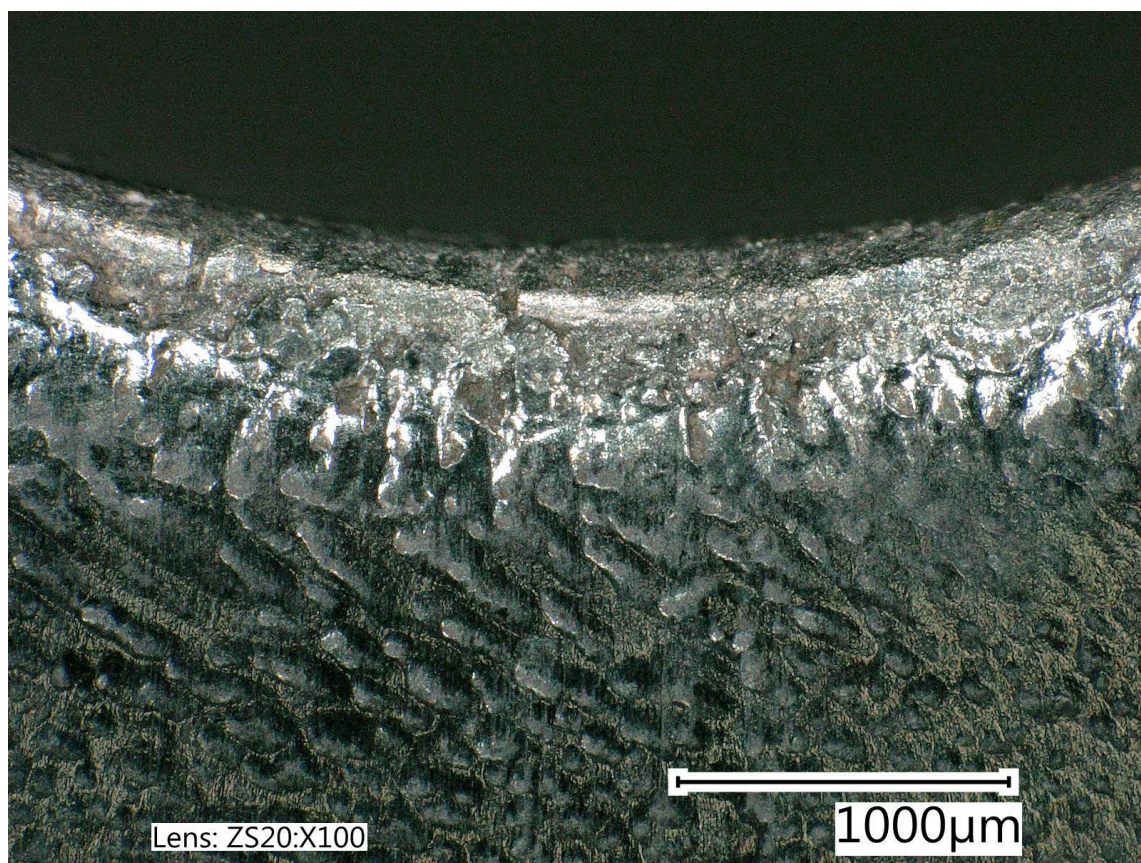
Obr. 3.16 Kontrola 4 – pohled zezadu na nástroj.



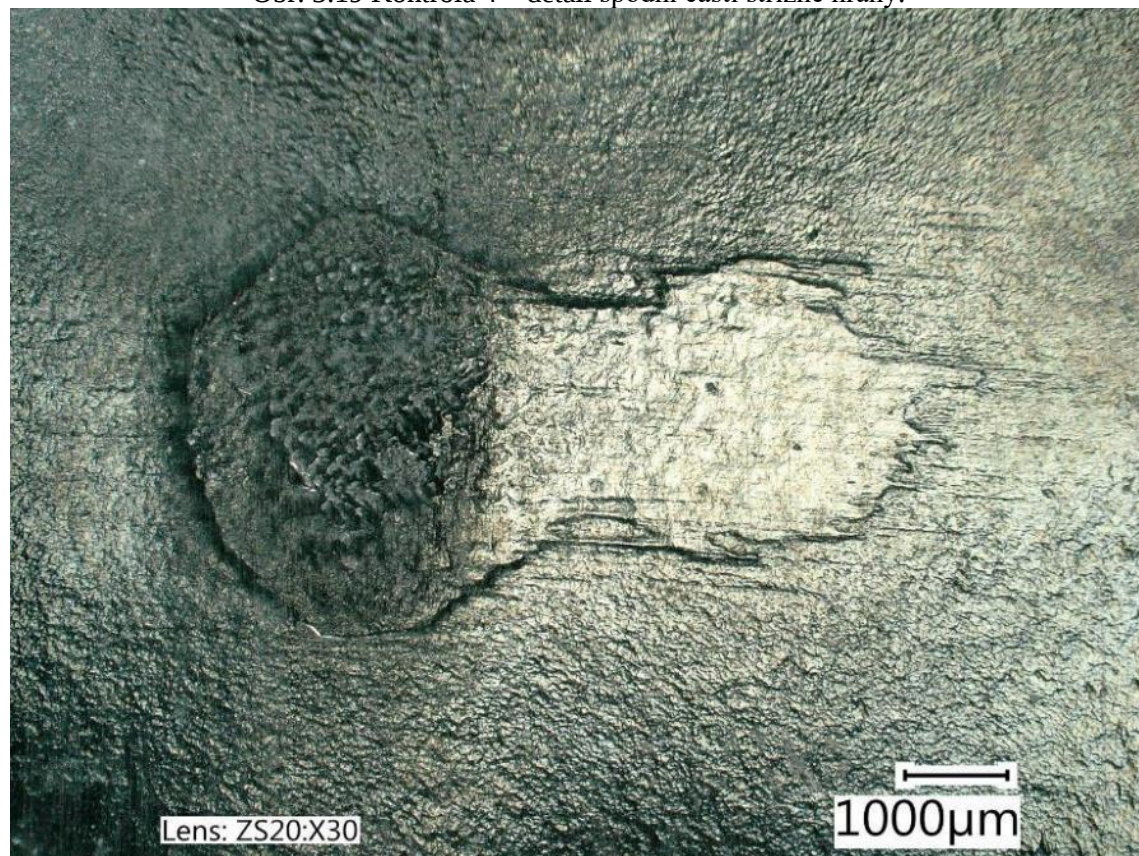
Obr. 3.17 Pracovní plocha nástroje.



Obr. 3.18 Kontrola 4 – přehled střížné hrany.



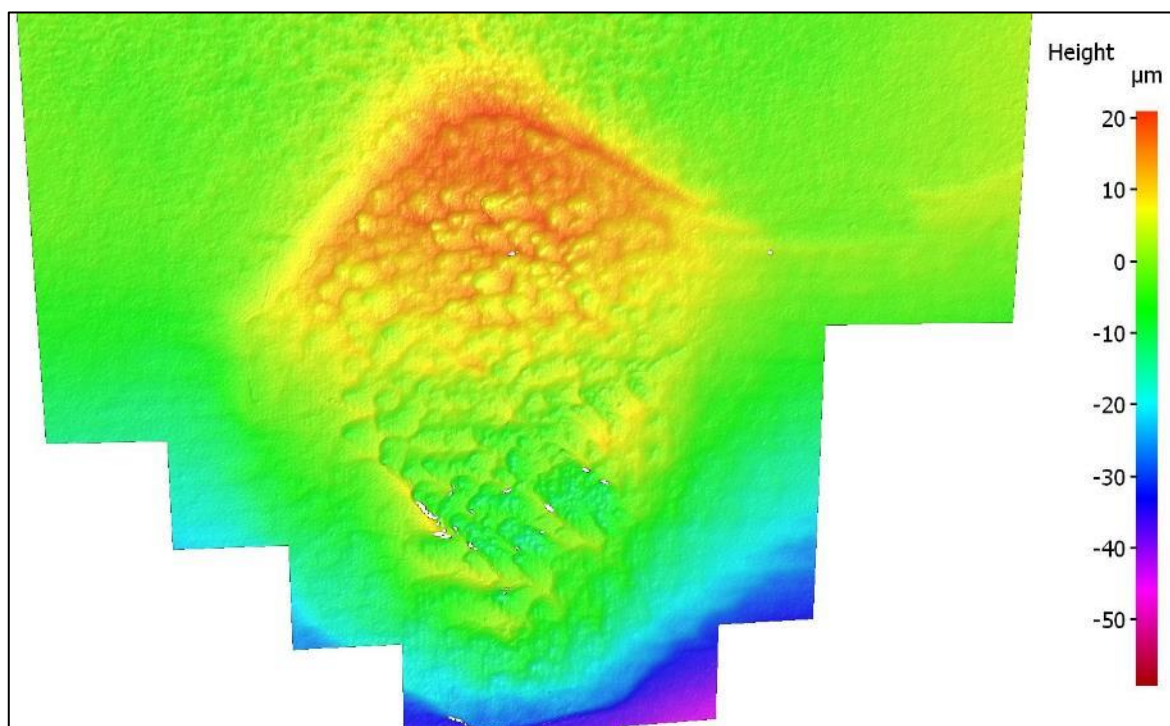
Obr. 3.19 Kontrola 4 – detail spodní části střížné hrany.



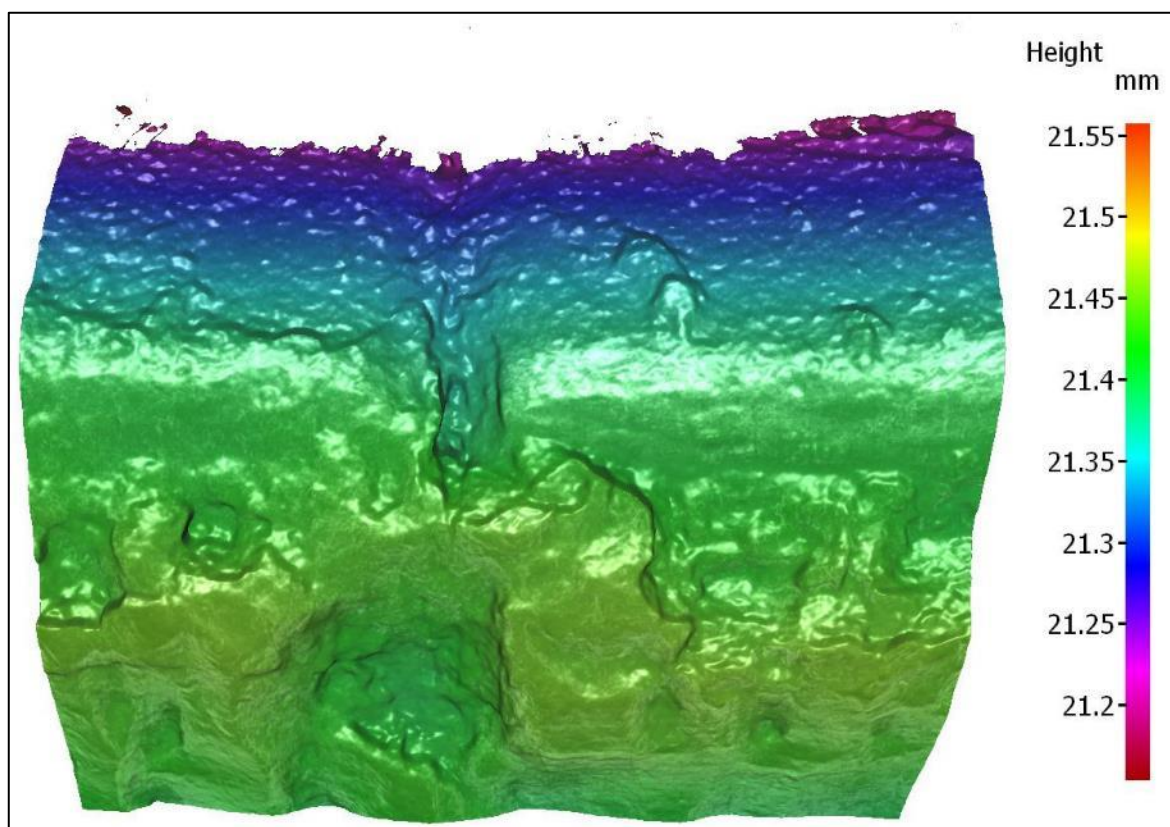
Obr. 3.20 Kontrola 4 – detail části pracovní plochy nástroje.

Po detailnějším vyhodnocení bylo zjištěno, že na pracovní ploše nástroje a v okolí střižné hrany došlo k ulpění částic materiálu z výrobku a vytvoření jisté formy vazby. Na pracovní ploše nástroje je místo, kde je toto ulpění materiálu nejmarkantnější, viz obr. 3.17. Na obrázku 3.21 je zobrazeno totéž místo se znázorněním výšky povrchu.

Trhliny na střižné hraně jsou stále patrné, částečně se však skryly pod vrstvou materiálu z výrobku, viz obr. 3.22. Detailněji jsou zabrána pouze ta místa, kde působí největší tepelné zatížení.



Obr. 3.21 Detail části pracovní plochy nástroje.



Obr. 3.22 Detail na trhlinu ve spodní části střižné hrany.

Na obrázku 3.23 je zobrazen vzhled koncového prvku výrobku, jenž vznikl nástrojem ve stavu čtvrté kontroly. Do výrobku jsou neznatelně vtlačeny nerovnosti z nástroje, zejména v okolí střižné hrany. Kvůli silnému okujení povrchu je obtížné přesně lokalizovat tyto vady.



Obr. 3.23 Vzhled koncového prvku výrobku.

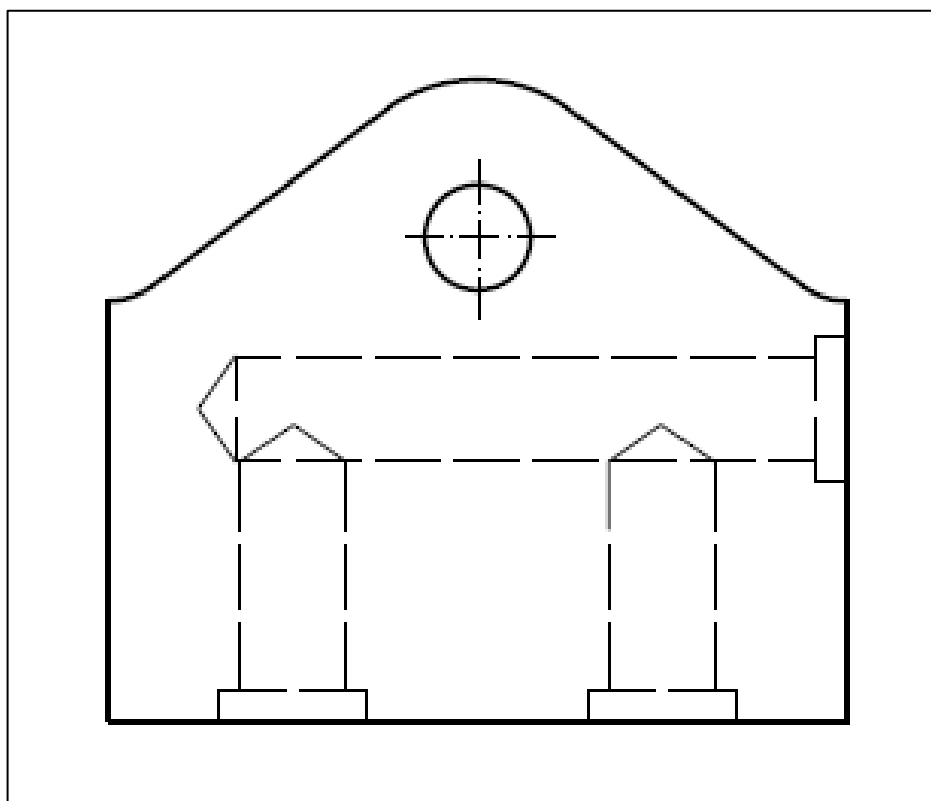
4 PŘEDBĚŽNÉ POROVNÁNÍ TRVANLIVOSTI S DALŠÍM TYPEM CHLAZENÍ NÁSTROJE

V této kapitole je pouze prozatímní srovnání trvanlivostí třech tvářecích matic. Referenční, nechlazená matrice (označeno jako matrice A) a chlazená vodou (matrice C) již mají stanovenou celkovou délku trvanlivosti. Trvanlivostí se v tomto případě rozumí počet vyrobených kusů do porušení nástroje a jeho nutné výměny. Jak je již uvedeno v podkapitole 3.3, výrobek i nástroj jsou vizuálně kontrolovány obsluhou, která na základě daných kritérií vyhodnotí, zdali je nutné nástroj vyměnit za nový.

Trvanlivost vzduchem chlazené matrice (matrice B) není konečná, proto se tedy jedná o předběžné vyhodnocení technologických výsledků. Experiment bylo nutné předčasně vyhodnotit, neboť byl dočasně pozastaven provoz ve firmě, kde je experiment uskutečněn. Výstupky na povrchu nástroje se odstraní leštěním a poté se nástroj opět uvede do provozu. Předpokládaná celková délka trvanlivosti je přes 20 000 vyrobených kusů výrobku.

Všechny matrice jsou vyrobeny ze stejného materiálu a měly stejné pracovní podmínky. Matrice mají totožné rozměry a geometrické tolerance. V případě matic A i B se jedná o identické nástroje. Matrice C má také identické rozměry i tolerance, liší se pouze ve vytvoření jednoduché soustavy kanálů uvnitř nástroje, viz obr. 4.1. Na tuto soustavu je napojen rozvod chladicí vody a vzniká tak uzavřený okruh. Projekt vodou chlazeného nástroje byl již připraven a vyhodnocen panem Michaellem Peltzem, zaměstnancem firmy.

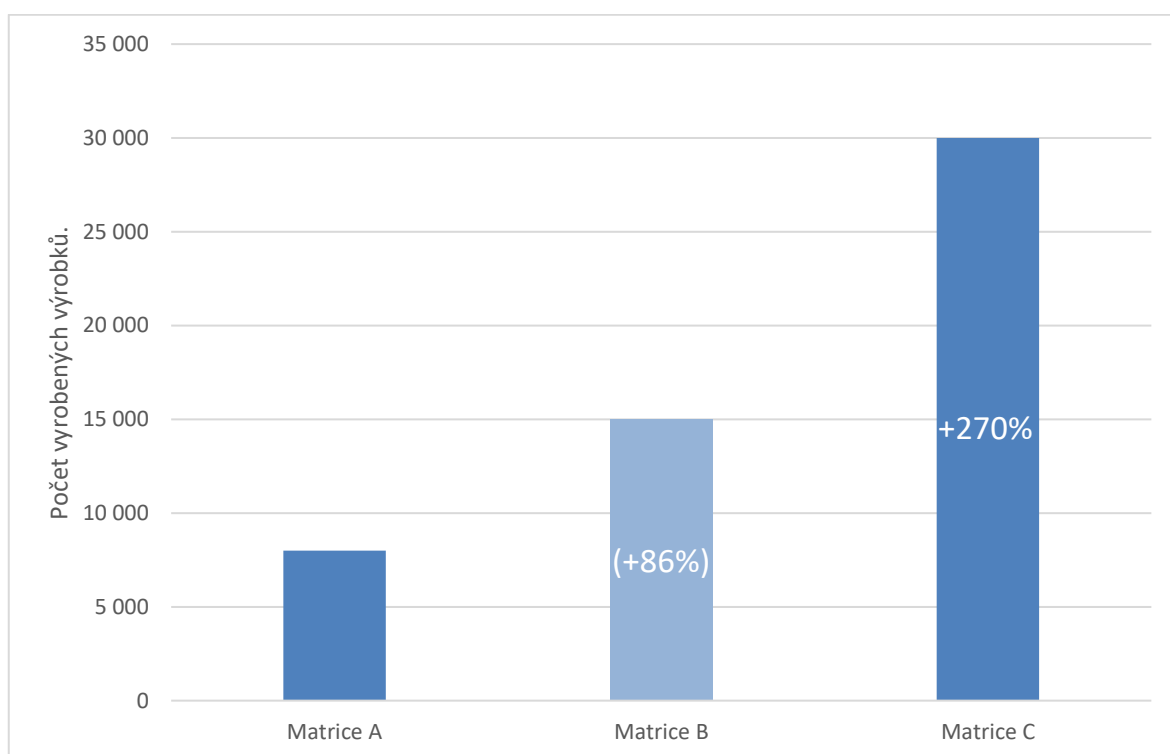
V tabulce 4.1 jsou uvedeny počty vyrobených kusů výrobků do porušení nástroje. V případě matrice B se nejedná o konečný počet, jak je již uvedeno výše v textu. Důležitým údajem je nárůst počtu kusů proti matici A, který určuje, zdali je daný typ chlazení technologicky výhodnější. Na obrázku 4.2 je dosavadní porovnání trvanlivostí jednotlivých matic s vyznačeným procentuálním rozdílem vůči referenční matici A. Sloupec pro matici B na obrázku 4.2 je barevně odlišen, aby bylo zdůrazněno, že trvanlivost ještě nemá konečnou hodnotu.



Obr. 4.1 Schematické zobrazení vodou chlazené matrice – pohled shora.

Tab. 4.1 Předběžné srovnání počtu vyrobených kusů.

	Matrice A	Matrice B	Matrice C
Počet vyrobených kusů	8 136	15 131	30 056
Rozdíl oproti matici A	-	(+86 %)	+270 %



Obr. 4.2 Předběžné srovnání trvanlivostí nástrojů s procentuálním rozdílem vůči matrici A.

5 PŘEDBĚŽNÉ EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ

Podle současných dat z prozatímního vyhodnocení trvanlivostí jednotlivých matric je vyhodnocena i ekonomická stránka. Pro všechny matrice jsou posuzovány náklady na výrobu 2 000 kusů. Jelikož náklady na stroj a vedlejší práce jsou totožné pro všechny tři matrice, jsou tedy brány jako konstantní. Výpočty se liší pouze ve spotřebě chladicího média a úpravě nástroje pro přívod chlazení. Ceny nástrojů jsou pouze orientační. Odvíjí se od velikosti objednávky a volby dodavatele.

Celkové náklady na nástroj byly vypočítány podle vztahu (5.1).

$$N_C = N_N + N_{CH} + N_{ÚN} \quad (5.1)$$

kde: N_C [Kč]	–	celkové náklady
N_N [Kč]	–	náklady na pořízení nástroje
N_{CH} [Kč]	–	náklady na chlazení nástroje
$N_{ÚN}$ [Kč]	–	náklady na úpravu nástroje pro chlazení

Náklady na výrobu 2 000 kusů byly vypočítány podle vztahu (5.2).

$$N_{V2} = \frac{N_C}{C_{pks}} \cdot 2\,000 \quad (5.2)$$

kde: N_{V2} [Kč]	–	náklady na výrobu 2 000 kusů
C_{pks} [-]	–	celkový počet vyrobených kusů

Matrice A – nechlazený nástroj

Celkové náklady na nástroj (5.1).

$$N_N = 2\,990 \text{ Kč}$$

$$N_{CH} = 0 \text{ Kč}$$

$$N_{ÚN} = 0 \text{ Kč}$$

$$N_C = N_N + N_{CH} + N_{ÚN} = 2\,990 + 0 + 0 = 2\,990 \text{ Kč}$$

Náklady na výrobu 2 000 kusů (5.2).

$$C_{pks} = 8\,136$$

$$N_{V2} = \frac{N_C}{C_{pks}} \cdot 2\,000 = \frac{2\,990}{8\,136} \cdot 2\,000 = 735 \text{ Kč}$$

Matrice B – vzduchem chlazený nástroj

Úprava nástroje pro tento typ chlazení spočívá pouze v navrtání základny držící nástroj, nikoliv v nástroji samotném. Základna má velice dlouhou životnost. Předpokládaná doba výměny tohoto držáku je po 1 000 000 vyrobených kusech. Cena úpravy této základny je 1 000 Kč. Tato položka je tedy ve výpočtech zanedbána, jelikož má na celkové náklady jednoho nástroje téměř nulové ovlivnění.

Pro výpočet nákladů na chlazení je nutné vypočítat průtok stlačeného vzduchu. Pro tento účel postačí tzv. „p/Q diagram“, který vyjadřuje závislost mezi tlakovým spádem a objemem vzduchu [36]. Absolutní vstupní tlak je 6,5 bar, výstupní je 1 bar. Z p/Q diagramu vyjde, že průtok potrubím je 27,81 l_n/s o průřezu 19,63 mm². Ceníkové náklady na výrobu 1 m³ stlačeného vzduchu jsou pouze orientační a závisí na sazbě dodavatele elektrické energie.

Výpočet nákladů na chlazení

Průtok vzduchu průřezem pneumatické hadičky byl vypočítán podle vztahu (5.3).

$$Q_{VZ} = Q_1 \cdot S \quad (5.3)$$

kde: Q_{VZ} [l_n/s] – průtok vzduchu průřezem pneumatické hadičky
 Q_1 [l_n/s] – průtok vzduchu získaný z p/Q diagramu průřezem $S = 1 \text{ mm}^2$
 S [mm²] – plocha průřezu pneumatické hadičky

$$Q_1 = 1,4167 \text{ l}_n/\text{s}$$

$$S = 19,63 \text{ mm}^2$$

$$Q_{VZ} = Q_1 \cdot S = 1,4167 \cdot 19,63 = 27,81 \text{ l}_n/\text{s}$$

Cena chlazení stlačeným vzduchem za 1 sekundu byla vypočítána podle vztahu (5.4).

$$N_{1S} = \frac{Q_{VZ}}{V} \cdot N_{VSV} \quad (5.4)$$

kde: N_{1S} [Kč] – cena chlazení stlačeným vzduchem za 1 sekundu
 N_{VSV} [Kč] – ceníkové náklady na výrobu stlačeného vzduchu o objemu V
 V [l] – ceníkový objem stlačeného vzduchu

$$V = 1\,000 \text{ l}$$

$$N_{VSV} = 0,5 \text{ Kč}$$

$$N_{1S} = \frac{Q_{VZ}}{V} \cdot N_{VSV} = \frac{27,81}{1\,000} \cdot 0,5 = 0,014 \text{ Kč}$$

Náklady na chlazení nástroje stlačeným vzduchem byly vypočítány podle vztahu (5.5).

$$N_{CH} = N_{1S} \cdot t_{PSV} \cdot Ppks \quad (5.5)$$

kde: t_{PSV} [s] – doba proudění stlačeného vzduchu
 $Ppks$ [-] – prozatímní počet vyrobených kusů

$$t_{PSV} = 11 \text{ s}$$

$$Ppks = 15\,131$$

$$N_{CH} = N_{1S} \cdot t_{PSV} \cdot Ppks = 0,014 \cdot 11 \cdot 15\,131 = 2\,330 \text{ Kč}$$

Výpočet nákladů na 2 000 kusů

Celkové náklady na nástroj (5.1).

$$N_N = 2\,990 \text{ Kč}$$

$$N_{CH} = 2\,330 \text{ Kč}$$

$$N_{UN} = 0 \text{ Kč}$$

$$N_C = N_N + N_{CH} + N_{UN} = 2\,990 + 2\,330 + 0 = 5\,320 \text{ Kč}$$

Náklady na výrobu sta kusů (5.2).

$$Ppks = 15\,131$$

$$N_{V2} = \frac{N_C}{Ppks} \cdot 2\,000 = \frac{5\,320}{15\,131} \cdot 2\,000 = 703,19 \text{ Kč}$$

Matrice C – vodou chlazený nástroj

Cena chlazení vodou je pouze orientační a odvíjí se od sazby poskytovatele elektrické energie. Předpokládaná cena chlazení je 1,5 Kč/kWh. Z nástroje se díky chlazení odebírá 0,2 MJ tepla. Nástroj se tedy ochladí přibližně za 0,083 Kč. Výroba celkového počtu kusů trvá 251 hodin. Náklady na chlazení za tuto dobu jsou na hodnotě 20,08 Kč.

Výpočet nákladů na chlazení

Teplo odebrané nástroji bylo vypočítáno podle vztahu (5.6).

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t \quad (5.6)$$

kde: Q [J] – teplo odebrané nástroji
 m [kg] – hmotnost ohřátého nástroje
 c_{ocel} [J/(kg·K)] – měrná tepelná kapacita oceli
 Δt [K] – rozdíl teplot

$$m = 1 \text{ kg}$$

$$c_{\text{ocel}} = 450 \text{ J/(kg·K)}$$

$$\Delta t = 423,15 \text{ K}$$

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t = 1 \cdot 450 \cdot 423,15 = 190\,418 \text{ J}$$

Náklady na ochlazení tepla Q z nástroje za hodinu byly vypočítány podle vztahu (5.7).

$$N_h = \frac{Q}{Q_{\text{kWh}}} \cdot N_{\text{kWh}} \quad (5.7)$$

kde: N_h [Kč] – náklady na ochlazení tepla Q z nástroje za hodinu
 Q_{kWh} [J] – energie přepočítaná z 1 kWh
 N_{kWh} [l] – náklady chlazení na 1 kWh

$$Q_{\text{kWh}} = 3\,600\,000 \text{ J}$$

$$N_{\text{VSV}} = 1,5 \text{ Kč}$$

$$N_h = \frac{Q}{Q_{\text{kWh}}} \cdot N_{\text{kWh}} = \frac{190\,418}{3\,600\,000} \cdot 1,5 = 0,08 \text{ Kč}$$

Náklady na chlazení nástroje vodou byly vypočítány podle vztahu (5.8).

$$N_{CH} = N_h \cdot t_{\text{vCpks}} \quad (5.8)$$

kde: t_{vCpks} [h] – doba výroby celkového počtu kusů

$$t_{vCpks} = 251 \text{ h}$$

$$N_{CH} = N_h \cdot t_{vCpks} = 0,08 \cdot 251 = 20,08 \text{ Kč}$$

Výpočet nákladů na 2 000 kusů

Celkové náklady na nástroj (5.1).

$$N_N = 2\,990 \text{ Kč}$$

$$N_{CH} = 20,08 \text{ Kč}$$

$$N_{UN} = 1\,000 \text{ Kč}$$

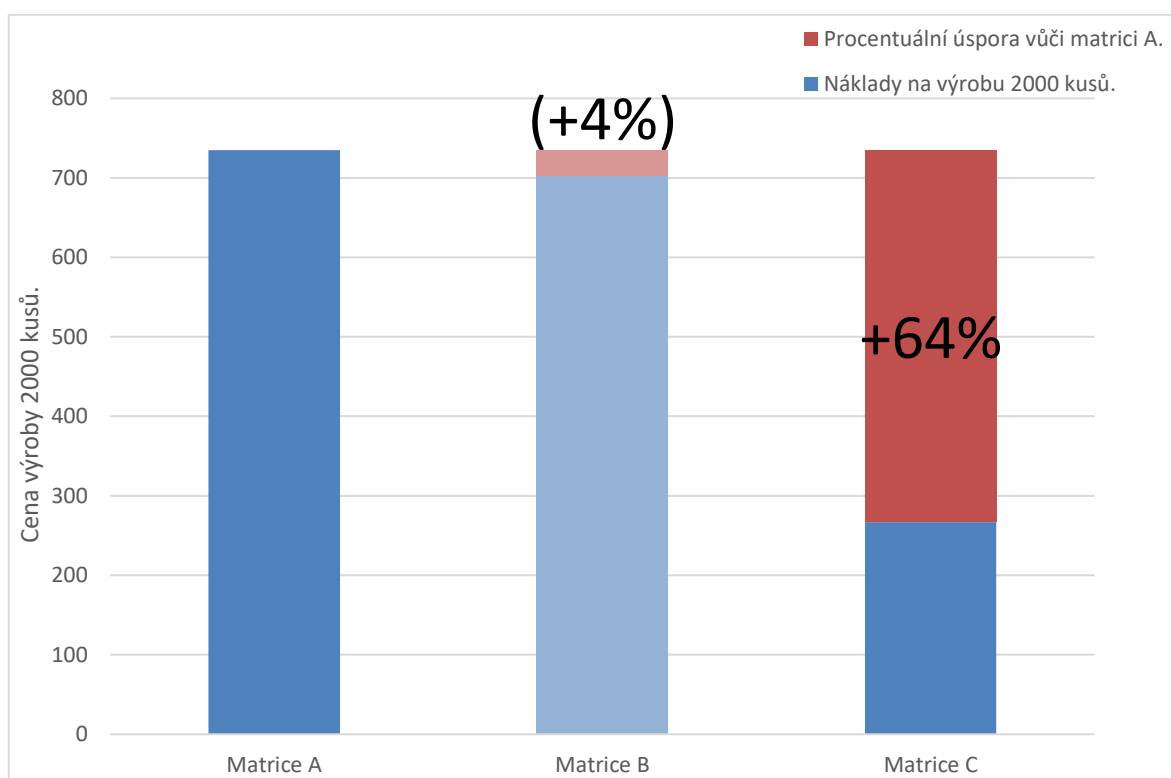
$$N_C = N_N + N_{CH} + N_{UN} = 2\,990 + 20,08 + 1\,000 = 4\,010,08 \text{ Kč}$$

Náklady na výrobu sta kusů (5.2).

$$C_{pks} = 30\,056$$

$$N_{V2} = \frac{N_C}{C_{pks}} \cdot 2\,000 = \frac{4\,010,08}{30\,056} \cdot 2\,000 = 266,84 \text{ Kč}$$

Na obrázku 5.1 je předběžné vyhodnocení nákladů na nástroj. Důležitým údajem je úspora vůči referenční matici A. Náklady matrice C se pohybují výrazně níž, až o 64 %. Chlazení vzduchem je prozatím o 4 % výhodnější. Tím, že je matici B, po zarovnání vzniklých výstupků, stále možné uvést do provozu, bude konečná trvanlivost vyšší než ve stávajícím stavu a tím se také tato metoda chlazení z ekonomického hlediska stane více výhodnější vůči matici A. Proto jsou náklady matrice B na obrázku 5.1 vyznačeny odlišnou barvou.



Obr. 5.1 Předběžné vyhodnocení nákladů na výrobu určitého počtu kusů výrobku s vyznačenou úsporou vůči matrici A.

6 DISKUZE

Ze získaných výsledků vyplývá, že rozhodující není délka teplotních trhlin, ale celkový stav pracovní plochy nástroje. Obecně bylo předpokládáno, že se vzrůstajícím počtem vyrobených kusů se bude délka trhlin razantně zvětšovat. Po uvedení nástroje do výroby se ihned utvoří tepelné porušení střižné hrany, které pomalým tempem roste. Mnohem viditelnější je rozevření a prohloubení trhlin s přibývajícím počtem kusů. K tomuto okamžitému vytvoření teplotních trhlin pravděpodobně přispěla malá doba chlazení nástroje pro prvních 600 vyrobených kusů výrobku. S prodloužením délky ochlazování se růst trhlin výrazně zpomalil, až téměř zastavil.

Bohužel prohlášení, že teplotní trhliny rostou pomalým tempem, nelze říct s naprostou jistotou. Hraje zde další efekt, a to mechanické opotřebení střižné hrany. To je způsobeno nedokonalým seřízením stroje. Střižník procházející střižným otvorem není v naprosté souososti a dochází ke kolizi. Trhliny se mohou jevit jako pomalu rostoucí, neboť se střižná hrana rozšiřuje a znehodnocuje vlivem působení střižníku. Je tedy doporučené docílit naprosté souososti. Dalším ovlivňujícím faktorem je chyba při měření délek trhlin. Obsluze mikroskopu se nemuselo vždy povést přesné určení začátku a konce trhlin.

Na pracovní ploše nástroje ulpěly částice z materiálu výrobku a vytvořila se jistá vazba mezi povrchem nástroje a těmito částicemi. Nelze s jistotou konstatovat, jak se tento materiál na nástroj dostal. S největší pravděpodobností mohla v pracovním prostoru zůstat okuje, která se poté přitiskla na nástroj. Mohlo se také stát, že ve stroji nastala porucha a horký materiál výrobku byl po delší dobu sevřen mezi čelistmi stroje a tím část materiálu ulpěla na nástroji.

Proud stlačeného vzduchu je primárně fokusován na střižnou hranu a pozitivně ji ovlivňuje. Na plochu nástroje má tento způsob chlazení menší efekt. Předpokládá se, že vzhled a vlastnosti pracovní plochy nástroje účinněji řeší konformní chlazení vodou, jelikož se nástroj chladí v celém objemu. Trvanlivost plochy, a tím i celého nástroje, může být výrazně posunuta.

Pro přesné konstatování způsobu opotřebení vzduchem chlazeného nástroje je nutné proces opakovat na vícero nástrojích. Jako návrh jiného způsobu vyhodnocení růstu trhlin je za použití přesnějších metod měření, např. pomocí elektronového mikroskopu. Vhodnější jsou kratší intervaly mezi měřeními a tím i přesnější vyhodnocení růstu trhlin.

7 ZÁVĚR

Dosažené výsledky této práce lze shrnout takto:

- chlazením nástroje stlačeným vzduchem se podařilo prodloužit jeho trvanlivost až na téměř dvounásobek oproti trvanlivosti nechlazeného nástroje,
- předpokládá se větší nárůst, neboť experiment byl pozastaven z důvodu odstávky výroby ve firmě, kde je prováděn a po obnovení výroby bude test dál pokračovat,
- způsob chlazení stlačeným vzduchem bude také proveden na vícero nástrojích, aby se ověřila správnost výsledků, eliminovaly se případné chyby v testování atd.,
- výrazně se zpomalil růst trhlin a ovlivnily vlastnosti střížné hrany nástroje,
- do výroby 600 kusů byl efekt chlazení snížený, což mohlo vézt k okamžitému objevení trhlin, jejichž další vývoj byl po navýšení doby působení vzduchu téměř zastaven,
- náklady na výrobu určitého počtu kusů nástrojem chlazeným stlačeným vzduchem jsou prozatím pouze o 4 % menší než náklady na výrobu nechlazeným nástrojem,
- předpokládá se vyšší ekonomická úspornost, neboť po opětovném spuštění výroby vzroste současná trvanlivost nástroje,
- trvanlivost nástroje chlazeným vodou se navýšila téměř až na čtyřnásobek vůči nechlazenému nástroji,
- náklady na výrobu určitého počtu kusů nástrojem chlazeným vodou jsou až o 64 % menší než náklady na výrobu nechlazeným nástrojem,
- ze srovnání dosud získaných ekonomických a technologických výsledků vyplývá, že chlazení vodou je výhodnější.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
2. Technologie tváření kovů. Katedra tváření kovů a plastů – Skripta [online]. Liberec [cit. 2020-01-28]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm
3. ONA, H. Cold roll forming for high tensile strength steel sheet proposition on forming of thin spring steel sheet pipe. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2004, 153-154, 247-252 [cit. 2020-02-14]. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2004.04.116. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <http://www.science-direct.com/science/article/pii/S0924013604004595>
4. Common uses for spring steel. *MEAD METALS, INC.* [online]. Shoreview: Meadmetals, 2017 [cit. 2020-02-14]. Dostupné z: <https://www.meadmetals.com/blog/com-mon-uses-for-spring-steel>
5. Profilovací stroje a válcovací linky. *PMX company s.r.o.* [online]. [cit. 2020-02-16]. Dostupné z: <https://www.companypmx.cz/sluzby/profilovaci-linky.html>
6. PETRUCHA, Roman. *Snižování hmotnosti osobních automobilů na základě volby materiálu*. Brno, 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 46 s. 7 příloh. doc. Ing. Jaroslav Šenberger, CSc
7. LI, F., M. FU, J. LIN a X. WANG. Experimental and theoretical study on the hot forming limit of 22MnB5 steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2014, 71(1-4), 297-306 [cit. 2020-02-21]. DOI: 10.1007/s00170-013-5468-x. ISSN 02683768. Dostupné z: <http://web.b.ebscohost.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/ehost/detail/detail?vid=0&sid=0ef8f827-68d3-4a24-a7df-783e2c2faac6%40sessionmgr101&bdata=Jmxhbm9Y3Mmc2l0ZT1laG9zdC1saXZl#db=a9h&AN=94398229>
8. YANG, D. S. et al. Study on hot forming process and spring-back of ultra-high strength steel based on ABAQUS. *Advanced Materials Research* [online]. 2012, (482-484), 2430-2437 [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: <https://doi-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/10.4028/www.scientific.net/AMR.482-484.2430>
9. SUBRAMANIAN, C a K.N STRAFFORD. Towards optimization in the selection of surface coatings and treatments to control wear in metal-forming dies and tools. *Materials & Design* [online]. 1993, 14(5), 291-298 [cit. 2020-01-28]. DOI: 10.1016/0261-3069(93)90129-J. ISSN 02613069. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/026130699390129J>

10. *Nástrojové a speciální oceli - JKZ Bučovice* [online]. [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: <https://www.jkz.cz/cs>
11. *VIRGAMET - Engineering & Stainless steel supplier* [online]. [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: <https://virgamet.com/>
12. BOURITHIS, L, G.D PAPADIMITRIOU a J SIDERIS. Comparison of wear properties of tool steels AISI D2 and O1 with the same hardness. *Tribology International* [online]. 2006, 39(6), 479-489 [cit. 2020-02-25]. DOI: 10.1016/j.triboint.2005.03.005. ISSN 0301-679X. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X05000873>
13. TOSHIO, Okuno. Effect of microstructure on the toughness of hot work tool steels, AISI H13, H10 and H19. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan* [online]. 1987, 27(1), 51-59 [cit. 2020-02-29]. DOI: 10.2355/isijinternational1966.27.51. Dostupné z: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0023249016&doi=10.2355%2fisijinternational1966.27.51&partnerID=40&md5=5fdb0247aae03bafc3a3b1182298141>
14. NILSSON, A, L KIRKHORN, M ANDERSSON a J.-E STÅHL. Improved tool wear properties in sheet metal forming using Carbide Steel, a novel abrasion resistant cast material. *Wear* [online]. 2011, 271(9-10), 1280-1287 [cit. 2020-02-29]. DOI: 10.1016/j.wear.2011.01.083. ISSN 0043-1648. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164811003292>
15. *ArcelorMittal* [online]. [cit. 2020-02-29]. Dostupné z: <https://corporate.arcelormittal.com/>
16. BITTNER, J. *Metody povlakování řezných nástrojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 42s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Anton Humár, CSc
17. BOBZIN, K, T BRÖGELMANN, G GRUNDMEIER, T DE LOS ARCOS, M WIESING a N.C KRUPPE. (Cr,Al)N/(Cr,Al)ON Oxy-nitride Coatings deposited by Hybrid dcMS/HPPMS for Plastics Processing Applications. *Surface & Coatings Technology* [online]. Elsevier B.V, 2016, 308, 394-403 [cit. 2020-01-28]. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.07.093. ISSN 0257-8972. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0257897216307939>

18. YAMAMOTO, K, H ITO a S KUJIME. Nano-multilayered CrN/BCN coating for anti-wear and low friction applications. *Surface & Coatings Technology* [online]. Elsevier B.V, 2007, 201(9), 5244-5248 [cit. 2020-01-28]. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.07.165. ISSN 0257-8972. Dostupné z: [https://www.sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0257897206007456](https://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0257897206007456)
19. What is PVD coating? *ADVANCED COATING SERVICE* [online]. [cit. 2020-03-06]. Dostupné z: <https://acscoating.com/what-is-pvd-coating/>
20. SCHINDLEROVÁ, V., *Výzkum cyklů životnosti tvářecích nástrojů v technologickém toku: disertační práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2015, 83 s. Školitel: Hrubý, J.
21. ŠPRTA, P. *Metody sekundárního ovlivňování struktury ocelí a ocelových ingotů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Blažík.
22. ROSECKÁ, E. *Tepelné zpracování ocelí*. Brno: 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 47 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jaroslav Šenberger, CSc.
23. SENTHILKUMAR, D, I RAJENDRAN, M PELLIZZARI a Juha SIIRIAINEN. Influence of shallow and deep cryogenic treatment on the residual state of stress of 4140 steel. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. Elsevier B.V, 2011, 211(3), 396-401 [cit. 2020-03-08]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.10.018. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013610003274>
24. GREGOR, M. *Tepelné zpracování ručních utahovacích nástrojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 65 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Doležal, Ph.D.
25. Nitridování. *Strojírenství* [online]. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <https://strojirenstvi.studentske.cz/2008/10/nitridovn.html>
26. ORECŇÝ, Martin, Marian BURSAK, Martin SEBEK a Ladislav FALAT. Influence of Hardness, Matrix and Carbides in Combination with Nitridation on Abrasive Wear Resistance of X210Cr12 Tool Steel. *Metals* [online]. Basel: MDPI, 2016, 6(10), 236 [cit. 2020-03-08]. DOI: 10.3390/met6100236. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/1831818616/>

27. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
28. ROKICKI, P. a K. DYCHTON. Acetylene Flow Rate as a Crucial Parameter of Vacuum Carburizing Process of Modern Tool Steels. *Archives of Metallurgy and Materials* [online]. Sciendo, 2016, 61(4), 2009-2012 [cit. 2020-03-14]. DOI: 10.1515/amm-2016-0324. ISSN 17333490. Dostupné z: <https://doaj.org/article/057c72d31c2c4f40aa8a12e0d22abcd4>
29. *Techmania Science Center/EDUPORTÁL* [online]. [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs>
30. Koncepce odvodu tepla. *DPS-AZ* [online]. 2011 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/soucastky/id:10413/koncepce-odvodu-tepla>
31. POKORNÝ, Marek. *Proudění tepla* [online]. 2006, 3 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: http://people.fsv.cvut.cz/www/wald/Pozarni_odolnost/e-text/specialiste/1/1-3_Proudeni_tepla.pdf
32. VOLF, I, M JAREŠOVÁ a M OUHRABKA. *Přenos tepla: Studijní text pro řešitele FO a ostatní zájemce o fyziku* [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/texttz.pdf>
33. ROHLENA, Karel. Chlazení atomů laserem. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie* [online]. 1999, 44(1), 1-13 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://dml.cz/handle/10338.dmlcz/140974>
34. SLANÝ, Martin. *Návrh úpravy lisovacího nástroje*. FSI VUT v Brně, 2018, 19 s. SR13857105.
35. TOMEŠEK, Viktor. Analýza lomového porušení nástrojových ocelí a studium jeho eliminace. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 51 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
36. Vlastnosti a hodnoty stlačeného vzduchu [online]. [cit. 2020-06-11]. Dostupné také z: <https://piskovacky.cz/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
AISI	American Iron and Steel Institut
BCC	Prostorově středěná kubická mřížka
BCN	Kyanid bóru
(Cr,Al)ON	Oxinitrid chrom hliníku
(Cr,Al)N	Nitrid chrom hliníku
CrN	Nitrid chromu
CVD	Chemical Vapour Deposition
DCMS	Direct Current Magnetron Sputtering
EN	Evropská Norma
FCC	Plošně středěná kubická mřížka
HB	Tvrdost podle Brinella
HPPMS	High-Power Pulsed Magnetron Sputtering
HRC	Tvrdost podle Rockwella
HV	Tvrdost podle Vickerse
PVD	Physical Vapour Deposition
TiN	Nitrid titanu

Symbol	Jednotka	Popis
Cpks	[-]	celkový počet vyrobených kusů
N_{IS}	[Kč]	cena chlazení stlačeným vzduchem za 1 sekundu
N_C	[Kč]	celkové náklady
N_{CH}	[Kč]	náklady na chlazení nástroje
N_N	[Kč]	náklady na pořízení nástroje
N_{ÚN}	[Kč]	náklady na úpravu nástroje pro chlazení
N_{V100}	[Kč]	náklady na výrobu sta kusů
N_{VSV}	[Kč]	náklady na výrobu stlačeného vzduchu o objemu V
N_h	[Kč]	náklady na ochlazení tepla Q z nástroje za hodinu
N_{kWh}	[Kč]	náklady chlazení na 1 kWh
Ppks	[-]	prozatímní počet vyrobených kusů
Q	[J]	teplo odebrané nástroji

Symbol	Jednotka	Popis
Q_1	$[l_n/s]$	průtok vzduchu získaný z p/Q diagramu průřezem $S = 1 \text{ mm}^2$
Q_{kWh}	$[J]$	energie přepočítaná z 1 kWh
Q_{vz}	$[l_n/s]$	průtok vzduchu průřezem pneumatické hadičky
S	$[mm^2]$	plocha průřezu pneumatické hadičky
V	$[l]$	ceníkový objem stlačeného vzduchu v litrech
c_{ocel}	$[J/(kg \cdot K)]$	měrná tepelná kapacita oceli
m	$[kg]$	hmotnost ohřátého nástroje
t_{psv}	$[s]$	doba proudění stlačeného vzduchu
t_{vCpks}	$[h]$	doba výroby celkového počtu kusů
Δt	$[K]$	rozdíel teplot