



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA SOUČÁSTI „TAŽNÁ ZÁPADKA“

PRODUCTION OF THE "HAULING LUG PAWL" COMPONENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Slavomír Jansa

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ladislav Žák, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Slavomír Jansa**
Studijní program: Strojírenská technologie
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Ladislav Žák, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

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

Výroba součásti „Tažná západka“

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce bude zaměřena na využití technologie vstřikování pro zadanou součást, na konstrukční řešení formy a vyhodnocení ekonomických úspor.

Cíle diplomové práce:

- zhodnocení současného stavu výroby součásti,
- literární studie dané problematiky,
- návrh řešení a technologické výpočty,
- zhotovení výkresové dokumentace,
- ověřovací zkoušky,
- ekonomické vyhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

ŠTĚPEK, Jiří, Jiří ZELINGER a Antonín KUTA. Technologie zpracování a vlastnosti plastů. 1. Praha, Bratislava: SNTL, Alfa, 1989.

SOVA, Miloš a Josef KREBS. Termoplasty v praxi. 1. Praha: Verlag Dashöfer, 2001. ISBN 80-86229-15-7.

ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů: teorie a praxe. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 978-80-271-0614-1.

MENGES, Georg, Walter MICHAELI a Paul MOHREN. How to Make Injection Molds. 3. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2001. ISBN 978-3-446-21256-5.

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

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá možnostmi nahrazení frézované tažné západky levnější technologií. Jako vyhovující byla zvolena technologie MIM s následným chemicko-tepelným zpracováním, přičemž úspěšná aplikace této metody na výrobu tažné západky mohla ústit v úsporu až dvou třetin nákladů. V rámci testování bylo vytvořeno několik sérií vzorků a vyzkoušeno množství kombinací oceli ASTM-A29-AISI 8620, ASTM-A29-AISI 4140 a způsobů chemicko-tepelného zpracování. Po několika neúspěšných pokusech, kdy dílce vyrobené metodou MIM stěží prošly vstupní kontrolou rozměrových a geometrických tolerancí, byla aplikována metoda HIP a následně i ARCOR. I přestože se vlastnosti tažné západky značně zlepšily, žádná z testovaných kombinací nezajistila dostatečnou pevnost a houževnatost při testech životnosti střádacího mechanismu jističe. Žádný ze vzorků nevydržel požadovaných 10 000 cyklů. Úspěšná aplikace metody MIM vyžaduje adicovní konstrukční změny na dílci, případně volbu jiného vhodného dílce.

Klíčová slova

MIM, HIP, tažná západka, vstřikování kovových prášků, ARCOR,

ABSTRACT

This magister thesis focuses on possibilities of replacement of milled Hauling lug pawl by cheaper component made by MIM technology with additional chemical-thermal treatment. Two thirds of costs should be saved if application is fruitful. Despite huge mix of combinations of steel ASTM-A29-AISI 8620, ASTM-A29-AISI 4140 and chemical-thermal treatment, no combination was successful. Several series of samples have been created but not even the use of HIP and ARCOR technology helped to pass circuit breaker storage life tests. Successful application of MIM technology would require additional design changes or choice of different suitable part.

Key words

MIM, HIP, hauling lug pawl, metal injection moulding, ARCOR

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JANSA, Slavomír. *Výroba součástí „Tažná západka“*. [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139773>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ladislav Žák.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou/diplomovou práci na téma Výroba součásti „Tažná západka“ vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

V Ostrově, 20.5.2022

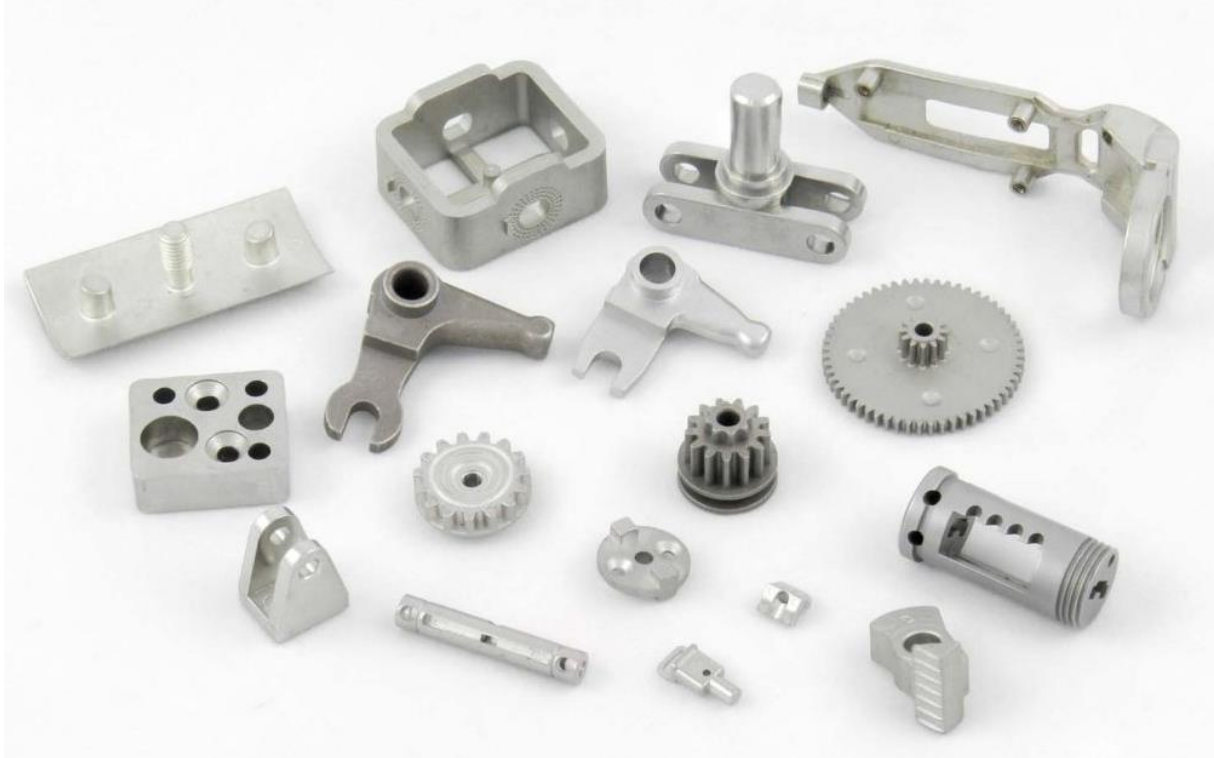
Slavomír Jansa

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Ladislavu Žákovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce. Dále bych rád poděkoval své manželce a rodině za nekonečnou trpělivost a neutuchající podporu jak při psaní mé diplomové práce, tak po celou dobu mého studia.

OBSAH

ÚVOD	8
1 ROZBOR ZADÁNÍ	9
2 PRÁŠKOVÁ METALURGIE A CHEMICKO-TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ	11
2.1 Technologie MIM	11
2.1.1 Charakteristika vstupních materiálů	12
2.1.2 Postup	14
2.1.3 Příležitosti a omezení technologie MIM	19
2.2 Technologie HIP	20
2.2.1 Postup	21
2.2.2 Sekundární obrábění pomocí metody HIP	23
2.3 Chemicko-tepelné zpracování	24
2.3.1 Cementace	24
2.3.2 Nitridace	29
2.3.3 Nitrocementace	33
2.3.4 Karbonitridace	34
2.3.5 ARCOR	36
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	38
3.1 Strádací mechanismus	38
3.2 Západka tahové spony	39
3.2.1 Vlastnosti západky tahové spony	40
3.2.2 Změna technologie výroby	42
3.2.3 Úpravy výkresové dokumentace pro metodu MIM	43
3.1 Výrobní postup vzorků	44
3.1.1 Výrobní postup výroby prášku	44
3.1.2 Proces vstřikování	45
3.1.3 Slinování	46
3.1.4 Nitrocementace	47
3.1.5 Isostatické lisování za tepla	47
3.1.6 ARCOR	47
3.1.7 Konzervace	48
3.2 Testované vzorky	49
3.2.1 První vzorkování	50
3.2.2 Druhé vzorkování	50
3.2.3 Třetí vzorkování	52
3.2.4 Destruktivní zkouška vzorků	53
3.2.5 Čtvrté vzorkování	55
3.2.6 Následný postup	55
4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	58
ZÁVĚR	60
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	61
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	68
SEZNAM PŘÍLOH	69
SEZNAM OBRÁZKŮ	70
SEZNAM TABULEK	71
SEZNAM GRAFŮ	72

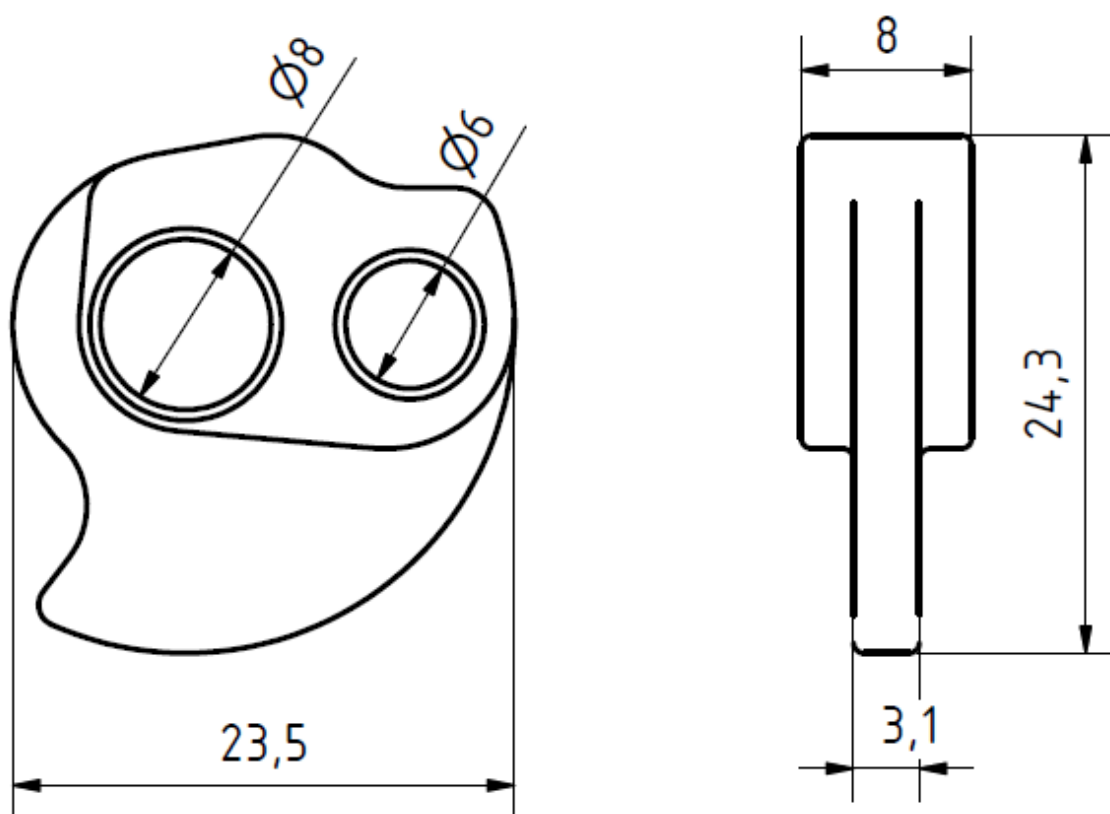


1 ROZBOR ZADÁNÍ

Vzduchové jističe nachází široké uplatnění ve strojovnách zařízení vyrábějících elektrický proud, stejně jako velkých průmyslových budovách. I přes vysokou variabilitu požadavků zákazníků, které se týkají širě rozsahu pracovního proudu, napětí či rozsahu pracovních teplot, je kladen velký důraz na bezpečnost a stoprocentní spolehlivost zařízení.

Minimální garantovaná životnost každého expedovaného jističe je deset tisíc cyklů, což je číslo, které představuje magickou hranici životnosti pro každou jednotlivou součástku jističe. Většina kovových součástek je plošně tvářena, konkrétně stříhána a ohýbána. Pouze několik málo dílců v jističi je frézováno vzhledem k jejich tvarové komplikovanosti. Právě na frézované součástky cílí snahy o nalezení levnějšího způsobu výroby, neboť frézování je značně nákladným způsobem produkce.

Cílem této práce je navržení a následné otestování alternativních způsobů výroby západky tahové spony, tedy jedné z frézovaných součástek (obrázek č. 2) Tento dílec je součástí střádače, který zajišťuje včasné sepnutí a rozepnutí jističe, tedy i jeho bezchybnou funkčnost, viz obrázek č. 2.

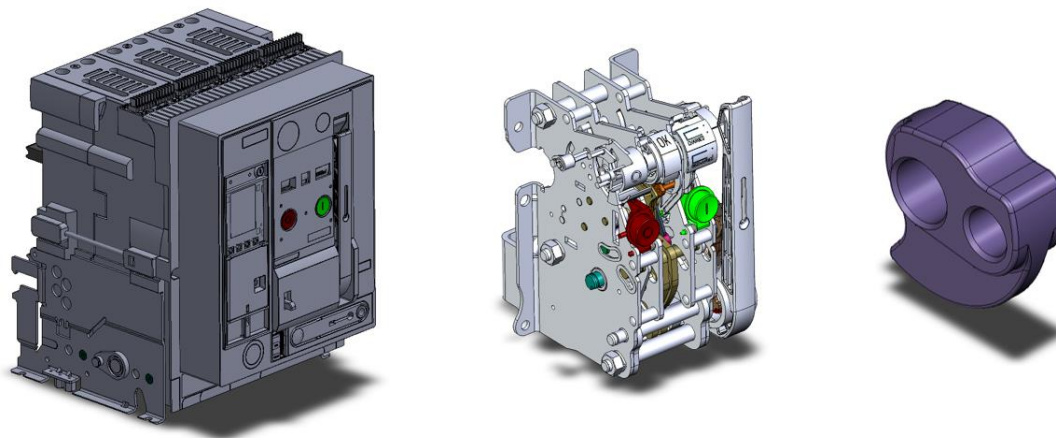


Obrázek 2 Západka tahové spony zjednodušený výkres

Vzhledem ke specifickým požadavkům na cyklické zatížení, dynamické namáhání a geometrickou přesnost není možné aplikovat jakoukoli technologii výroby západky tahové spony. Kromě frézování, které poskytuje geometricky přesné a houževnaté dílce, představuje potenciální alternativu výroby využití práškové metalurgie, 3D tisku, kování, odlévání nebo řezání laserem či vodním paprskem.

Kování ani odlévání neposkytují dostatečnou přesnost výrobku, pro řezání laserem či vodním paprskem je dílec příliš složitý a technika 3D tisku je prozatím příliš drahá pro velkosériovou

výrobu. Jako jediná alternativa k frézování na CNC stroji (*Computer Numeric Control, počítačově řízený stroj*) se tak jeví využití práškové metalurgie, která nabízí dostatečnou přesnost výroby při nízkých nákladech.



Obrázek 3 Schéma jistič – střádací mechanismus – tažná západka

Práce je členěna do dvou základních kapitol, přičemž teoretická část představuje literární rešerši zabývající se charakteristikami práškové metalurgie a chemicko-tepelného zpracování se zaměřením na technologie, které byly aplikovány v praktické části. Konkrétně se jedná o aplikace technologie plastického vstřikování kovů s následnou chemicko-tepelnou úpravou pomocí nitrocementace nebo karbonitridace a izostatickým lisováním za tepla.

V experimentální části je uveden popis charakteristik současné výroby dílce včetně jeho funkce a požadavků na dodržení rozměrových a geometrických tolerancí a mechanických vlastností. Následuje popis sérií testování s dílci vyráběnými práškovou metalurgií a vyhodnocena jednotlivá pozitiva i úskalí zvolených výrobních kombinací. Na závěr je provedeno technickoekonomické zhodnocení a posouzena vhodnost zvolené metody pro dílec *západka tahové spony*.

2 PRÁŠKOVÁ METALURGIE A CHEMICKO-TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

Prášková metalurgie je historicky nejstarší formou metalurgie obecně. Zabývá se výrobou práškových kovů, jejich slitin a sloučenin a následným zpracováním do konečné podoby výrobku nebo polotovaru, aniž by došlo k překročení teploty tavení. K pozitivům práškové metalurgie patří zejména schopnost zpracovávat jinak obtížně zpracovatelné materiály jako vysokotavitelné kovy a jejich slitiny (wolfram, molybden), nebo špatně odlévatelné materiály (Cu-W, Cu-C atd.). Díky slinování je možné kombinovat materiály s rozdílnými teplotami tavení, rozdílnými hustotami a omezenou vzájemnou rozpustností v tekutém stavu. Výhodou je také chemická homogennost součástky a nízký objem odpadního materiálu. Limitujícím faktorem je pak tvar a velikost výrobku s ohledem na možnosti formovací techniky a nepatrně nižší hustota výrobků ve srovnání s konvenčními technikami. [2; 3]

Specifickou formou práškové metalurgie je izostatické lisování za tepla, kdy dochází ke zhušťování prášku, popřípadě již slinutých dílců. Díky teplu a izostatickému tlaku působícímu rovnoměrně ze všech stran je eliminována vnitřní poréznost, aniž by došlo ke změně čistého tvaru dílce. Mezi hlavní výhody izostatického lisování za tepla metody patří výroba dílců vysoké hustoty různorodých tvarů v relativně velkých výrobních sériích. Ve srovnání s výrobními náklady dílců, u nichž je potřeba provedení více operací (obrábění, svařování atd.) vede využití metody izostatického lisování za tepla k výraznému zeštíhlení nákladů. [4]

Ačkoli výrobky vytvořené díky práškové metalurgii vykazují velmi dobré vlastnosti, je možné dosáhnout zlepšení vlastností, chemicko-tepeelného zpracování, které bývá ideálním řešením při požadavku na tvrdý dílec s houževnatým jádrem. Kalené dílce sice vykazují tvrdý povrch, avšak jsou příliš křehké. Popouštěné dílce jsou houževnaté, avšak nedostatečně tvrdé. Alternativou k chemicko-tepeelnému zpracování je povrchové kalení, které však nezlepšuje vlastnosti povrchu jako odolnost vůči otěru, únavě, korozi či opotřebení. [5]

Chemicko-tepeelné zpracování spočívá v modifikaci chemického složení povrchu a podpovrchových vrstev difuzním sycením legujících prvků (dusík, uhlík) nad teplotami A_{C1} pod teplotou tavení za účelem zlepšení mechanických a fyzikálních vlastností, zejména zvýšení tvrdosti, odolnosti vůči opotřebení a zlepšení tribologických vlastností dílce při současném zachování houževnatosti jádra. Vhodně zvolenou kombinací oceli a způsobu chemicko-tepeelného zpracování je možné substituovat drahé vysokolegované oceli levnějšími nízkolegovanými, a to při zachování odpovídající životnosti a kvality. [6; 7]

V několika následujících podkapitolách jsou popsány charakteristiky technologie plastického vstřikování kovů, technologie izostatického lisování za tepla a vybraných způsobů chemicko-tepeelného zpracování, konkrétně cementace, nitridace, nitrocementace a karbonitridace. Tyto metody byly užity při testování alternativního způsobu výroby západky tahové spony, jejíž výroba tvoří jádro této diplomové práce.

2.1 Technologie MIM

Metoda MIM (*MIM – Metal Injection Moulding, plastické vstřikování kovů*), se v posledních desetiletích rozšířila do velkého množství oblastí od výroby elektroniky, automobilového průmyslu, zdravotnictví nebo výroby střelných zbraní. Jedná se o nízkonákladovou metodu, která ve srovnání s tlakovým litím nebo odléváním do pískových forem vykazuje vyšší pevnost dílců a využívá se zejména v případech, kdy je náročné nebo nákladné odlévat nebo obrábět malé až středně velké dílce. [2; 8]

Metoda MIM vychází z technologie vstřikování termoplastů a klasické práškové metalurgie, tedy dvou běžně užívaných postupů. MIM je specifickou formou PIM (*PIM – Powder Injection Moulding, plastické vstřikování prášku*), což je technologie výroby tvarově náročných a velmi přesných součástí ať už z kovového prášku (MIM) nebo keramického prášku (*CIM – Ceramic Injection Moulding, plastické vstřikování keramického prášku*). Přibližně 70 % výrobků je pak vyráběno metodou MIM, která je celosvětově rozšířena, a necelých 30 % metodou CIM, která se těší oblibě zejména v USA. Obecně lze říci, že MIM v Evropě se soustřeďuje na automotive a spotřebitelské zboží, v Asii na spotřební elektroniku, IT a lékařských komponent a CIM v USA na výrobu zdravotnických produktů. [9; 10; 11; 12]

Metoda MIM je vhodná pro produkci objemnější než 5000 ks výlisků ročně a spočívá ve stlačování jemných kovových prášků do forem za užití vysokého tlaku a následném slinování při vysokých teplotách. Při slinování dochází k mřížkové difuzi. Výsledný produkt vykazuje vysokou kvalitu finálního povrchu. Metoda MIM umožňuje vyrábět tvarem komplikované díly, které by běžnými metodami musely být vyráběny v několika krocích. Kromě toho je předností technologie MIM materiálová flexibilita a vysoká přesnost výroby ($\pm 0,3 \%$) [12]

Ačkoli historické nálezy svědčí o užívání práškového zlata a zeleného prášku už starověkými Egypťany zhruba 3.000 let př.n.l., většího významu nabyla až na přelomu 19. a 20. století, kdy se rozvinula průmyslová výroba kovů s vysokou teplotou tání – wolframu ($3.422 \text{ }^{\circ}\text{C}$) a molybdenu ($2.633 \text{ }^{\circ}\text{C}$), pro která neexistovala vhodná tavicí zařízení. K rozvoji tak značně přispěl Edisonův vynález žárovky v roce 1879 a potřeba průmyslové výroby wolframových vláken. [3]

S rozvojem elektrických motorů a dynam na počátku 20. století souvisí i komerční rozvoj výroby slinovaných sloučenin na bázi kov – uhlík. Následoval rozmach slinutých karbidů a po druhé světové válce i kompozitů na bázi kov-oxid (cermetů). V 70. letech se dostaly do popředí slitiny na bázi kov-neoxidický materiál jako jsou nitridy, boridy, karbidy atd. V současné době prášková metalurgie alternuje konvenční metody (např. obrábění, odlévání, kování) [3]

Ačkoli PIM (vstřikování prášku) bylo poprvé využito již ve 30. letech minulého století, až teprve nástup formovacích a slinovacích pecí řízených mikroprocesory umožnil bezchybně opakovat výrobní proces s nízkou tolerancí odchylek, a tak přispěl k vývoji MIM. Za vynálezce technologie MIM je považován Američan Raymond Wiech. [8; 13]

Už v roce 1979 byla metoda MIM oceněna dvěma cenami za design – za šroubové těsnění používané na tryskovém letadle Boeing a za nátlakovou komoru z niobové slitiny a vstřikování pro raketový motor na kapalné pohonné hmoty. Od poloviny 80. let bylo vydáno velké množství patentů a vzniklo mnoho firem zaměřených výhradně na MIM technologii. Komerčního využití se však metoda dočkala až v 90. letech 20. století. [8; 14]

V následujících podkapitolách je nejprve stručně popsána charakteristika vstupních materiálů užívaných pro metodu MIM, následně je popsán celý proces MIM. V závěru kapitoly jsou poté shrnuty výhody a nevýhody technologie MIM a popsány nejnovější trendy v metodě MIM.

2.1.1 Charakteristika vstupních materiálů

Zpracování metodou MIM začíná smícháním zvoleného prášku a vázací hmoty v předem zvoleném poměru k vytvoření základní hmoty. Ta je po smíchání a zahřátí vstřikována pod tlakem do dutiny formy. Funkcí pojiva je udržet dostatečně nízkou viskozitu na to, aby vyplnilo všechny dutiny. Po řízeném vytužení je následně odstraňováno pojivo ze surových výlisků.

Následně je provedeno slinování pro dosažení vyšší hustoty. Nedílnou a velmi podstatnou Součástí MIM procesu je správný návrh formy a stanovení parametrů vstřikování (například hodnot smrštění) nebo správně nastavit vtokový a vyhazovací systém. [15] V následujících odstavcích jsou stručně zmíněny charakteristiky prášku a pojiva, které jsou graficky vyobrazeny na obrázku č. 3.



Obrázek 4 Kovový prášek a pojivo pro MIM [16]

Prášek – obecně je pro využití metodou MIM vhodný jakýkoli kov, který se vyrábí v práškové formě. Mezi nejčastější zástupce patří: nerezová ocel, nízkolegovaná ocel, nástrojová ocel, měkké magnetické slitiny, žáruvzdorné kovy; titan a jeho slitiny; měď a její slitiny; wolfram, tvrdé kovy a slinuté karbidy. Nevhodný je naopak hliník nebo hořčík, které mají nízkou teplotu tání a oxidy na povrchu – i přesto bývají v omezené míře komerčně zpracovány. [8]

Kovový prášek je vyráběn rozmělnováním rudy, přičemž velikost částic musí být menší než 22 μm . Jemnější prášky zajišťují lepší slinutost a kvalitu povrchu než hrubší, navíc se s menší plochou prachových zrn snižuje riziko navázání nečistot. Nicméně reaktivní prášky (jako například titan) mohou mít velikost až do 45 μm . U reaktivních prášků je dokonce malá velikost částic na škodu, protože díky jejich snazší oxidovatelnosti zvyšuje pravděpodobnost výbuchu. [8]

V současné době je trend používat submikronové částice a nanočástice. Střední a nejčastěji užívané velikosti částic (5–15 μm) je možné dosáhnout v kulových mlýnech, rotačních mlýnech, planetových mlýnech, tryskových mlýnech, vibračních drtičích, lisech a drtičích. Ukázalo se, že použití nanočástic přináší do procesu MIM mnoho výhod, ale postupy manipulace s těmito materiály a jejich zpracování tak, aby nedocházelo k aglomeraci, nejsou stále zdaleka optimální. [10]

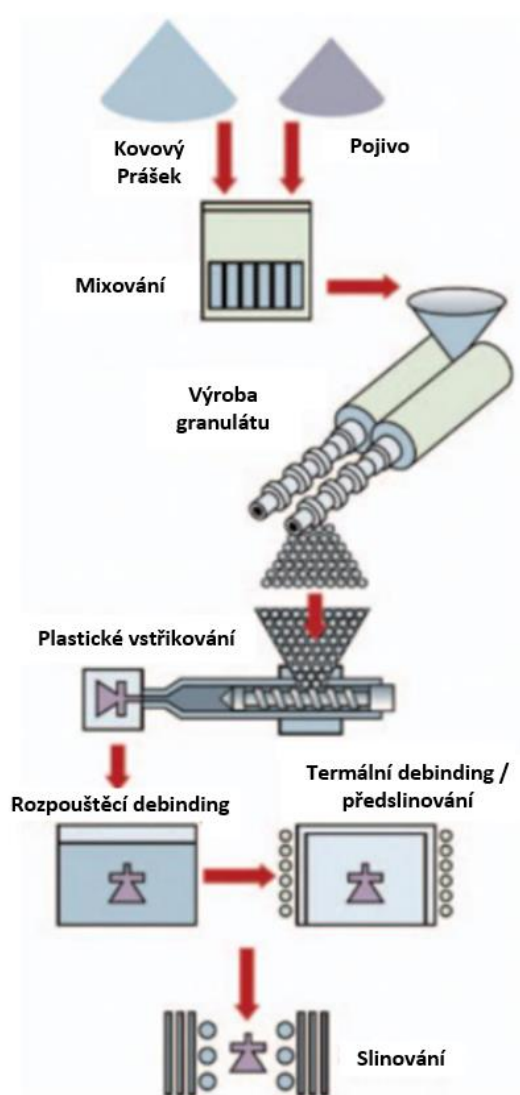
Pojivo – nedílnou součástí MIM procesu je výběr pojiva, který je zásadní při fázi tvarování a fixuje prachové částice až do počátku fáze slinování. Skladba pojiva má zásadní vliv zejména ve směsích s velkými rozdíly ve viskozitě – se zvyšující se molekulární hmotností narůstá i viskozita. Pojivo se obvykle skládá ze tří komponent. Prvním z nich je složka s nízkou molekulovou hmotností, jejíž funkcí je zajistit potřebnou tekutost během tvarování. Druhou složkou je pevnost zajišťující základní polymer, který drží látku pohromadě v surovém stavu. V neposlední řadě je součástí látka, která působí jako pojivo mezi prachovými částicemi a pojivem samotným. [8]

Vzhledem k faktu, že pojivo tvoří 10–20 % hmotnosti směsi, je správný výběr pojiva klíčový zejména vzhledem k požadavkům na odstraňování pojiva. Díky svým vlastnostem jsou nejčastěji používány termoplasty, naopak velmi zřídka jsou užívány reaktoplasty zejména s ohledem na složitý proces rozkladu. Nejběžněji užívaným pojivem jsou parafíny, PEG (*polyetylenglykol*) a POM (*polyoxymethylen*). První dva zmíněné se rozkládají termicky,

poslední pak katalyticky. K dalším způsobům odstranění paliva patří rozpouštění a gelace s následným odpařením. [8; 12]

2.1.2 Postup

Technologie PIM, potažmo MIM se vždy skládá z následujících kroků. Nejprve je připraven prášek, který je smísen s vázací hmotou. Po důkladném promísení je homogenní surovina pod tlakem vstříknuta do formy. Následuje odstranění pojiva při současném zachování tvaru dílce (tzv. debinding). Na závěr je provedeno slinování za účelem dosažení požadovaných mechanických vlastností, také mohou být provedeny post –slinovací úpravy. Následující řádky poskytují podrobnější popis provádění technologie MIM, schématický je MIM proces znázorněn na obrázku č. 4. [8; 17]



Obrázek 5 Postup výroby metodou MIM [8, upraveno autorem]

Příprava suroviny – smísením polymerních pojiv s jemnými kovovými nebo keramickými prášky vzniká vstupní surovina, která je pro komerční účely zejména kvůli snadnější manipulovatelnosti před a při vstřikování dodávána v peletách. Důkladné smísení prášku s pojivem je zásadním krokem pro vznik homogenní hmoty. Jakékoli nesourodosti jako bubliny, pojivové nebo práškové hroudy mohou negativně ovlivnit fázi vstřikování. Homogenita je důležitá zejména kvůli izotropnímu smrštění po odstranění pojiva a při

následném slinování. Při segregaci složek suroviny by tak mohlo dojít k nadměrné poréznosti, vizuálním defektům, deformacím a prasklinám. [8; 10]

Poměr viskozity suroviny k viskozitě pojiva, známý jako relativní viskozita, je důležitým parametrem používaným pro stanovení maximální frakce pro konkrétní práškovou pojivovou směs. Jakmile koncentrace prášku dosáhne maximální úrovně, tok výchozího materiálu je omezen a je pozorován prudký nárůst relativní viskozity. Obsah prášku by se měl pohybovat mezi 50 a 65 % objemu hmoty – nižší obsah by značně zhoršil schopnosti slinování; vyšší obsah by naopak snížil viskozitu a zhoršil proces vstřikování. [10; 18]

Technika mísení je volena s ohledem na požadavky na homogenitu surovin. Obecně lze říci, že pro velkosériové výroby se používají kontinuální způsoby mísení pomocí dvoušnekových extrudérů a střižných válců. Naopak při použití jemných částic od 0,1 do 20 mikrometrů, které mají tendenci se slučovat, je preferováno vsádkové míchání v planetových nebo Z-blade mixerech. Tento proces je pomalejší, avšak zaručuje homogenitu směsi. Dvoušnekový extrudér poskytuje lepší distribuci pojiva, avšak mixér s lopatkami ve tvaru Z lepší distribuci pojiva kolem prachových částic, což vede k lepšímu izotropnímu smrštění po slinování. [10; 18]

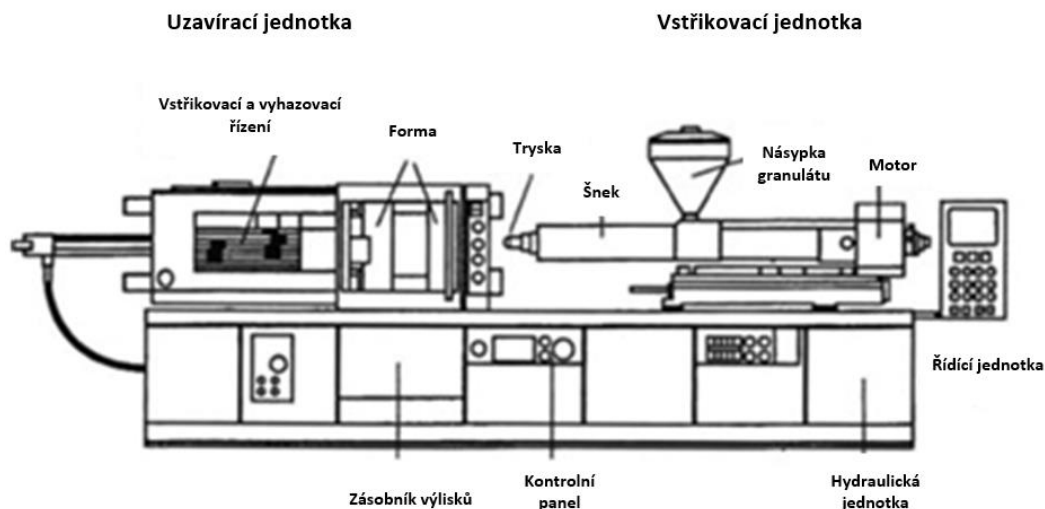
Vstřikování – samotný cyklus vstřikování začíná roztavením suroviny ve vyhřívacím válci formovacího stroje. Prostřednictvím vratného šneku probíhá homogenizace a natlakování „míchačky“. Skutečný tvarovací zdvih nastává s dopředným tahem šroubu ve válci pro vstříknutí dávky roztavené suroviny do nástroje. [15]

Zpracování základní hmoty probíhá prakticky totožně jako při vstřikování termoplastů. Působením teploty v rozmezí 150–200 °C a tření je plastifikována základní hmota a roztavený materiál je tryskou injektován do nahřáté formy. Lisy užívané pro MIM jsou téměř totožné, jako pro vstřikování termoplastů. [12] Narozdíl od strojů pro vstřikování plastů jsou stroje pro PIM (CIM nebo MIM) optimalizovány o oteruvzdorné komponenty, neboť mnoho součástí stroje podléhá intenzivnějšímu opotřebení, zejména šrouby, zpětné ventily, válce a formy. Aby bylo eliminováno opotřebení v podávací části šneku, surovina by měla být roztavena co nedříve. [10]

Samotná vstřikovací jednotka se skládá z šneku, topného systému a trysky, což je schematicky zobrazeno na obrázku č. 5. Topný systém nahřívá materiál na vhodnou teplotu pro snadné proudění. Šnek uvádí do pohybu materiál uvnitř sudu, stlačuje jej a odstraňuje případné bubliny. Nejoblíbenější metodou je použití vratného šneku, horizontálního, hydraulického nebo elektrického stroje, ve kterém šnek míchá surovinu, zatímco se taví. Po roztavení suroviny šnek funguje jako zvon, který vytváří tlak pro plnění formy. Tryska pak vede ohřátou surovinu až k místu vstříknutí do formy. Rztavený materiál je vstřikován do formy pod vysokým tlakem (i více než 60 MPa). Tryska poté transportuje roztavený materiál do formy. [10] Délka vstřikovací trysky by měla být přizpůsobena toku a tlaku suroviny, aby se minimalizovalo ochlazování v průběhu plnění, a to zejména u forem s více dutinami. I přestože se užívají obdélníkové či půlkruhové průřezy vstřikovacích trysek, obecně lze vzhledem k nejnižším ztrátám tlaku pro daný průtok považovat za nejlepší trubice s kruhovým průřezem. [15]

Velmi záleží také na teplotě tavicí komory – pokud je příliš nízká, směs může ztuhnout ještě před kompletním naplněním formy, při příliš vysoké teplotě je roztavená směs příliš řídká, což vede k odkapávání z trysek a prodloužení doby chlazení. Obvyklé teploty tání pro běžné voskové polymery se pohybují mezi 150 °C a 190 °C, a teplota formy je mezi 25 °C a 55 °C. Zatímco pro katalytické systémy je vyžadována teplota formy v rozmezí 100–150 °C, s teplotou tání 200–260 °C. [8] Vzhledem k faktu, že formy jsou chladnější než surovina, dochází

k tepelným ztrátám a postupnému zvyšování viskozity základní hmoty. Aby byl vykompenzován zvyšující se odpor podél průtokové cesty vzniklý v důsledku usazování základní hmoty na stěnách cesty, narůstá také plnicí tlak, dokud není forma plně naplněna. [15]



Obrázek 6 Vstřikovací jednotka pro MIM [19, upraveno autorem]

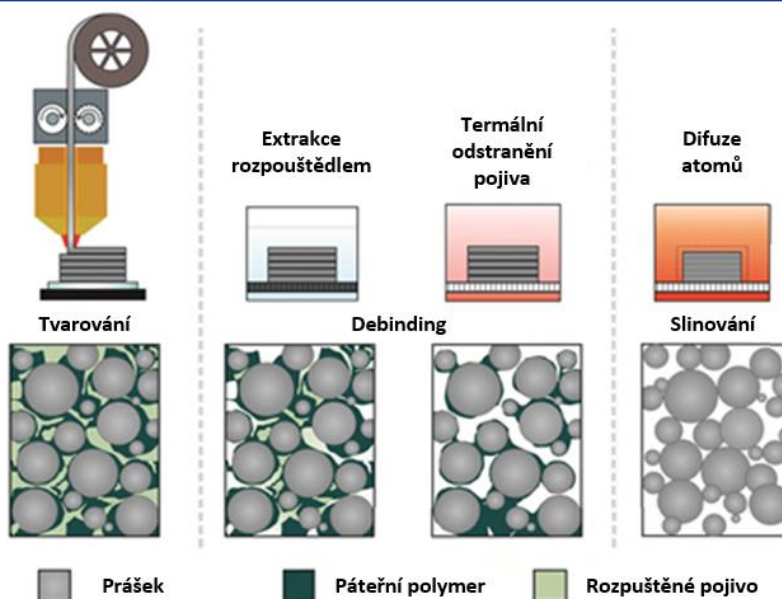
Forma zůstává uzavřená, dokud chladicí kanály umístěné v matrici neochladí formu natolik, že výlisek je sám o sobě schopen udržet tvar, tzn. že jeho teplota musí být pod úroveň kritické teploty průtoku směsi. Poté se vstřikovací jednotka odtáhne od formy, upínací jednotka se otevře a tuhý výlisek je vyhozen ze stroje. Vyjmutí probíhá ručně nebo robotickým systémem, aby nedošlo k poškození dílu. Řídicí systém moderního vstřikovacího stroje zahrnuje hardware a software, kde se nastavují a ukládají podmínky zpracování, aby byla zajištěna reprodukovatelnost dříve používaných výrobních cyklů. [10; 15]

Díky vyšší tepelné vodivosti suroviny je MIM metoda obvykle rychlejší ve srovnání se vstřikováním surových plastů. Rychlost vstřikování bývá nastavena na minimální požadovanou hranici tak, aby byly dutiny plněny bez vzniku defektů. Příliš malá rychlost plnění by mohla vést ke vzniku povrchových nedokonalostí (vznik tokových čar a neúplně vyplněná forma), zatímco příliš vysoká rychlost k oddělení prášku a vázací hmoty, což by v případě reaktivních prvků mohlo vést až k explozi. [8]

Lisovací a vstřikovací proces má některé rysy společné napříč všemi dodavateli. Horizontálně jsou za sebou umístěné vstřikovací jednotka, upínací jednotka a nástroje připojené k upínací jednotce. Pro přípravu nedefektních dílů s minimální pórovitostí jsou velmi důležité následující parametry: rychlost a tlak vstřikování, kvalita nebo i teplota formy [8]

Debinding – odstraňování pojiva je časově nejnáročnější fází technologie, zároveň také nejdražší. Organické polymery musí být zcela odstraněny, protože zbytky uhlíku mohou negativně ovlivnit proces slinování i kvalitu konečného výrobku. Tento proces je také nejkritičtější, špatně zvolená rychlost nebo technika, popřípadě nedostatečné odstranění reziduí může vést ke vzniku defektů (povrchové popraskání, vznik vnitřních dutin, změna tvaru atd.). [10] Schematicky je proces debindingu znázorněn na obrázku č. 6.

Na počátku procesu odstraňování pojiva nejsou na dílu patrné žádné póry – termoplastický polymer (pátevní komponent) je odpovědný za zachování tvaru a zabránění defektům, zatímco je odstraňován nízko tavitelný polymer (vosk). Po odstranění vosku je nově vzniklými póry odstraňován i termoplast, aniž by došlo k poškození struktury. [20]



Obrázek 7 Grafické znázornění debindingu [21, upraveno autorem]

V závislosti na složení pojiva jsou užívány tři hlavní metody: užití tepla, užití rozpouštědla a katalytické odstraňování pojiva. Existují však také některé experimentální techniky, jako je plazmový debinding. [10]

Inovativní metodou je odstraňování vosku pomocí užití kapalného o teplotě 50–70 °C, což je velmi rychlý způsob (v některých případech byl parafin odstraněn do dvou hodin), pro komerční užití je tento způsob však nevhodný, neboť pro udržení CO₂ v kapalném podobě je třeba vlastnictví speciálních vysokotlakých nádob a udržení konstantního tlaku přibližně 35 MPa. [8]

1) tepelný debinding je v kombinaci s rozpouštěním nejčastěji užívanou technikou. Skládá se ze dvou kroků: odstranění primárního pojiva rozpouštěním rozpouštědla a následné odstranění pátečního polymeru i povrchově aktivní látky tepelným debindingem, aniž by byl znehodnocen lisovaný dílec. Při užívání metody tepelného rozpouštění je třeba mít na paměti, že se zvyšujícím se objemem zkapalněného primárního pojiva, se rychlost rozpouštění zvyšuje. Při reakce pátečního polymeru s rozpouštědlem by nemělo dojít k žádné změně tvaru a zejména v případě užití hořlavých rozpouštědel by rozpouštědlo nemělo mít vysokou tenzi par. [8]

Tepelné odstraňování pojiva využívá mechanismů tepelné degradace organických pojiv, která je založena na postupné disociaci polymerů za vzniku lehkých molekul, které se později odpaří z povrchu výlisku. Časová náročnost závisí na typu použitého polymeru. Obecně můžeme tepelný debinding označit za neefektivní. Kvůli riziku vzniku defektů v důsledku příliš rychlému navýšení teploty (vede k nadměrnému zvýšení tlaku páry) je rychlost ohřevu velmi malá, následkem čehož trvá toto odstraňování pojiva řádově desítky hodin (uvádí se 10–60 hodin). Na druhou stranu je tepelný debinding relativně snadný, bezpečný, a i poměrně ekologický způsob. Pro zefektivnění procesu debindingu je užíváno vakuové čerpadlo ke kontinuálnímu odtahu páry, což umožňuje relativně rychlejší ohřívání. [10]

Možností je i odstraňování pojiva za použití porézního sacího substrátu, do kterého je výlisek „ponořen“, a který funguje jako médium pro odtok zahřátého pojiva. Vzhledem k faktu, že pojivo stačí uvést do kapalného, nikoli do plynného stavu, vyžadovaná teplota může být nižší, což omezuje vznik defektů, nicméně celý postup je pomalejší. [10]

2) debinding pomocí rozpouštědel je způsob tepelného odstraňování pojiva, kdy se pojivo odstraňuje degradací, odpařováním nebo extrakcí kapaliny při teplotách v rozmezí 60 až 600 °C. Relativně dlouhá doba spojená s tepelným odstraňováním pojiva se výrazně zkracuje použitím organického rozpouštědla. [10]

Komerčně užívaným způsobem je užívání plynných nebo kapalných rozpouštědel (např. ethanol, hexan, aceton, heptan atd.), přičemž rozpouštědlo o teplotě nejčastěji mezi 50–60 °C odstraňuje nízko tavitelný polymer, vznikají otevřené póry a v následném kroku dochází k vyhoření páteřního pojiva za teplot mezi 200 a 600 °C. Účinnost rozpouštědel souvisí s poměrem povrchu k objemu, teplotou a porézností materiálu. [10]

Při debindingu pomocí rozpouštědel existují tendence užívat pojiva rozpustná ve vodě, protože manipulace s takovými rozpouštědly je mnohem jednodušší než manipulace s organickými rozpouštědly. Možností je také aplikace superkritické extrakce, kdy jsou provozní tlaky rozpouštědel (např. oxid uhličitý nebo propan) kolem 10 MPa a teplota je nižší než 100 °C. Tento způsob však není komerčně využíván kvůli vysokým nákladům na vybavení, náročnosti na přesnost provedení a velmi dlouhé zpracovací době. [10]

3) katalytický debinding vede k mnohem rychlejšímu odstranění pojiva a lepší manipulační pevnosti ve srovnání s tepelným odstraňováním pojiva nebo odstraňováním rozpouštědly. Katalytický debinding je založen na odstraňování vazeb za přítomnosti katalyzátoru, který za vhodně zvolené teploty rozkládá pojiva na menší molekuly, které se následně odpaří. Proces depolymerace tak postupuje od povrchu hlouběji do dílu. Klíčovou roli pro určení rychlosti reakce hraje velikost prachových částic, tvar a členitost lisovaného dílu nebo teplota a koncentrace katalyzátoru. Nejčastěji užívaným pojivem je POM (polyacetal, polyoxymethylen), který umožňuje odstranit pojivo z dílů o tloušťce až do 35 mm bez použití nízkotavitelného polymeru. Katalytické odstraňování pojiva probíhá pod teplotou tání POM, obecně mezi 110 a 150 °C. Pojiva na bázi POM obvykle mají základní polymer necitlivý vůči katalytickému uvolňování, aby byla zachována pevnost a tvar. Tento základní polymer pak bývá odstraněn tepelně. [10; 22]

Sintrování – slinování, sintrace nebo také spékání je označení pro krok, kdy dochází k druhotnému odstranění pojiva a současně se dílec smršťuje do požadovaného tvaru. Slinování probíhá obvykle ve vysokoteplotních pecích vsádkového typu. Při slinování probíhá několik procesů, přičemž všechny vedou ke snížení povrchové energie. Povrchová difuze a transport par jsou vázány na zhrubnutí částic, aniž by došlo ke zvýšení hustoty výlisku. K zvyšování hustoty dochází při hraniční a mřížková difuzi, a při plastickém a viskózním toku. V závislosti na zvoleném materiálu, jeho skladbě a velikosti komponentů je nutné zvolit teplotu, tlak, rychlost ohřevu, ale i způsob chlazení nebo dobu sintrace. Zvolená kombinace je vždy kompromisem mezi nízkým obsahem nečistot, nízkou reziduální pórovitostí a malou zrnitostí. [8]

Slinování je prováděno při teplotách pohybujících se na hraně tání daného kovu, obvykle při teplotách mezi 1 200 a 1 600 °C. Principem slinování je odstranění pórů a zvýšení adheze mezi sousedními částicemi. Obvykle také dochází ke smrštění dílce o 14–20 %. Díky jemnosti částic dosahují výlisky po slinutí 95 až 99,5 % teoretické hustoty a vykazují skvělé mechanické a antikorozi vlastnosti. [10]

Za účelem vytvrzení slinutých součástí musí být v samostatné části slinovací pece řízeně prováděno chlazení. Chlazení se provádí v ochranné atmosféře, aby se zabránilo oxidaci slinutých dílů. Běžně se používají atmosféry na bázi disociovaného čpavku a dusíku, avšak

vakuové atmosféry se používají také například pro díly z nerezové oceli a wolframu. Rychlost ochlazování je kritická, protože mechanické vlastnosti slinutých součástí jsou ovlivněny fázovou transformací materiálu. [23]

Rizikem slinování je nesprávné uložení do spékací pece, které může vést k deformaci výrobků. Slinování pravděpodobně nejvýznamnějším krokem pro dosažení rozměrové přesnosti, hustoty a míry smrštnutí výrobku. [12]

Obecně lze říci, že kombinace vyšších slinovacích teplot a delších slinovacích časů vede k vyšší hustotě a vyšší pevnosti produktu. Zároveň ale dochází k vyšší kontaminaci kyslíkem, a tudíž vyšší křehkosti; v neposlední řadě tato kombinace způsobuje zhrubnutí „zrna“, což je určující pro pevnost. V případě reaktivních prášků závisí optimální slinovací cyklus na počátečních vlastnostech, požadované hustotě, mikrostruktuře a požadavcích na finální čistotu. [8]

2.1.3 Příležitosti a omezení technologie MIM

MIM podléhá několika konstrukčním omezením: vstřikování a vyhazovací mechanismus musí být v rámci formy umístěny v nekritických místech. Díly pro MIM by měly být konstruovány alespoň s jednou rovnou plochou. Pro dosažení vysoce kvalitních výrobků (zejména s ohledem na následné formování, odstraňování pojiva a slinování) je doporučováno nevyrábět dílce se šíří stěny vyšší než 12,5 mm a slabší než 0,1 mm; váhy vyšší než 100 g; a otvory menšími než 0,1 mm v průměru. Důležité je také zachovávat konstantní šířku stěny, vyhýbat se ostrým rohům (rádius by měl být alespoň 0,05 mm) a navrhnout výrobek s rovným povrchem. Všechny výše zmíněné požadavky zužují uplatnění technologie MIM. [8; 18]

Výrobky vytvořené metodou MIM jsou kvalitou struktury považovány za nepatrně lepší než odlitky. Jak u odlitků, tak u dílců vyrobených pomocí MIM mohou být identifikovány mikrostrukturální prázdné prostory – v případě lití jsou mezery obvykle větší v důsledku chlazení tekutého kovu na pevnou látku, naproti tomu mezery vzniklé při MIM jsou obvykle drobné a rovnoměrně rozmístěné v důsledku procesu slinování. Dodatečného zhušťování lze dosáhnout například izostatickým lisováním za tepla. [8]

Vzhledem k potenciálu metody MIM se očekává, že význam této technologie poroste. Rozsáhlý výzkum i snaha společností nalézt způsob komerčního využití se soustřeďuje zejména na využití pro komponenty z nerezové oceli, žáruvzdorných kovů, intermetalických sloučenin nebo sloučenin z titanu. Vzhledem k průběhu procesu je technologie MIM vhodná i pro aplikaci směsí, které obsahují částice nebo krátká vlákna. I přesto mnohé komponenty nemohou být touto metodou vyráběny zejména kvůli specifickým požadavkům na vlastnosti, kterých nemůže být dosaženo použitím monolitického kovu nebo sloučeniny. [8]

Současná technologická omezení prozatím neumožňují využívání veškerých možností technologie MIM. Stále existuje prostor pro optimalizaci procesu, zvýšení účinnosti, produktivity nebo kvality dílců. Například stále existuje prostor pro zlepšení pojiv tak, aby bylo dosaženo co možná nejvyšší tekutosti v roztaveném stavu při zachování vysokého standardu mechanických vlastností v pevném skupenství. Optimalizace může být také uplatněna v přípravě prášku, aby bylo dosaženo co možná nejrovnoměrnější distribuce částic. Stručně řečeno, technologie PIM stále nabízí široké pole příležitostí ke zlepšení prostřednictvím aplikovaného výzkumu. [10]

Mikro-MIM – je převládajícím trendem, který podmiňuje růst a rozvoj trhu s MIM technologiemi je požadavek na miniaturizaci. Zároveň s rozvojem mobilních sítí a zdokonalování telekomunikačních technologií může být pozorován i adekvátní nárůst

poptávky po MIM technologii. Díky nauce o materiálech a vývoji MIM technologie se daří dostát požadavkům plynoucím z éry 5G, jako je například požadavek na elektromagnetickou kompatibilitu, nároky na odvod tepla, vedení elektrického proudu a snižování tolerance, jejichž naplnění je konvenčními výrobními metodami velmi obtížné. Využití tak výlisky vyrobené technologií MIM nachází v boxech pro příjem signálu, lokálních serverech i v koncových zařízeních. Elektromagneticko-izolační funkci plní slitiny na bázi mědi a nemagnetické slitiny na bázi kobaltu. [8]

V případě sintrování výrobků metodou MIM je k zachování polykrystalické struktury součástí nutné užít submikronové prášky s nízkou velikostí zrn, a nízkou viskozitou. Ještě větší roli než v případě makro-MIM hraje použité pojivo, nicméně existuje pouze malé množství vhodných pojiv, která splňují podmínku vysoké molekulární váhy a zároveň příznivého poměru povrchu k objemu tak, aby byla zachována viskozita. [8]

2C-MIM (*Double Component Metal Injection Moulding*) – dvoukomponentní nebo také dvojbarevné komponenty jsou dalším rozšířením MIM metody. Výroba dílů může být prováděna přestříkáním nebo společným vstřikováním. Přestříkávání je typicky manuálně prováděný proces, kde je komponent schlazen na pokojovou teplotu, a poté přemístěn do jiné formy, kde je provedeno přestříkání k dosažení požadovaného tvaru. Po tepelném debindingu a slnutí je výsledkem celého procesu jednotný komponent. Při užití metody společného vstřikování bývá užit pouze jeden vstřikovací systém a výsledný výrobek má jak jádro, tak povrch složený ze dvou různých materiálů. [8]

2.2 Technologie HIP

Metoda HIP (*Hot Isostatic Pressure, izostatické lisování za tepla*) je proces, kdy jsou za kombinace relativně vysokých teplot (obvykle v rozmezí 900 až 1250 °C) a vysokého tlaku (100 až 200 MPa) zhušťovány již slinuté dílce, popřípadě samotný prášek. Díky rovnoměrnému působení tlaku je zajištěna homogenní struktura a hustota dílce. Tento proces je natolik účinný, nákladově přijatelný a vysoce kvalitní, že je pokládán za akceptovatelnou alternativu konvenčních metod výroby jako je obrábění, odlévání či kování. [4]

Výhodou izostatického tlaku je jeho rovnoměrná aplikace ze všech stran dílce, čímž je eliminována vnitřní poréznost, avšak beze změny čistého tvaru. Proces izostatického lisování za tepla je vhodný k úpravě předtvarovaných keramických, kovových či kompozitních dílců, ale i zhušťování prášků ve formě. [24]

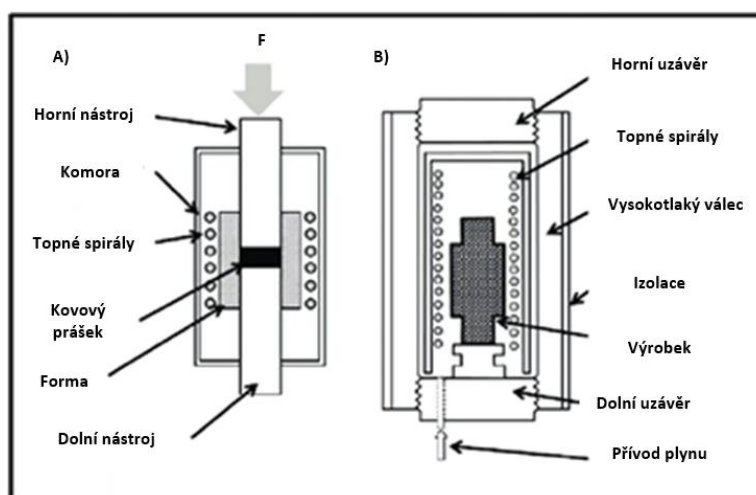
Metodou HIP je možné vyrobit širokou škálu komponentů od jednoduchých po komplikované tvary a hmotnosti dosahující až několik desítek tun (dílece vhodné pro plynovody, ropovody, jaderný sektor). HIP je vhodnou metodou pro výrobu malého množství vysoce kvalitních komponent. [25] Pro opravdu velké lisované dílce je možné konstruovat zařízení s průměrem až 220 cm o výšce čtyři metry a kapacitě až 30 tun. [4]

Technologie HIP byla vynalezena v 50. letech 20. století v Battelle Laboratory Memorial Institute Columbus v Ohio v USA. [26] Výzkumníci z laboratoře vyvinuli metodu spojení tlaku a teploty, určenou pro výrobu jaderných palivových článků. Spojení slitin zirkonia a uranu se zirkoniem do té doby nebylo možné provést běžnými konvenčními metodami. [24]

Obnově pozornosti se HIP těší zejména díky vyřešené výrobě titanu, který se těší širšímu průmyslovému využití, a to zejména díky svým extraordinárním mechanickým vlastnostem. Titan i jeho slitiny mají ve srovnání s oceli vyšší pevnost, hustotu i mez kluzu. Problémem

je pórovitost při odlévání, které se dají eliminovat při užití izostatického lisování za tepla. Při kombinaci odlévání a následné aplikace technologie HIP je možné dosáhnout rovnoměrnější struktury, vyšší dynamické i statické pevnosti, lepší obrobiteľnosti i tažnosti, a v neposlední řadě vyšší životnosti dílců a lepší odolnosti vůči korozi. [27]

Alternativou k izostatickému lisování za tepla v práškové metalurgii je izostatické lisování za studena (*CIP – Cold Isostatic Pressing, izostatické lisování za studena*), případně i lisování prášků v pevných nástrojích, srovnání je znázorněno na obrázku č. 7. Při lisování za studena je prášek uzavřen ve formě, na kterou působí pouze tlak. Médium přenosu je plyn, guma, kapalina či plastická hmota. Forma musí být schopná izostatického přenosu tlaku, avšak za současného uchování tvaru (za normálního tlaku) a mít takovou povrchovou úpravu, která umožňuje snadné vyjmutí po slisování. [2] Tento způsob výroby umožňuje vyrábět homogenní a vysoce husté výlisky a také součástky se zkosenými povrchy, tenkou stěnou nebo velkým poměrem výšky vůči průměru. [27]



Obrázek 8 Srovnání izostatického lisování za tepla s lisováním za studena [29, upraveno autorem]

Technologický pokrok v izostatickém lisování za tepla (HIP) vytváří novou generaci aplikačních příležitostí ke zlepšení výkonu a odolnosti kritických dílů a materiálů. Nové konstrukce lisů a pecí, schopnost jednotného rychlého chlazení a digitální řídicí techniky výrazně zkracují doby cyklů. [24]

Tváření za tepla zvyšuje houževnatost, odolnost vůči zlomu či otěru. Navíc díky kvalitnímu povrchu jsou výrobky vhodné pro povlakování. Ve výrobcích téměř absentují lunkry, karbidická řádkovitost nebo struskové vměstky. Vzhledem k absentující potřebě adicčních úprav je výsledným efektem výrazné snížení výrobních nákladů. [2]

2.2.1 Postup

Výroba metodou HIP se sestává z několika kroků – nejprve je třeba vytvořit formu a vyrobit prášek. Před samotným spékáním následuje naplnění formy práškem a její důsledné utěsnění. Poté je dílec vyjmut z formy a mohou pokračovat postprocesní operace. [4]

Pro dosažení rovnoměrné a maximálně vydatné distribuce prášku je současně s plněním trubcí užíváno vibrací, které umožňují lépe vyplnit úzké a krajové prostory formy, tím je zajištěno, že smrštění prášku bude konzistentní a maximálně předvídatelné. Po odstranění vodních par a odabsorbovaných plynů je forma hermeticky uzavřena a plnicí trubice je zavařena. V případě

jakýchkoli netěsností se argon, který obvykle plní funkci média, váže na práškovou hmotu a značně zhoršuje její mechanické vlastnosti. [4]

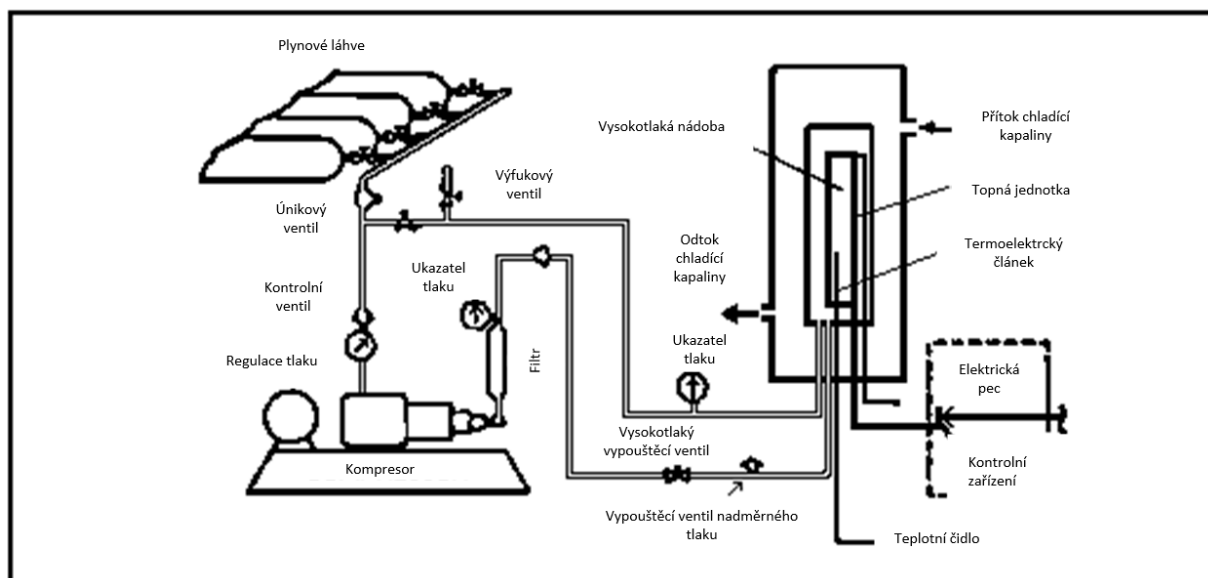
Ve srovnání s lisováním za studena, kdy je forma gumová, při lisování za tepla je pouzdro plechové a jako médium tlaku se používá plyn. Plnění formy probíhá za normální či zvýšené teploty, popřípadě v inertní atmosféře. Po přehřátí na teplotu blízkou té slinovací je forma vložena do izostatického lisu a proběhne zhutnění za tepla. [2]

Samotné spékání obvykle trvá 8 až 24 hodin. V posledních letech však díky zvýšením rychlosti ohřevu i technologie rovnoměrného ochlazování došlo ke zkrácení cyklu na méně než polovinu. Mimo zkrácení cyklu přidává řízené ochlazování možnost kombinace procesu HIP s roztokovým tepelným zpracováním kovových slitin, a zároveň vede k menší zmetkovitosti. [24]

Po vytvoření vakua a hermetickém uzavření formy je nádoba naplněna plynem, který je následně zahříván, což vede ke zvýšení tlaku v nádobě. V závislosti na zvoleném materiálu se liší teplota a tlak plynu, teplota se pak pohybuje pod 80% teploty tání, aby bylo zabráněno kapalně fázi. [4] Vyjma speciálních aplikací, které se vymykají obvyklému způsobu se tlak pohybuje v rozmezí 10 až 207 MPa při teplotách do 2000 °C. [24]

Po natlakování nádoby je po určitý čas ve formě udržována konstantní teplota i tlak. Poté následuje doba postupného chlazení. Moderní systémy URC (rovnoměrné rychlé chlazení) jsou dokonce schopny zkrátit čas chlazení až o 80 %, což představuje zásadní zrychlení výroby. Navíc toto rovnoměrné a rychlé ochlazení omezuje deformaci dílů a zabráňuje kontaminaci povrchu. Díky rychlému procesu tuhnutí lze uvažovat o nových složeních slitin, které není možné odlévat nebo kovat (například více odolné nástrojové oceli, korozivzdorné nerezové oceli nebo otěruodolné kompozitní materiály). Při izostatickém lisování za tepla nemají prvky čas segregovat se jako u litých dílů. [4]

Po vyjmutí dílce z formy lze provést rozličné dodatečné úpravy, jako např. adiciónální tepelné zpracování, broušení, a další povrchové úpravy. [4] Průběh procesu HIP je graficky znázorněn na obrázku č. 8.



Obrázek 9 Schéma zapojení HIP [26, upraveno autorem]

Metoda izostatického lisování za tepla nachází využití i v kombinaci různých práškových složek, popřípadě i prášku s pevnou látkou s cílem dosažení stejnorodé struktury materiálů, v nichž absentují póry nebo vycezeniny. Kombinací různých materiálů lze zároveň v závislosti na náročnosti profilu dílu užívat drahé materiály pouze na exponovaných místech, což ústí v ekonomické úspory. [27]

Specifika formy a prášku – při výrobě formy je nejdůležitější dodržet integritu svárů, a to zejména vzhledem k faktu, že při používání je nádoba pod tlakem. Po montáži kovových vložek a svaření pomocí TIG (*Tungsten inert gas, svařování wolframovou elektrodou v inertním prostředí*) je provedena tlaková zkouška těsnosti zavedením a natlakováním hélia nebo argonu. [4] Některé formy / komory užívané pro HIP bývají mnohoplášťové, a to zejména s ohledem na bezpečnost, protože stlačitelný plyn podstatně zvyšuje vnitřní energii v tlakové nádobě. [24]

V závislosti na zvoleném tlaku a teplotě jsou HIP jednotky konstruovány s rámem nebo bez rámu (pro tlaky vyšší než 100 MPa a průměry nad 900 mm je doporučována konstrukce s bezpečnostním rámem). Kromě samotné konstrukce je přítomna tepelně izolovaná tlaková nádoba. Nejčastějším izolantem bývají keramická vlákna a molybdenové desky. V neposlední řadě je třeba kromě systému pro přívod argonového plynu instalovat i topný systém, který je opět v závislosti na teplotě buď molybdenový (teploty do 1350 °C), popřípadě uhlíkové grafit/wolframové pece (teploty do 2200 °C). [4]

Ideální tvar prachových částic je kulovitý, takové částice mají schopnost být rovnoměrně distribuovány, při spékání se chovají konzistentně a při deformaci předvídatelně. Kulovitý tvar částic vzniká pomocí plynové atomizace, která spočívá v protlačení roztaveného kovu tryskou, za níž je fragmentován inertním plynem (obvykle argonem nebo dusíkem), díky němuž tuhne. Na dně komory se pak hromadí sférické částičky kovu. [28]

2.2.2 Sekundární obrábění pomocí metody HIP

V současné době je komerčně využívanějším způsobem užívání metody HIP jako způsobu sekundárního zpracování již hotových odlitků/výlisků, nicméně konsolidace prášků je taktéž na vzestupu. Výhodou přímé konsolidace prášků je relativně snadné zhutnění materiálů, které jsou obtížné zhutnitelné běžnou technologií slinování. Nevýhodou nicméně je požadavek na komplikované procesy, jako je formování kapsle, odvzdušnění a odstranění kapsle po procesu HIP. [4; 26]

Ekonomicky se konsolidace prášků pomocí metody HIP vyplatí pouze při dostatečné sériovosti výroby. Individuální sintrování je ekonomicky nákladné, využívá se například při materiálově obdobných dílech, které se sintrují společně v objemnějších tlakových komorách. Nedostatek takových prostor je však překážkou rozvoje technologie. [27]

V případě sekundárního zpracování dílců je proces HIP široce využíván ke zlepšení výkonu a odolnosti litých kovových dílů. Sekundární zpracování se využívá k zahušťování odlitků, dílů ze slinutého prášku (slinuté karbidy, keramika nebo výlisky vyprodukované metodou MIM) nebo difusnímu spojování kovových součástí. [4]

Sekundární aplikace metody HIP zahrnuje zhutnění výrobku o výchozí hustotě 92 % a vyšší. Defekty dílců, které obvykle obsahují vnitřní dutiny a trhliny v důsledku smršťování během tuhnutí, jsou zhojeny v procesu HIP. Také je eliminována vnitřní poréznost a odlitky procesované metodou HIP mají typicky únavovou životnost a mechanické vlastnosti srovnatelné s dražšími tvářenými nebo kovanými výrobky. [24; 26]

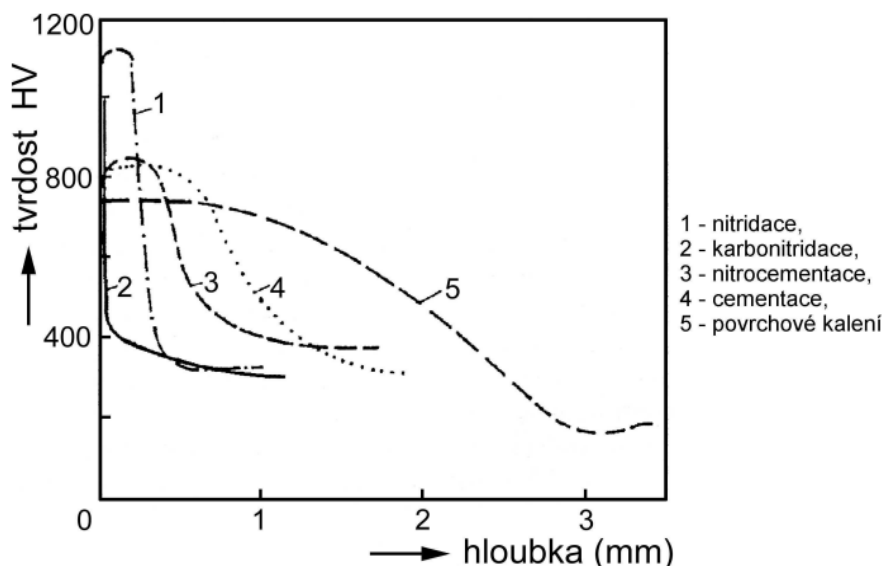
K hlavním výhodám metody HIP patří schopnost konsolidace odlitků na 100% teoretické hustoty, odstranění pórů a defektů a také zlepšení mechanických vlastností, zejména pak zvýšení odolnosti vůči nárazu, opotřebení, otěru, nárazu a celkově zlepšení tažnosti. Díky tváření téměř čistého tvaru s malými tolerancemi není potřebné (nebo pouze jen v omezené míře) následné obrábění. Proto je nižší zmetkovitost a celková ekonomická úspornost. [24]

Metoda HIP je využívána v mnoha průmyslových odvětvích – např. zpracovatelský nebo přeprava surovin (ropa, zemní plyn atd.). [4] Uplatnění nachází také v leteckém, lékařském a energetickém průmyslu s vysoce výkonnými kovy, jako je titan, superslitiny na bázi niklu a nerezové oceli. V současné době je na vzestupu také využití v automotive průmyslu, zejména kvůli zvyšujícím se požadavkům na odlehčení a nižší spotřebu paliva. Dnes je metoda HIP užívána také při výrobě lopatek turbín, kloubních implantátů, diamantových kuliček pro drátové řezání a diamantových segmentů pro řezné kotouče; dále pak pro difuzní lepení nebo nanášení tenkých vrstev drahých kovů. [4; 24]

2.3 Chemicko-tepelné zpracování

Následující kapitola se soustřeďuje na zevrubný popis čtyř vybraných metod chemicko-tepelného zpracování, konkrétně cementace, nitrocementace, nitridace a karbonitridace. Metody jsou založeny na difuzním sycení povrchu oceli dusíkem, uhlíkem nebo oběma současně. Odlišují se teplotou, koncentrací daných prvků v difuzní vrstvě a tím i kýženými vlastnostmi povrchové vrstvy. [30]

Díky chemicko-tepelnému zpracování je možné substituovat drahé materiály levnějšími a méně kvalitními při dosažení obdobných vlastností, avšak za značných ekonomických úspor. [31] Na obrázku č. 9 je znázorněno srovnání vlastností, kterých je možné dosáhnout díky využití různých způsobů chemicko-tepelného zpracování, konkrétně srovnání tvrdosti a hloubky vrstvy.



Obrázek 10 Srovnání hloubky a tvrdosti při různých způsobech chemicko-tepelného zpracování [30]

2.3.1 Cementace

Cementace je proces nauhličování povrchu ocelí. Atmosférický uhlík se na povrchu oceli slučuje se železem a vzniklý karbid se difuzním spádem rozpouští až do té doby, než

koncentrace uhlíku v povrchové vrstvě dosáhne eutektika. [32] V závislosti na množství přítomných legujících prvků se mění koeficient difuze uhlíku a tím i rychlost difuze. [6]

Cementují se především oceli třídy 12 (uhlíkové) a třídy 13–16 (slinované). Samotná volba oceli závisí na požadovaných vlastnostech výsledného výrobku. Uhlíkové oceli jsou vhodnější na konstrukčně jednodušší a méně namáhané dílce. Tyto oceli je vhodné dvojité kalit, čímž dochází ke zlepšení mechanických vlastností vlivem zjemnění zrna. Slinované oceli naproti tomu vykazují větší houževnatost, pevnost a plasticitu jádra a jsou vhodné pro součástky, které jsou namáhány většími měrnými tlaky. Přítomné legující prvky (zejména chrom a mangan) zvyšují pevnost jádra a odolnost vůči tlakům a zlepšují prokalitelnost. Jsou však citlivější na přehřátí a hrubnutí zrna. Chromniklové oceli třídy 16 jsou užívány na nejvíce namáhané dílce, jsou vysoce prokalitelné, houževnaté a vykazují pevné jádro (až 1200 MPa). Jejich vysoká cena však vyvažuje jejich výhody, a proto jsou používány výjimečně. [33]

Nejčastěji jsou cementovány oceli s nízkým obsahem uhlíku (0,1–0,25 %), nicméně pro výrobu vysoce namáhaných součástek bývá výchozí obsah uhlíku 0,25–0,35 %. Dalším požadavkem na ocel je vysoká houževnatost jádra schopná rozložit měrné tlaky tak, aby nedošlo k protlačování, neboť změna tvaru není žádoucím jevem. [6; 30; 34; 35; 36]

Výsledný obsah uhlíku ovlivňuje zejména sytící schopnost cementačního prostředí (tzv. uhlíkový potenciál), doba cementace, teplota a přítomnost legujících prvků. Se zvyšujícím se obsahem karbidotvorných legujících prvků (chrom, wolfram, vanad, molybden, mangan) narůstá rychlost difuze, a díky vaznosti na uhlík se zvyšuje obsah karbidů v povrchové vrstvě. Naproti tomu nekarbidotvorné prvky (křemík, nikl) zpomalují vaznost uhlíku a snižují jeho obsah v povrchové vrstvě. [6; 30]

Hloubka difuzní vrstvy se pohybuje mezi 0,1–2 mm, závisí však na konstrukčním řešení a způsobu namáhání součástky, v potaz musí být bráno i broušení, které vyžaduje přídavek až 0,25 mm. Do 0,5 mm je cementovaná vrstva považována za tenkou a používá se pro malé měrné tlaky; v rozmezí od 0,5–1,5 mm se jedná o střední vrstvu; a nad 1,5 mm silná vrstva určená pro velké měrné tlaky. [6; 30; 35; 36]

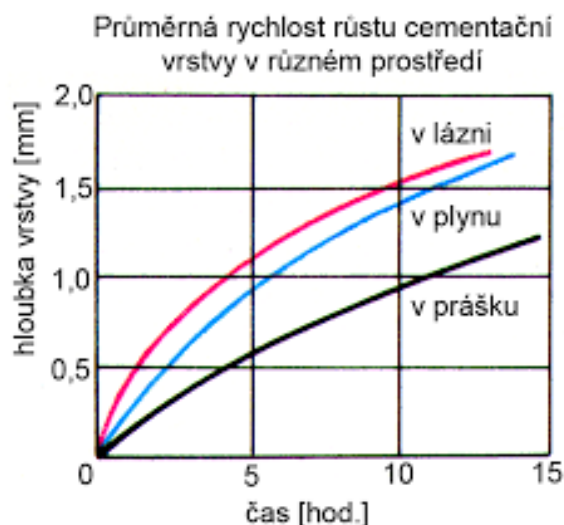
Cementace se provádí běžně při teplotách v rozmezí 900 a 950 °C (někteří autoři uvádí 910–930 °C [30; 34]) tedy v austenitické oblasti nad křivkou A_{C3} . [30]

Výsledné rozložení uhlíku směrem od povrchu do jádra výrazně klesá, což ovlivňuje mechanické vlastnosti povrchu. Ideální koncentrace uhlíku na povrchu se pohybuje mezi 0,75–1,1 %, tedy v oblasti eutektoidní nebo nadeutektoidní koncentrace. Při hodnotách vyšších než 1 % obsahu uhlíku jsou vyloučeny nadeutektoidní karbidy a v případě jejich rozložení na okraji zrn snižují houževnatost povrchu. Při vyšších hodnotách také klesá pevnost v krutu i ohybu, snižuje se vrubová houževnatost i mez únavy. [6; 30; 35; 36]

Výsledkem procesu cementace je otěruvzdorný povrch s vysokou povrchovou tvrdostí (až 800 HV) odolný vůči opotřebení a únavě a s houževnatým jádrem. Tento způsob chemicko-tepelného zpracování se používá například při výrobě hřídelí, řetězových nebo ozubených kol, pouzder, vodítek nebo čepů, tedy u součástek, kde je vyžadována dlouhá životnost při cyklickém zatěžování. Součástí procesu cementace je následné tepelné zpracování v podobě kalení (martenzitické, dvojité) v oleji nebo solné lázni nebo popouštění při nízkých teplotách, kdy je dosahováno výsledných vlastností. [6; 30; 32; 34]

Podobně jako u jiných způsobu chemicko-tepelného zpracování, lze cementaci provádět v pevném, plynném, kapalném nebo například i pomocí plazmy či využití vakua, a volba

způsobu ovlivňuje rozložení i obsah uhlíku v cementované vrstvě, ale také hloubku vrstvy či čas cementování, jak je znázorněno na obrázku č. 10. [6; 7; 30; 32; 34]



Obrázek 11 Průměrná rychlost růstu cementační vrstvy v různém prostředí [38]

Cementace v pevném prostředí – nejstarším způsobem cementace je cementace v prášku, která je dnes na ústupu. V současnosti se používá téměř výhradně na menší a jednodušší součástky, neboť je relativně levná a technologicky nenáročná. K hlavním nevýhodám patří časová náročnost cementace, zejména dlouhá doba ohřevu a chlazení vsázky, a vznik nerovnoměrných cementovaných vrstev. [6; 30]

Při cementaci v prášku jsou dílce vloženy do žáruvzdorné nádoby a zasypány cementační směsí, která se skládá z dřevěného uhlí a uhličitanu barnatého (poměr je přibližně 5:1). Po uzavření nádoby a vložení do pece je udržována konstantní teplota vyšší než křivka A_{C3} , uvádí se 920–930 °C [6; 34]; (někteří autoři uvádí 880–920 °C [39]) Doba a teplota sycení závisí na cílených mechanických vlastnostech. Nižší teploty jsou užívány pouze u velmi malých dílců, kde hrozí příliš rychlé nauhličení v celém průřezu. [39]

Reakcí dřevěného uhlí s kyslíkem vzniká CO, který se ve styku s ocelovým povrchem rozkládá na CO₂ a uhlík. Poměr oxidu uhelnatého a uhličitého by měl být 99:1, v případě opačného poměru by naopak probíhalo nežádoucí oduhličování. Přebytek nauhličující složky (CO) je podmínkou pro úspěch procesu. Jako aktivátor procesu působí uhličitán barnatý, jehož rozkladem vzniká CO₂, který reaguje se dřevěným uhlím za vzniku dalšího CO a následným rozkladem na atomy uhlíku. Chemické reakce jsou znázorněny v rovnicích 2.1, 2.2 a 2.3. [6; 30; 35; 39; 40; 41]



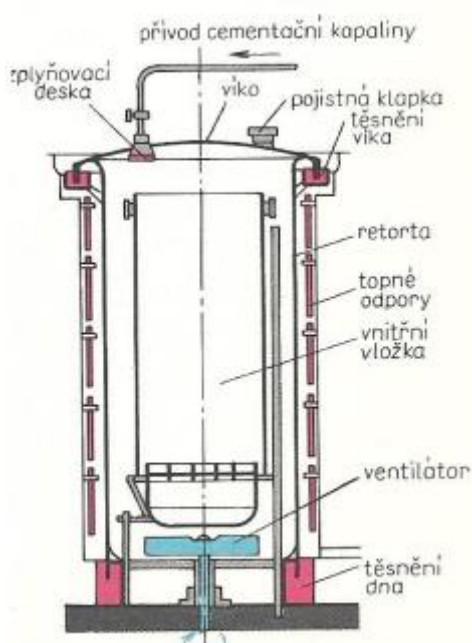
Cementace v plynném prostředí – v současné době nejužívanějším způsobem cementace je cementace v plynném prostředí. Tento způsob je vhodný pro velké výrobní objemy, kde jsou součásti umístěny v průběžných pecích, které zároveň umožňují post-cementační operace jako

je kalení či popouštění. Nejčastěji se jedná o pece typu MONOCARB (viz obrázek č. 11). Pro malosériovou výrobu jsou pak využívány elektrické plynotěsné šachtové pece. [6; 39; 40; 42]

Aktivní atmosféra, obvykle tvořena směsí oxidu uhelnatého a uhlovodíků (metanu, butanu a propanu), jejichž disociací vzniká aktivní uhlík, se zpravidla upravuje spalováním mimo pec. Rozkladem oxidu uhelnatého a metanu, popřípadě vyšších uhlovodíků vzniká aktivní uhlík, ale také CO_2 a H_2 , tedy složky, které snižují sytící potenciál dané atmosféry (více viz rovnice 2.4 a 2.5). Do pece je proto nutné přivádět stále novou směs o teplotě 910–930 °C. [6; 34; 35; 39; 40; 42]

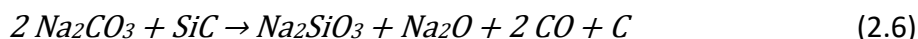


Nespornou výhodou cementace v plynném prostředí je možnost zvyšovat či snižovat uhlíkový potenciál atmosféry a měnit teplotu, čímž lze efektivně kontrolovat kvalitu nauhličené vrstvy. Pozitivem je i rychlost sycení, které je rychlejší než v pevném prostředí (řádově 4–6 hodin), a čistota dílce po dokončení cementace. [6]



Obrázek 12 Pec typu MONOCARB [6]

Cementace v kapalném prostředí – v praxi je cementace v kapalném prostředí zřídka užívaný způsob zejména kvůli náročnosti likvidace jedovatého odpadu. Jedná se o zřídka užívaný způsob výhradně pouze pro menší dílce s nízkou cementační vrstvou. Vzhledem k jedovatosti solných lázní, které obsahují chlorid sodný, draselný nebo barnatý a kyanid sodný, obvykle v poměru 80 % soli, 10–15 % NaCl a 5–10 % SiC . Tyto soli v reakci s karbidem křemíku disociují a uvolňují uhlík, který se váže na ocel (viz rovnice 2.6). V případě teploty nižší než 880–920 °C je ocel navíc obohacována dusíkem. Proces je poměrně rychlý a cementovaná vrstva je rovnoměrná. Po procesu je dílce možné okamžitě zakalit. [6; 30; 34; 35]

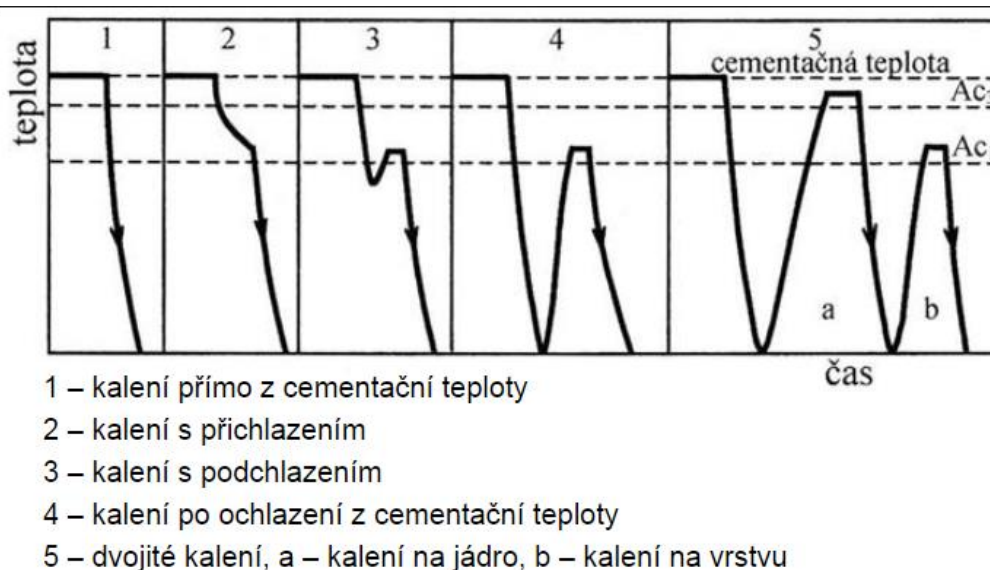


Plazmová cementace – využívá elektrického napětí několika stovek voltů a sníženého tlaku (0,1–2,7 kPa). Dílec je zapojený jako katoda a anodou. Sycení plazmovou cementací probíhá velmi rychle (řádově do hodiny), je možná velmi přesná regulace cementované vrstvy a výsledkem je vysokojakostní povrchová vrstva. [34; 43]

Vakuová cementace – je moderní modifikací vakuování v plynu. Za nízkého tlaku (1–55 kPa) a teplotě 950–1050 °C je do vakuové peci vháněna aktivní atmosféra (disociovaný propan nebo metan). Díky vyšší teplotě je kinetika procesu vyšší, a proces tak trvá přibližně 45 minut. Cementaci zrychluje i fakt, že je pec využívána pouze na část výrobního cyklu. Proces vakuové cementace se skládá ze dvou fází – nejprve je povrchová vrstva sycena uhlíkem. Poté jsou dílce vyjmuty z pece a uhlík difunduje směrem k jádru, čímž se prohlubuje vrstva. [34; 37; 44; 45; 46]

Rizikem této metody cementace je užití příliš vysoké teploty a hrozba růstu austenitického zrna. K zásadním nevýhodám patří vysoká pořizovací cena komplikovaných cementačních zařízení. Podobně jako u plazmové cementace je výsledkem vakuové cementace povrchová vrstva vysoké jakosti – vrstva je rovnoměrná a pomocí této metody lze cementovat například i malé otvory. [34; 37; 43; 44; 45]

Post-cementační tepelné zpracování – pro dosažení kýžených vlastností (tvrdost a odolnost vůči opotřebení) jsou oceli po cementaci anizotermicky zušlechťovány – kaleny, popouštěny, naměkko nebo normalizačně žhány. Volba konkrétního způsobu kalení závisí na typu cementační oceli, metodě cementace a míře namáhání sintrovaného dílce. Po jakémkoli způsobu kalení následuje nízkoteplotní popouštění (teploty v rozmezí 150–200 °C po dobu 1–2 hodin), při němž dochází ke stabilizaci struktury a snížení vnitřního pnutí. [6; 30] Pro zmenšení podílu zbytkového austenitu se některé oceli po zakalení a následném ochlazení ještě zmrazují. [41; 47] V několika následujících řádcích je velmi zevrubně popsáno kalení z cementační teploty, kalení s předchlazením, kalení s podchlazením, kalení po ochlazení, přerušované a dvojité kalení (viz obrázek. 12)



Obrázek 13 Způsoby martenzitického kalení [48]

Kalení z cementační teploty (kolem 1050 °C) je nejsnazším způsobem kalení. Přímé kalení je užívaným způsobem pro dědičně jemnozrnné oceli s obsahem niobu, zirkonu nebo titanu. Tento druh ocelí je charakteristický vysokoteplotním cementováním, neboť u nich nedochází ani při vysokých teplotách k hrubnutí zrna. Pro ostatní druhy oceli hrozí riziko podstatného zhrubnutí austenitického zrna vlivem vysokých teplot a vznik deformací v jádře i na povrchu. [6; 30; 33; 47; 49]

Aby bylo omezeno riziko vzniku deformací, je možné užívat kalení s předchlazením. Dílec je nejdříve ochlazen na teplotu nad A_{C1} (750 až 780 °C) a následně kalen. Tento způsob snižuje velikost vnitřních pnutí a deformací, nicméně nevede ke zjemnění austenitického zrna. [6; 30; 33; 47; 49]

U běžných cementačních ocelí se v současné době nejvíce užívá kalení s podchlazením. Součástka je nejprve ochlazená pod teplotu A_{C1} (727 °C) a poté se ohřeje na kalicí teplotu mezi A_{C1} a A_{C3} . Změna teplot vede k rekrystalizaci a následnému zjemnění austenitického zrna. Kromě toho dochází ke snížení obsahu zbytkového austenitu a redukci vnitřních pnutí. [6; 30; 33; 47; 49]

Možností je i kalení po ochlazení z cementační teploty. Po ochlazení součástky na pokojovou teplotu je následně ohřáta na kalicí teplotu a znovu ochlazená. [33; 47; 49]

Přerušované (nebo také lomené kalení) tkví v rychlém ochlazení a následném přemístění dílce do mírnějšího ochlazovacího média, kde dochází k martenzitické přeměně. Nejčastěji bývá volena kombinace voda-vzduch, voda-olej nebo olej-vzduch. Přerušované kalení je vhodné pro tvarově složité nebo objemné dílce, které mají tendence praskat při zakalení do studené lázně. [50]

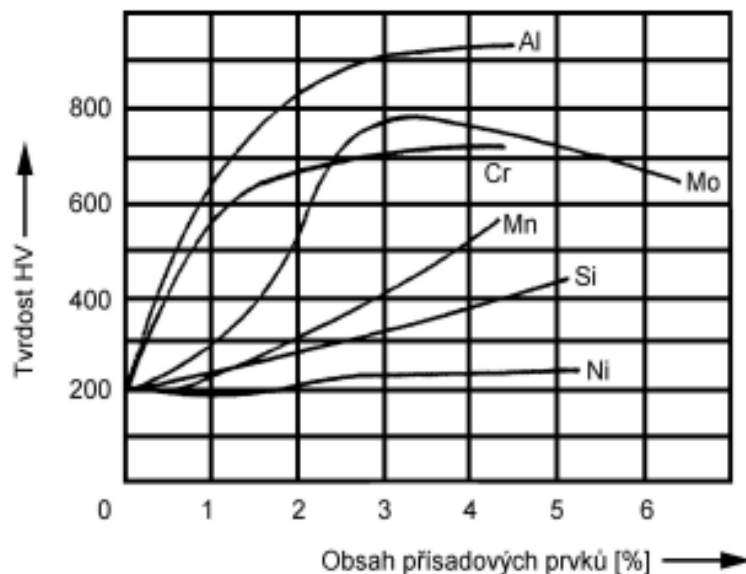
Posledním způsobem kalení užívaným pro součástky s velkým provozním zatížením je dvojité kalení. Při prvním kalení je zjemněno austenitické zrno a dochází i k rozpouštění sekundárního cementitu v povrchové vrstvě. Toto kalení probíhá z teplot nad úrovní křivky A_{C3} . Při druhém kalení, ke kterému dochází z teplot na A_{C1} se v povrchové vrstvě vytváří jemný martenzit. [6; 30; 33; 47; 49]

2.3.2 Nitridace

Proces nitridace spočívá v difuzním nasycování povrchu oceli aktivním dusíkem za účelem vytvrzení povrchu, avšak za současného zachování houževnatého středu. Samotný proces nitridace se skládá z ohřevu dílce a udržování konstantní teploty za současného kontaktu s parciálně disociovaným dusíkem. Celý proces je prováděn v teplotním rozmezí cca 500–550 °C (rozmezí uváděná jednotlivými autory se liší v řádu jednotek stupňů – např. 495 až 565 °C [51]; 480–530 °C [52]; obecně tedy lze říct, že se jedná o podeutektoidní teploty (pod A_{C1}). V tomto teplotním rozmezí vykazuje dusík nevyšší schopnost nasycení feritu, a to až do koncentrace 12 % N. Díky přítomnosti dusíku vykazují nitridované dílce korozivzdornost v některých podmínkách.

Nitridovaná vrstva se vyznačuje vysokou tvrdostí (1000–1200 HV). [34; 54] Atomární dusík reaguje se železem a dalšími nitridotvornými prvky (např. hliníkem, vanadem, chromem nebo molybdenem), a v legovaných ocelích vytváří tvrdé nitridy (CrN , Cr_2N , AlN , VN) nebo karbonitridy, které jsou ve srovnání s nitridy železa stálejší ve vysokých teplotách. Naproti tomu u uhlíkových ocelí je nárůst tvrdosti zanedbatelný. [35; 46; 47; 49; 55] Přítomnost hliníku je ovšem dvojsečná, neboť i přestože spolu s chromem vykazuje nejvyšší potenciál pro zvýšení tvrdosti, zapříčiňuje zároveň i největší křehkost vrstvy. Pro dosažení houževnatější

nitridované vrstvy je proto vhodné užívat ocel s vyšším podílem molybdenu. [53; 56] Graficky je vliv legujících prvků na tvrdost svrchní vrstvy znázorněn na obrázku č. 13.



Obrázek 14 Vliv legujících prvků na tvrdost nitridační vrstvy [56]

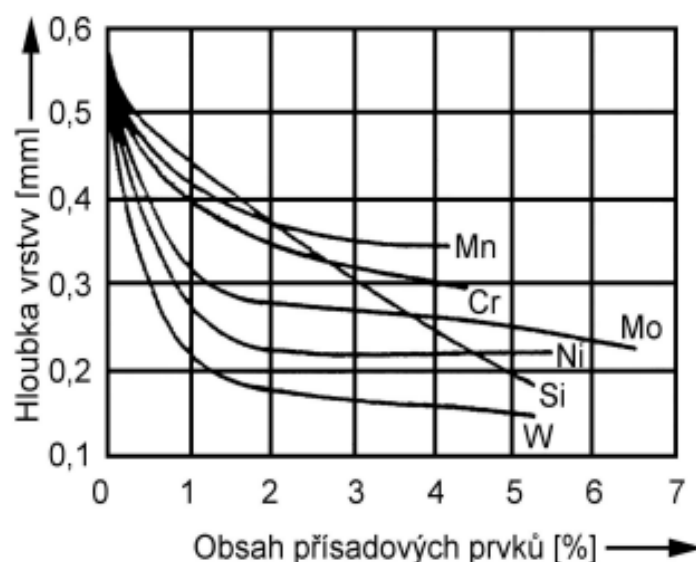
Nitridace zvyšuje mez únavy materiálu i odolnost vůči opotřebení, a to zejména pokud je dílec vystavován působení vyšší teploty. Uvádí se, že tvrdost cementovaných dílců klesá již při 180 °C, zatímco nitridované dílce mají schopnost udržet si svou tvrdost až do 500 °C. Pokud jsou navíc před samotnou nitridací zušlechťeny, je eliminováno riziko vzniku deformací, popřípadě změn rozměru. [51] Pokud nejsou, může při nitridaci dojít ke zvětšení součásti o 6–10 μm, a proto po nitridaci musí být zařazeno broušení. [6; 34; 39; 40; 41; 47; 54]

Nitridování je časově náročné, uvádí se, že proces vytvoření nitridové vrstvy trvá 5 až 80 hodin. S ohledem na požadovanou funkci a míru namáhání součástky je prováděna nitridace, aby bylo dosaženo požadovaného fázového složení povrchové vrstvy, což ovlivňuje finální vlastnosti povrchu součásti. [53] Hloubka vrstvy vytvořená nitridací dosahuje 0,05–0,65 mm. [51] Se zvyšujícím se podílem legujících prvků se hloubka snižuje, jak je znázorněno na obrázku č. 14. [56]

Hloubka nitridované vrstvy závisí na velikosti součástky a plánované míře namáhání. Pro přenos větších měrných tlaků je třeba zvolit vrstvu hlubokou 0,4–0,5 mm, naproti tomu pro součástky namáhaným ohybem postačuje hloubka 0,1–0,2 mm. [57]

Ve srovnání s cementací je nitridace prováděna ve feritické, nikoli v austenitické oblasti a požadovaných vlastností je dosaženo již v procesu sycení dusíkem. Narozdíl od cementace se neprovádí následné tepelné zpracování. Nitridované dílce však jsou však méně odolné vůči tlakovému namáhání [39; 40; 41; 47]

Na vlastnosti vrstvy má vliv také obsah legujících prvků v oceli, protože dusík se nejdříve slučuje s prvky s vyšší afinitou. Ačkoli je možné nitridovat všechny druhy oceli, oceli s vyšším podílem legujících prvků mají vliv na povrchovou tvrdost, a tudíž na úspěch procesu nitridování. S narůstajícím podílem legujících prvků narůstá i povrchová tvrdost. [33; 53; 56]



Obrázek 15 Vliv legujících prvků hloubku nitridové vrstvy [56]

Na základě obsahu legujících prvků se oceli dělí do skupin (třídy 11–17, 19). Charakteristikou nelegovaných ocelí (třídy 11 a 12) je nitridace při teplotách mezi 550 a 580 °C, při níž vzniká vrstva o tvrdosti až 700 HV a hloubce 0,6–1,1 mm. Nízkoalegované oceli (třída 13) vykazují díky vanadu vyšší tvrdost povrchové vrstvy po nitridování než nelegované oceli. Tato třída ocelí je užívána u středně namáhaných součástí. [34] Díky vysokému obsahu chromu (oceli typu CrV, CrMoV, MnCr) vznikají na povrchu dílců vyrobených z ocelí ze skupiny středně a vysokoalegovaných ocelí (třída 14 a 15) tvrdé nitridy a tyto dílce pak dobře snášejí velké měrné tlaky a únavové namáhání. Nitridační vrstvy u ocelí třídy 16 dosahují velké hloubky, avšak nemají vysokou tvrdost. Ačkoli pro nitridaci nejsou proto příliš vhodné, nachází využití u vysoce namáhaných součástí jako jsou např. klikové hřídele. Oceli třídy 17 se nitridují zřídka, a to pouze za účelem zvýšení tvrdosti povrchu. Nitridace snižuje korozivzdornost povrchu, avšak zvyšuje odolnost vůči zadíráání a opotřebení. [53] Nitridace nástrojových ocelí zvyšuje životnost nástrojů, pro nástroje pracující za zvýšené teploty je nitridace prováděna v kaleném stavu, nitridační vrstva u je relativně mělká (0,1 mm), avšak tvrdá. [34] Podobně jako v případě jiných druhů tepelně-chemického zpracování, je nitridace prováděna v různých prostředích – plynném, kapalném, ale i v iontovém prostředí.

Nitridace v plynném prostředí – jako aktivní atmosféra pro nitridaci v plynném prostředí je užíván technicky čistý amoniak, popřípadě směs amoniaku a dusíku. Disociovaný amoniak je zdrojem adsorbovaného dusíku, jehož část spolu s legujícími prvky nebo železem vytváří na povrchu tvrdé nitridy. Nitridační atmosféra musí být neustále obnovována, protože volné atomy dusíku vytváří adsorpce neschopné molekuly (viz rovnice 2.7 a 2.8). [39; 41] Je nutné udržovat vysoký parciální tlak amoniaku, při kterém je vaznost dusíku nejsilnější a růst difuzní vrstvy tedy nejrychlejší.

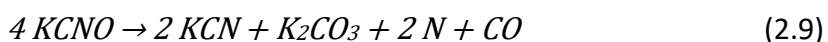


Na hloubku i tvrdost vrstvy má vliv jak tepelný, tak chemický proces, tedy dvě nedělitelné části nitridace. Množství disociovaného amoniaku, konkrétně podíl rozloženého dusíku a vodíku

v objemu nitridační atmosféry ovlivňuje chemický proces. Nízká míra disociace ústí v přesycení povrch nitridovaného dílce dusíkem a vytvoření silné nitridové vrstvy, naopak vysoká míra disociace má na nitridaci negativní efekt, neboť vodík se přednostně adsorpuje na povrchu dílce a zabraňuje adsorpci molekul dusíku a působí tak křehnutí nitridační vrstvy. [35; 36; 39; 47; 53; 55]

Nitridace v plynném prostředí je prováděna v plynotěsných šachtových, zvonových nebo komorových pecích, kde je za teploty mezi 500 a 560 °C vháněn amoniak. Vzhledem k nutnosti difuzního uzavření až do úplného zchladnutí dílců (a přidávání amoniaku do ochlazení na cca 200 °C) je proces nitridace plynem časově velmi náročný. Zkrácení výrobních časů je možné dosáhnout například užitím směsi amoniaku a kyslíku, kde kyslík (O₂) váže disociovaný vodík (H₂) a umožňuje rychlejší sycení nitridované vrstvy dusíkem. Možností je též rozdělení procesu na dvě části – nasycující a difuzní (tzv. Floe proces). [6; 35; 36; 39; 47; 53; 58]

Nitridace v kapalném prostředí – v současnosti již zřídka užívaný proces nitridace v solných lázních, využívá termické disociace kyanidů (NaCN, KCN) a kyanatanů (NaCNO, KCNO) vzdušním kyslíkem, za současného vzniku atomárního dusíku (a uhlíku) – znázorněno v rovnicích 2.9 a 2.10. Solná lázeň musí probublávat vzduchem nebo být pravidelně promíchávána, aby docházelo k okysličování soli. [6; 47]



Výhodou tohoto procesu je kratší výrobní čas ve srovnání s nitridací v plynném prostředí (řádově do dvou, maximálně však čtyř hodin). Tato výhoda je však více než vyvážena nutností práce s jedovatými solemi, likvidací jedovatého odpadu a možného naleptání dílce v důsledku nedostatečného okysličení soli. [6]

Plazmová (iontová) nitridace – v současné době nejužívanější způsob nitridace je plazmová (iontová) nitridace, která využívá elektrického pole a jeho působení na plynnou atmosféru za sníženého tlaku. Ve srovnání se dvěma předchozími způsoby je iontová nitridace rychlejší, a to dvojnásob – až pětinašobně, a výsledná vrstva je výrazně tvrdší (až 1300 HV) a odolnější vůči opotřebení. [34]

Plazmová nitridace probíhá v plně automatizovaných iontonitridačních jednotkách, což je systém skládající se z vakuové nádoby, plynové stanice, elektronické řídicí jednotky a napájecí elektrické jednotky. Do vakuové nádoby, zapojené jako anoda, jsou uloženy dílce určené k nitridaci, zapojené jako katoda, a po odčerpání vzduchu je vakuová nádoba naplněna ionizovaným plynem (nejčastěji NH₃, NH₃+ N₂, N₂+ H₂). Následně je připojen zdroj o stejnosměrném napětí (400–1000 V). V elektrickém poli dochází k ionizaci a štěpení atmosféry. Kladné ionty urychlované elektrickým polem dopadají na katodu (povrch nitridovaného dílce), a předávají část své kinetické energie součástce, což ji ohřívá, není tedy potřeba existence externího zdroje tepla. Zároveň ale také vyřazuje atomy železa (i jiných prvků) z povrchu – tomuto jevu se říká odprašování, které reagují s dusíkem, a vytváří tak nitridy. Kondenzované nitridy tvoří souvislou absorpční vrstvu, ze které dusík difunduje dále do oceli. [34; 45; 47; 53]

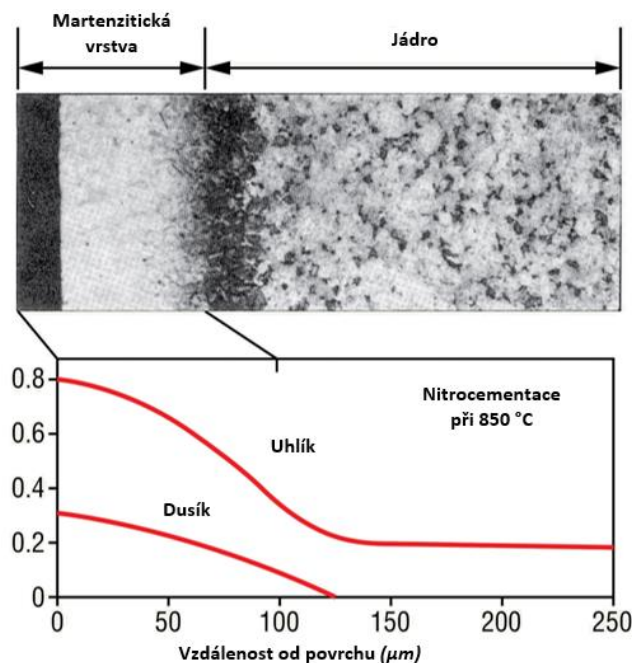
K nesporným výhodám plazmové nitridace patří také možnost měnit strukturu a vlastnosti nitridované vrstvy volbou nitridačního plynu. Plyny obsahující uhlík zlepšují antikorozi

vlastnosti a zvyšují odolnost vůči zadírání, naopak plyny bez uhlíku dílec výrazněji vytvrzují. Plazmová nitridace také zvyšuje odolnost v různých prostředích (vysoké provozní teploty, pára, mořská voda apod.), mez únavy i odolnost vůči vrypům. Proces nitridace je navíc relativně ekologický. Mezi hlavní nevýhody seřadí technologická náročnost, zejména vysoké pořizovací náklady vakuových zařízení, a požadavky na precizní provedení nitridace samotné. [6; 34; 47; 53]

2.3.3 Nitrocementace

Stejně jako karbonitridace i proces nitrocementace spočívá v současném sycení povrchu oceli uhlíkem a dusíkem. Ve srovnání s karbonitridací probíhá nitrocementace za vyšších teplot, což vede k odlišným koncentracím uhlíku a dusíku v difuzní vrstvě, a i odlišným vlastnostem povrchové vrstvy. [30] Obecně můžeme říci, že nitrocementace probíhá při teplotách v rozmezí 840 a 860 °C (někteří autoři uvádí 820–900 °C [59], tedy za teplot pohybujících se kolem křivky A_{C3} . [6; 30] Díky teplotám nižším, než jaké jsou užívány při cementaci, a také přítomnosti dusíku, který urychluje difuzi uhlíku, se snižuje náchylnost k deformacím a hrubnutí austenitického zrna. [6; 36; 59]

Difuzní vrstva je měkkší než u cementace (přibližně 700–800 HV), protože difuze uhlíku je potlačena dusíkem. Na druhou stranu, jádro je díky vyššímu obsahu uhlíku pevnější (1700–2000 MPa). Síla nitrocementované vrstvy se pohybuje v rozmezí 0,075–0,6 mm, což je obecně nižší než v případě cementace, vrstva je také plastičtější, houževnatější a jeví vyšší únavovou pevnost. Svrchní vrstva kromě karbonitridů obsahuje i zbytkový austenit a martenzit. Austenit je nicméně díky nadifundovanému dusíku stabilizovaný. Hloubka nitrocementované vrstvy je znázorněna ve výbrusu na obrázku č. 16. [6; 36; 59; 60]



Obrázek 16 Výbrus nitrocementované vrstvy, obsah dusíku a uhlíku (v %) [61, upraveno autorem]

Nitrocementace je často užívaným pro velkosériovou výrobu menších dílců s požadavkem na vysokou odolnost vůči opotřebení. Typickými nitrocementovanými výrobky jsou hřídele, písty, převodová kola, kladky, táhla nebo ložiska. Nitrocementace je vhodná pro všechny typy ocelí včetně například dílců vyrobených práškovou metalurgií. Jednoznačnou výhodou nitrocementace je její rychlost, a tudíž i ekonomičnost. K nevýhodám jednoznačně patří vysoké

vstupní náklady na pořízení technologií, které regulují složení aktivní atmosféry. [34; 30; 59] Nitrocementace probíhá v plynném nebo kapalném prostředí.

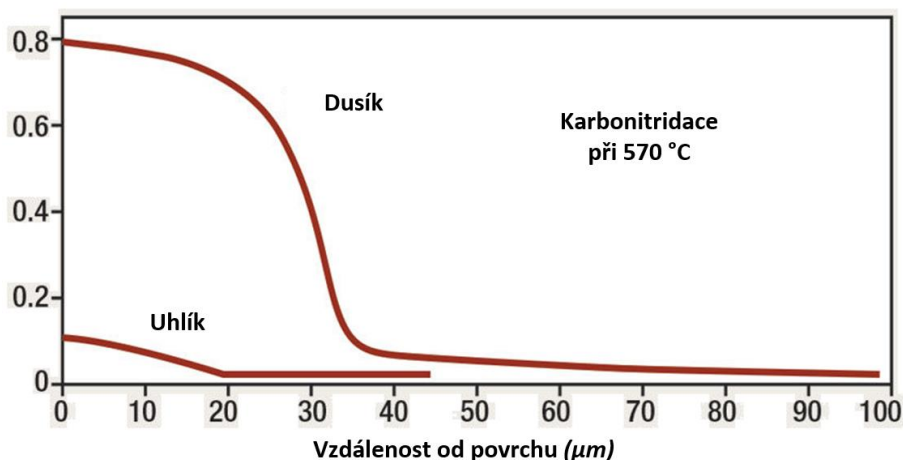
Nitrocementace v kapalném prostředí – nitrocementace probíhá v kyanidových solných lázních s přísadou chloridů a uhličitánů. Tzv. kyanování trvá cca jednu hodinu a výsledná nitrocementovaná vrstva je hluboká přibližně 0,2 mm. [6; 30]

Nitrocementace v plynném prostředí – aktivní atmosféru pro plynnou nitrocementaci tvoří směs uhlovodíků (např. anilínu nebo pyridinu) nebo amoniaku. Po přibližně 1–2 hodinách je difuzní vrstva hluboká až 0,4 mm. [6; 30] Hloubka vrstvy nicméně závisí na rozměrech součástky, hloubce nasycení, teplotě a délce kalení. Povrch nelegovaných a nízkolegovaných ocelí je obohacen o 0,5–0,8 % uhlíku a 0,2–0,4 % dusíku. [59]

Post-nitrocementační procesy – po nitrocementování je nezbytné provést adiciónální tepelné zpracování, při teplotě 180 °C probíhá kalení a popouštění po dobu 1 až 2 hodin. [6; 30] Přítomnost dusíku zlepšuje kalitelnost oceli, protože snižuje kritickou rychlost kalení. Kalení probíhá často přímo z nitrocementační teploty, proto je proces vhodný zejména pro hromadnou výrobu. Díly bývají nejčastěji zakaleny do oleje nebo do solné lázně, čímž se snižuje riziko deformace. Po zakalení součástky následuje popouštění (teplota 150–200 °C), které snižuje křehkost vrstvy a ovlivňuje její tribologické vlastnosti. [59; 60]

2.3.4 Karbonitridace

Karbonitridace je založena na současném difuzním sycení povrchu oceli uhlíkem a dusíkem při teplotách pod křivkou A_{C1} . Teplota se obvykle pohybuje mezi 560 a 620 °C (někteří autoři uvádí 540 až 590 °C [52]) a celý proces probíhá přibližně 4 hodiny. Výsledná vrchní vrstva přesto není křehká (ve srovnání s nitridovanými vrstvami) a vyznačuje se tvrdostí až 1 600 HV (vysokolegované oceli), případně 700 HV pro nelegované oceli. Hloubka vrstvy se pohybuje v rozmezí 10 a 50 μm . Vzhledem k charakteru vrstvy již není prováděno žádné další obrábění. Karbonitridovaná vrstva obsahuje více než 2 % uhlíku, 8 % dusíku a přibližně 1 % kyslíku, což je zobrazeno na obrázku č. 17. Směrem k jádru na svrchní vrstvu navazuje difuzní vrstva, kudy proniká dusík do feritu. V závislosti na druhu oceli vrstva průniku dosahuje tvrdosti 300–400 HV a hloubky až 1 mm. Díky této vrstvě jsou významně zlepšeny vlastnosti součástky, zejména únavová pevnost, a to až o 120 %. Zároveň je podpořena nosnost karbonitridové vrstvy. [30; 34; 47; 62; 63]



Obrázek 17 Obsahu dusíku a uhlíku v závislosti na vzdálenosti od povrchu (v %) [64, upraveno autorem]

Ve srovnání s nitridací je karbonitridace rychlejší. K žádoucím vlastnostem patří zlepšení třecích vlastností, odolnosti vůči zadírání a lepší odolnost vůči korozi. Na rozdíl od nitrocementace, karbonitridované dílce nevyžadují adicovní tepelné zpracování, čímž se eliminuje možnost deformací povrchu, a to díky relativně nízké teplotě karbonitridačního procesu. Taktéž je možné používat karbonitridaci pro dílce, které nebyly kaleny a popouštěny. Ve srovnání s jinými procesy vytvrzování povrchu je karbonitridace relativně nízkonákladová. [34] Karbonitridace je užitečná pro nástroje s požadavkem na vysokou odolnost vůči zadírání jako jsou řezné nebo lisovací nástroje, popřípadě nástroje na protlačování –ojnice, písty, difuzory, ozubená kola nebo vačkové hřídele. [30; 62] Karbonitridaci lze provádět v pevném, plynném i kapalném prostředí.

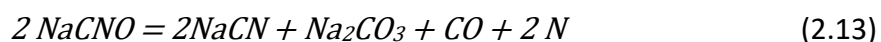
Karbonitridace v pevném prostředí – v současnosti komerčně nevyužívaná metoda spočívá ve využití směsi organických částí (rohovina, paznehty apod.), které obsahují dusík, nebo pasty na kyanidové bázi a cementačního prášku. [65; 66]

Karbonitridace v plynném prostředí – jedná se o proces založený na přísunu aktivní atmosféry složené z amoniaku a uhlíkovodíků. zdrojem dusíku je disociovaný amoniak (viz rovnice 2.11 a 2.12), zdroj uhlíku se odlišuje dle dodavatele technologie. Karbonitridace v plynu se provádí v plynotěsných pecích při podaustenitických teplotách okolo 570 °C. Výsledná síla vrstvy závisí na předchozím zpracování oceli, teplotě, času a použitém plynném médiu. Při karbonitridaci v plynu je potřeba (podobně jako před karbonitridací v kapalině) dílec řádně očistit a odmastit. [30; 62; 67; 68]



Karbonitridace v kapalném prostředí – původně se proces karbonitridace prováděl v solných lázních tvořených kyanidy (KCN, NaCN) už od roku 1927. Od 50. do 80. let probíhala karbonitridace oxidací kyanidů vzdušným kyslíkem na kyanatan (viz rovnice 2.13). V současné době byly kvůli toxicitě jedovaté kyanidy nahrazeny netoxickými kyanatany (NaCNO, KCNO), které reagují ve směsi s uhličitánem sodným, lithným nebo draselným. Tyto taveniny jsou bohaté na dusík, a proto vlastní proces karbonitridace začíná ihned po vnoření do solné lázně. Karbonitridace v solné lázni je vhodná pro všechny typy oceli. Solná lázeň má vysokou homogenní hustotu dusíku, teplo skrze ni prostupuje rychle a rovnoměrně. Proces karbonitridace v solné lázni umožňuje využít výhod plné automatizace. [30; 31]

Kyanatany vlivem samovolné oxidace nebo cíleným působením vzdušného kyslíku difundují na atomární dusík a uhličitán. Uhličitán by mohl nežádoucím způsobem měnit složení solné lázně, a proto je přidáván regenerátor recyklující uhličitán zpět na kyanatan. [31]



Součástka je nejprve přehřáta na 350–400 °C, proces karbonitridace pak probíhá při teplotě 520–770 °C po dobu jedné až dvou hodin. Tímto způsobem nicméně není možné dosáhnout větší hloubky karbonitridované vrstvy, neboť vyšší obsah kyanatanů (uvádí se, že nad 45 %) vyvolává naleptávání povrchu. Po dokončení karbonitridace jsou dílce ochlazovány v různých médiích. Volba média závisí na složení oceli, požadovaných výsledných vlastnostech nebo citlivosti vůči deformacím a defektům. [31; 62]

Díky absorpci dusíku v difuzní vrstvě se zvyšuje únavová pevnost při rotaci i vůči tlaku při otáčení. U konstrukčních dílů z nelegovaných ocelí je možné dosáhnout až o 100 % větší pevnosti za dobu 1–2 hodin, u legovaných je možné pozorovat 30–80 % zlepšení. K uchování rozměrové stálosti a tažnosti je třeba popouštět při teplotách 600 °C nebo i vyšších. [31]

Karbonitridované dílce jsou odolné vůči adhezivnímu otěru a vůči zadírání. Karbonitridace zvyšuje provozní životnost karbonitridovaných dílců i při teplotním namáhání. Povrch nástrojů lze navíc obnovovat v solné tavenině. Díky pórovitosti dosahují dílce lepších kluzných vlastností díky zadržení maziva, avšak vykazují horší otěrové vlastnosti. Karbonitridace se stále častěji používá jako náhrada za galvanování povrchů (Cr, Ni, Zn atd.). Nevýhodou je neschopnost variabilně měnit poměry tloušťky difuzní a sloučeninové vrstvy. [31]

Specifickým typem karbonitridace v kapalině je technologie TENIFER a ARCOR, které se odlišují chemickým složením solné taveniny. Principem těchto technologií je zpracování dílců karbonitridováním s následnou oxidací, jak je popsáno v následující podkapitole.

2.3.5 ARCOR

Specifickým případem karbonitridace v solné lázni je ARCOR. Tato technologie je užívána pro součástky z ocelí i litin a nachází využití téměř ve všech odvětvích průmyslu – automotive, doprava, energetika, spotřební zboží atd. [69] Technologie ARCOR se užívá pro dílce, kde dochází k otěrovému namáhání v korozním prostředí. [31]

Technologie ARCOR je registrovaný obchodní název, další označení jsou Tenifer, Tuffritride, Melonite atd. Technologie ARCOR spočívá v karbonitridaci s následnou oxidací. V solné tavenině alkalických kovů (sursulf) o teplotě 570–590 °C je nejprve provedena karbonitridace. Technologický čas variuje od 30 minut až po 4 hodiny v závislosti na účelu užití dílce a typu užití oceli. Následuje oxidace v solné lázni (oxinit) o teplotě cca 430 °C, která trvá přibližně 15 minut. Výstupem technologie ARCOR je vytvrzení a zhouževnatění materiálu, zlepšení kluznosti, odolnosti vůči korozi a zadírání, snížení deformace a únavy, ale i vodíkové křehkosti. Při aplikaci technologie ARCOR nedochází k rozměrovým změnám (změny maximálně do 0,003 mm) ani zdrsnění povrchu, což je jednou z výhod této formy chemicko-tepelného zpracování. [69]

S ohledem na složení oceli, citlivosti k deformacím nebo na základě požadovaných vlastností je voleno chladicí médium. V úvahu připadá oxidační lázeň, voda, vzduch, dusík nebo vakuum. Ochlazení v oxidační lázni se provádí při teplotě 370–430 °C po dobu 10–20 minut. V lázni sursulf jsou přítomné částice Li^+ , K^+ , Na^+ , CNO^- , CO_3 , které lázeň teplotně i chemicky stabilizují. Dosažení kýžených vlastností je podmíněno teplotou lázně, jejím objemem a homogenitou distribuce vzduchu v lázni. V důsledku ochlazení v oxidační lázni se zvyšuje odolnost vůči korozi, a to díky magnetitu (Fe_3O_4) do hloubky cca 1 μm . V důsledku této oxidace součástky získají leskle černý povrch. [31; 69]

Po oxidaci často následuje ještě leštění (CLIN QP), které snižuje povrchovou drsnost, nicméně je nutné odstranit co nejmenší možnou vrstvu. Pro zachování korozní odolnosti bývá po leštění prováděno ještě následné oxidační zpracování (CLIN QPQ). Povrch získá optimální vrstvu oxidů a rovnoměrnou černou barvu. QPQ úprava bývá prováděna také pouze z kosmetických důvodů. [31]

Vlastnosti svrchní sloučeninové vrstvy závisí na zvolených parametrech (teplota taveniny, čas karbonitridování, obsah kyanatanu atd.), použitém materiálu a obsahu nitridotvorných prvků. Tvrdost svrchní vrstvy se pak může pohybovat od 700 HV (nelegované oceli) až po 1 600 HV

(vysokolegované oceli). Svrchní vrstva obsahuje 6–11 % dusíku a 0,5–2 % uhlíku, přičemž jednotlivé typy ARCOR se odlišují jeho koncentrací (nejméně má ARCOR V/N, nejvíce pak TENIFER). Tloušťka vrstvy je po 1–2 hodinách 10 až 20 mikrometru. S vyšším obsahem legujících prvků klesá tloušťka vrstvy, avšak roste její tvrdost a naopak. Koncentrace dusíku v difuzní zóně klesá směrem k jádru a nitrizační vrstva tak zůstává otevřená. [31] V závislosti na kýžených vlastnostech je volena teplota a koncentrace média při karbonitridaci.



Obrázek 18 Příklady ARCOR dílců [70]

Nejrozšířenějšími typy jsou ARCOR V a ARCOR N, při nichž jsou užívány silně aktivované kyanatany, a výsledná vrstva vykazuje nízkou pórovitost. [31] Výsledkem ARCOR N, který je prováděn při teplotě 630 °C, je houževnatá austenitická vrstva nitridu a vrchní sloučeninovou vrstvou, díky jejichž kombinaci vzniká povrch odolný vůči praskání u namáhaných dílců. V případě ARCOR V je při teplotě 570–590 °C provedena feritická karbonitridace, který vykazuje velmi nízké koeficienty tření (0,1 při zatížení 400 N při použití maziva v kontaktu s ocelovým protikusem). [69]

Alternativou je také ARCOR C (dříve označovaný jako SurSulf), který využívá slabě aktivovanou solnou taveninu s vysokým obsahem kyanatanu, za přídavku K₂S, který má regulovat přílišnou sílu reakce. Reakce probíhá za teplot kolem 570 °C. Výsledná vrstva je pórovitá a obsahuje síru, což je výhodné např. při zvláštních požadavcích na kluzné vlastnosti nebo na požadavky na záběhové chování dílců v tribologických systémech. [31]

Technologie ARCOR se často užívá v kombinaci s pulírováním, např. ARCOR P, který spočívá v provedení karbonitrooxidace následovanou pulírováním, nebo ARCOR VP spočívající v provedení karbonitrooxidace následovanou pulírováním a další oxidací. Výstupem obou je vysoce lesklý černý dílec. [69] Příklady dílců upravených technologií ARCOR jsou zobrazeny na obrázku č. 18.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Předmětem práce je navrhnutí alternativních možností výroby tahové západky, která je jednou z komponent vzduchových jističů, které představují důležitý bezpečnostní prvek jističích zařízení v elektrické síti po celém světě. Vzduchové jističe nachází své uplatnění ve strojovných fotovoltaických nebo větrných elektrárnách, ale i v nemocnicích, velkých výrobních komplexech, hutích nebo válcovnách.

Technicky je možné vyrobit až 10^{24} konfigurací jističů pro naplnění přesných požadavků zákazníka. Jističe plní svou funkci při napětí 600 V nebo 1000 V, jedná se tedy o nízkonapěťové jističe. Zároveň jsou vzduchové jističe, jejichž název je odvozen od vzduchové komory, ve které je zhášen plazmový výboj vzniklý při zkratu obvodu, schopné fungovat při rozsahu pracovního proudu 630 A až 6300 A.

Rozsah jejich použití ukazuje velkou diverzitu v podmínkách, při kterých musí jistič spolehlivě fungovat. Rozsah pracovních teplot je $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$, prašné prostředí a intenzita jeho spínání může být v řádu hodin i několika let, což klade důraz na mechanické i elektronické součásti, které musí být schopny i po letech nečinnosti bezpečně rozepnout okruh při zkratu.

Vzhledem k velké variabilitě požadavků a vysokých nárocích na spolehlivost, je životnost vzduchových jističů omezená buď deseti lety v provozu nebo počtem jejich startu neboli sepnutí a jejich následného vybavení nebo rozepnutí. Počet cyklů je závislý na vypínací třídě jističe, která se udává ve zkratovém proudu, který jistič dokáže pojmout. Hodnota zkratových proudů se pohybuje od 50 kA až po 150 kA. Životnost jističe klesá s přibývajícím zkratovým proudem z maximálních 18 000 cyklů na 10 000 cyklů. Počet sepnutí 10 000 je také minimální hodnota, která udává počet cyklů, které musí vydržet každý jednotlivý komponent při testech životnosti před uvedením do provozu.

Přenos elektrické energie je uskutečňován pomocí měděných proudovodných kontaktů, které se skládají z pevné a pohyblivé části. Pohyblivá část je v závislosti, zda je jistič ve stavu sepnutém či rozepnutém, přitlačena k pevné části a umožňuje vedení proudu. Na proudovodné kontakty je dále napojena zhášecí komora, která eliminuje vzniklý plazmový oblouk tím, že ho pomocí jednotlivých rovnoběžných lamel rozdělí na krátké neškodné úseky.

Vzduchové jističe jsou vždy osazeny elektromagnetickou spouští, která vysílá impuls o vybavení jističe. Tato spoušť dostává informace z proudových transformátorů, které obepínají jednotlivé proudovodné dráhy a měří procházející proud. Transformátory jsou variantou Rogowského cívky, kdy indukují napětí, které je úměrné dle charakteristické křivky proudového zatížení.

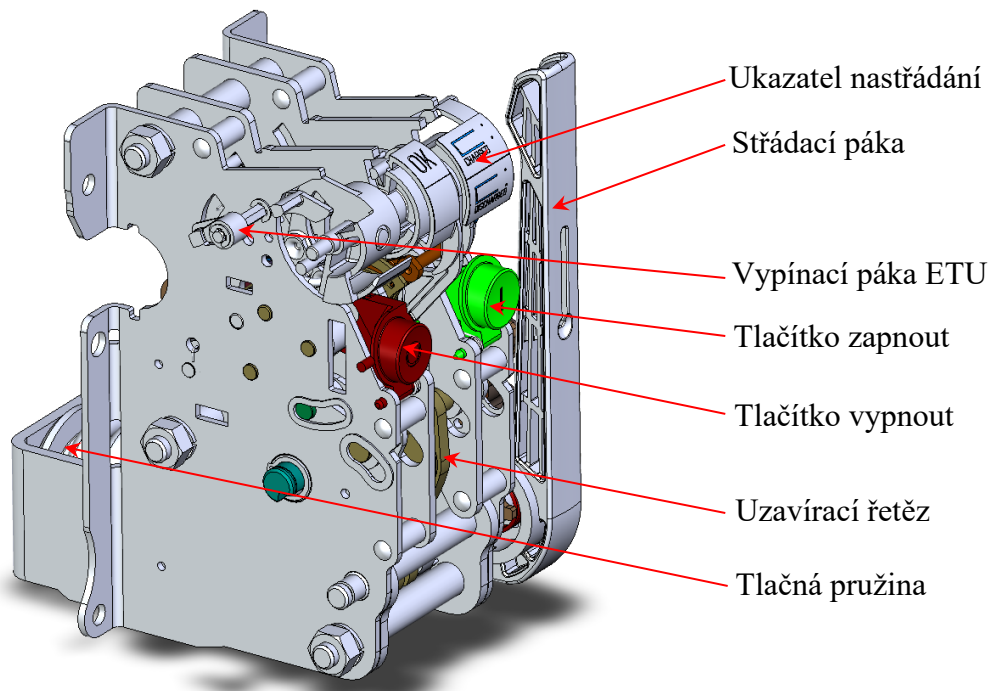
3.1 Strádací mechanismus

Jakkoli je jistič konfigurován, součástí každého jednotlivého jističe je strádací mechanismus, který tvoří pomyslné srdce jističe. Strádací mechanismus pomocí mechanických vstupů ovládá sepnutí a rozepnutí jističe. Tyto vstupy mohou být vyvolány elektronickými součástmi nebo ručními tlačítky. K funkcím strádacího mechanismu patří také strádání mechanické energie pro spínání a rozepínání jističe. Tato mechanická energie je kumulována v soustavě tlačných pružin. Energie pro stlačování pružiny je dodávána pomocí ruční páky, jež je součástí strádacího mechanismu. V případě náročnějších požadavků zákazníka může být ruční páka duplikována elektrickým motorem s externím napájením.

Samotné propojení mezi pružinou střadače a pohyblivými kontakty je učiněno řetězovou soustavou se systémem západek. Tento řetěz je napínán a ohýbán podle toho, v jakém mechanickém stavu se střadací mechanismus nachází. Jedná se o stavy:

- Pružina není stlačena, jistič má rozepnuté kontakty. Na celou sestavu nepůsobí žádné vnitřní síly.
- Pružina je stlačena, jistič má rozepnuté kontakty. Jistič je připraven k sepnutí kontaktů po impulzu uživatelem.
- Pružina není stlačena, jistič má sepnuté kontakty. Jistič je v sepnutém stavu. Střadací mechanismus zajišťuje sepnutí a je připraven v okamžiku kontakty rozepnout.
- Pružina je stlačena, jistič má sepnuté kontakty. Jistič je v sepnutém stavu a střadač je schopen rozepnout kontakty, zároveň má již nastřádanou pružinu, aby bylo možno ihned po rozepnutí kontaktu dojít k opětovnému sepnutí.

Kromě součástí zřetelně viditelných na obrázku č. 19 je součástí střadacího mechanismu také sestava uzavíracího řetězu, který svým pohybem natáčí rozvodnou hřídel celého jističe a určuje svou polohou současný stav nabitého střadacího mechanismu a vypnutého jističe nebo vypnutého střadacího mechanismu a sepnuté kontakty jističe. Jako doraz pro stav nabito má střadací mechanismus součást zapínací západku, o kterou je opřena výkyvná západka, která je součástí uzavíracího řetězu a o níž se při pohybu řetězu při nabití jističe výkyvná západka opírá. Pro doraz pohybu uzavíracího řetězu při spínání jističe do stavu zapnuto slouží vypínací západka, kdy se o ní opírá tahová západka, jenž je také součástí uzavíracího řetězu. Změna technologie výroby tahové západky tvoří jádro této práce.



Obrázek 19 Model střadacího mechanismu s popisem hlavních komponent

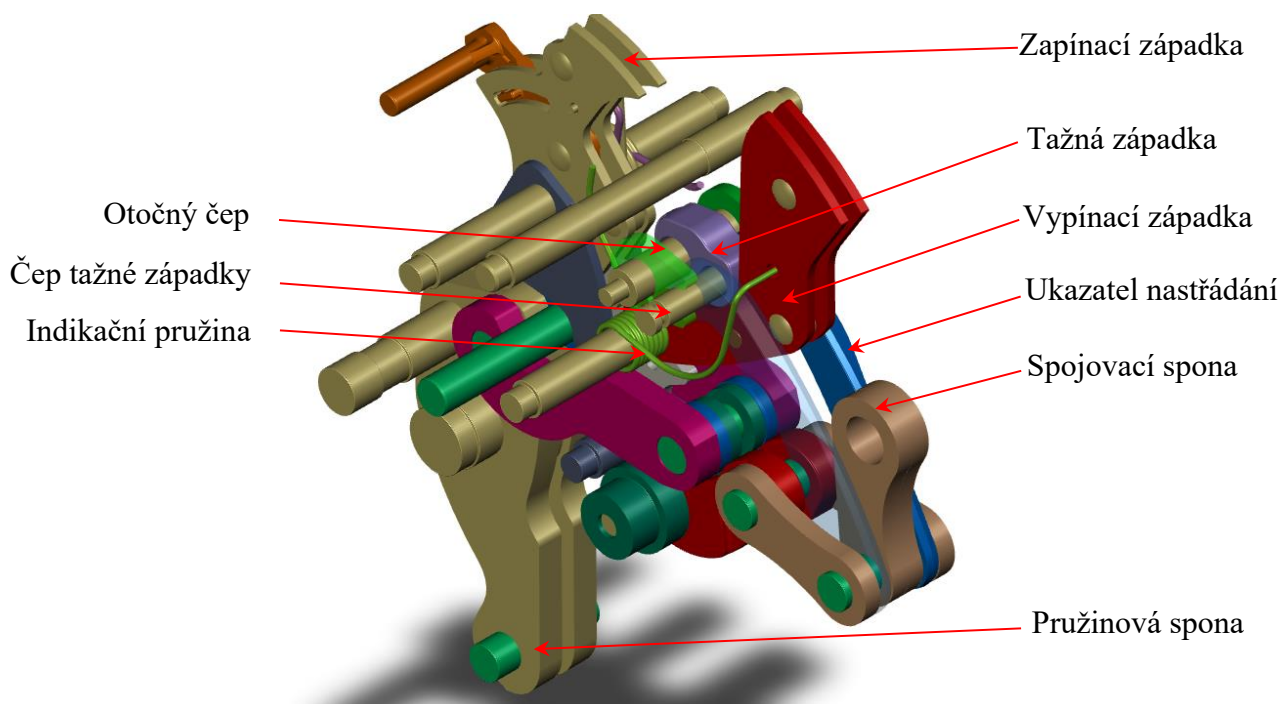
3.2 Západka tahové spony

Hauling lug pawl neboli tažná západka, nebo také západka tahové spony je ocelová součástka vážící 15 g, s maximálním rozměrem 20 mm a maximální tloušťkou 8 mm. Skrz součást jsou

vedeny dvě díry, kdy jedna má průměr 8 mm a toleranci D10 (spodní limit 8,040 mm horní limit 8,098 mm). Skrz ni je provlečen čep a její střed je osou otáčení celé západky. Druhá díra s průměrem 6 mm a tolerancí také D10 (spodní limit 6,030 mm, horní limit 6,078 mm) je spojena skrz otočný čep s dvěma tahovými sponami (každá z jedné strany tahové západky). Excentrická poloha této užší díry udává při pohybu západky pohyb uzavíracího řetězu.

Další významná část tahové západky je její zobáček neboli „nos“. Tento zobáček naráží při sepnutí jističe do rolničky vypínací západky a zastavuje tak pohyb uzavíracího řetězu společně s celou soustavou pohyblivých kontaktů a rozvodné hřídele. Odezva při zapínání jističe se může lišit dle vypínací třídy jističe a pohybuje se v rozmezí 3–8 ms. Tato funkce udává maximální zatížení celé tahové západky. Statické zatížení, kdy je jistič sepnut je 1 500 N. Dynamické zatížení při spínání jističe je na „nosu“ tahové západky krátkodobě až 7 800 N.

Následnou funkcí tahové západky při zapnutém stavu jističe je jeho následné vypnutí. K vypnutí dochází v momentu, kdy obsluha nebo elektronická spoušť vyhne vypínací západku a uvolní tak tahovou západku. Ta dokončí rotační pohyb a opět uvede uzavírací řetěz do výchozí polohy rozepnutých kontaktů a vybitého jističe. Sestava uzavíracího řetězu včetně tahové západky je popsána v obrázku č. 20.



Obrázek 20 Sestava uzavíracího řetězu

3.2.1 Vlastnosti západky tahové spony

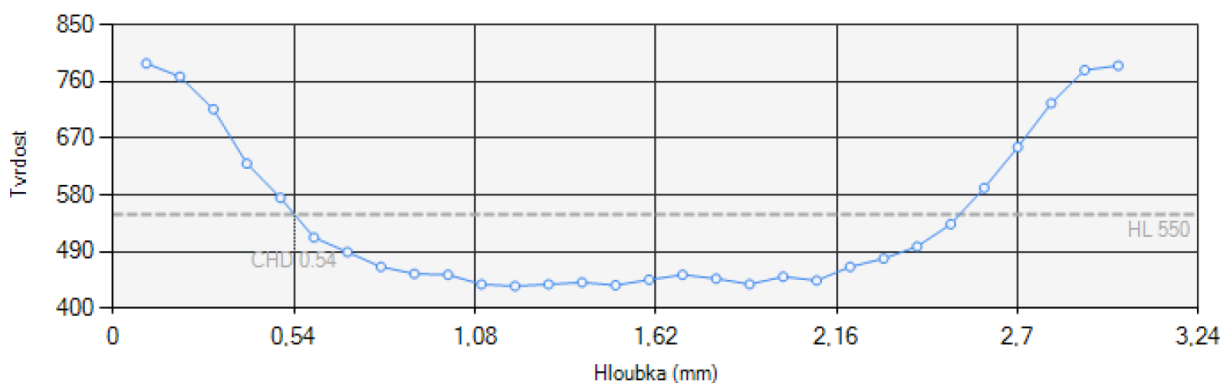
Předepsaný materiál pro výrobu dílce je EN 10084-16MnCr5, což je nízkolegovaná ušlechtilá konstrukční mangan-chromová ocel k cementování (14220 dle ČSN, 17210 dle DIN). Ocel 16MnCr5 je vhodná pro středně namáhané díly strojů a vozidel. Cementovaná vrstva je houževnatá, a to díky nízkému obsahu bóru (až 0,005 %). Bývá prokalována do hloubky 30 mm a je vhodná na tepelné zpracování, sváření i tváření za studena. Je vhodná pro dílce do průměru 35 mm. [71]

Tabulka 1 Chemické složení, technologické a mechanické vlastnosti, ekvivalenty značení oceli ČSN 14 220 [71; 72; 73]

Chemické složení							
C	Mn	Si max	Cr	Ni	Mo	P max.	S max.
0,14-0,19	1,10-1,40	0,17-0,37	0,80-1,10	-	-	0,035	0,035
Mechanické vlastnosti							
Průměr (mm)	Rm (MPa)	Re min. (Mpa)	A min. (%)	Z min. (%)	KV min (J)		
16 <d ≤ 40	1 000-1 200	750	11	45	35		
Technologické vlastnosti							
Normalizační žhání		Žhání na měkko	Kalení		Popouštění		
880-920 °C		680-720 °C	820-860		150-200 °C		
Ochlazovat na vzduchu		Ochlazovat v peci	Ochlazovat v oleji nebo v lázni 150–200 °C		Ochlazovat na vzduchu		
Cementování							
V plynu		V prášku		V solné lázni			
900-930 °C		860-900 °C		890-910 °C			
Ochlazovat na vzduchu nebo v ochlazovací jednotce		Ochlazovat v cementační krabici nebo na vzduchu		Ochlazovat na vzduchu			
Ekvivalentní značení							
ČSN	ČSN 41 4220		ocel 14 220				
EN	EN 10084-94, EN 84-70		16MnCr5				
DIN	DIN 17210-86 (1.1191)		16MnCr5				

Ocel 14 220 vykazuje homogenní jemnozrnnou strukturu se střední velikostí zrn v rozmezí 10–15 μm (minimum je 5 μm , maximum 40 μm). Struktura je feritická s globulárními vměstky oxidů křemíku a železa a siričky manganu uspořádanými řádkovitě. Ve výchozím stavu vykazuje střední tvrdost $HV_{10}=200$. [72] Chemické složení, technologické a mechanické vlastnosti jsou demonstrovány v tabulce č. 1.

Alternativní materiál pro západku tahové spony je EN10083-3-42CrMo₄. Jedná se o nízkolegovanou chrom-molybdenovou ocel k zušlechťování (15 142 dle ČSN, 17 200 dle DIN). Ocel 42CrMo₄ patří k nejčastěji užívaným ocelím k zušlechťování. Je určena pro více namáhané strojní díly. Díky vyšší prokalitelnosti dosahuje po zakalení tvrdosti 58 HRC. Průběh tvrdosti oceli 15 142 je znázorněn v grafu č. 1. Vzhledem k náchylnosti ke vzniku povrchových vad nebo kalících trhlin v místech s vrubovým účinkem je kalena do méně razantního kalícího prostředí. Po zakalení dobře odolává opotřebení a ani není náchylná k popouštěcí křehkosti. Po zušlechťování lze docílit pevnosti i více než 1 000 MPa při průměrech do 100 mm. [74]



Graf 1 Průběh tvrdosti povrchu frézované tažné západky

Z obou výše zmíněných materiálů je nejprve válcováním za tepla vyrobena kruhová tyč. Po rozdělení tyče je provedeno CNC frézování. Předepsané rozměrové a geometrické tolerance pro západku tahové spony jsou k dispozici v příloze č. 1.

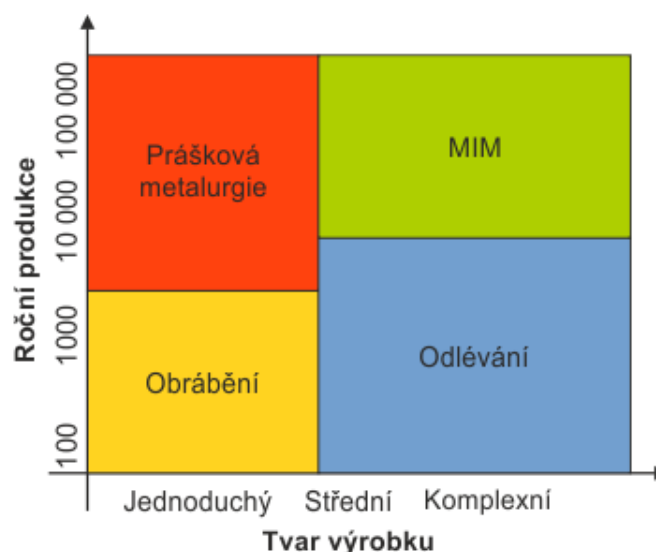
Po dokončení obrábění je provedeno cementování, následně je dílec kalen v oleji a popouštěn. Výsledná tvrdost povrchu musí dosáhnout $HV_{10}=700$ (s tolerancí ± 30). Rozsah požadované hloubky nauhličení je 0,4 až 0,7 mm. V této hloubce musí dílec vykazovat tvrdost alespoň $HV_{10}=550$ [75]. Nakonec jsou díly konzervovány dle německé normy AU 900 00261 001 pomocí WD40, čímž se zabrání vzniku koroze během transportu nebo uskladnění.

Tabulka 2 Chemické složení, technologické a mechanické vlastnosti, ekvivalenty značení oceli ČSN 15 142 [74]

Chemické složení							
C	Mn	Si max	Cr	Ni	Mo	P max.	S max.
0,14-0,19	1,00-1,30	0,4	0,80-1,10	-	-f	0,035	0,02-0,04
Technologické vlastnosti							
Normalizační žíhání		Žíhání na měkko	Kalení	Kalící prostředí		Popouštění	
850-880 °C		680-720 °C	820-860 °C	Olej nebo voda		540-680 °C	
Mechanické vlastnosti							
Průměr (mm)	Rm (MPa)	Re min. (Mpa)	A min. (%)		Z min. (%)	KV min (J)	
25 <d ≤ 40	685-930	490	10		-	30	
Ekvivalentní značení							
ČSN	41 5142			42CrMo4			
EN	EN10083-3-42CrMo4			42CrMo4 (42CrMoS4)			
DIN	17 200			42CrMo4			

3.2.2 Změna technologie výroby

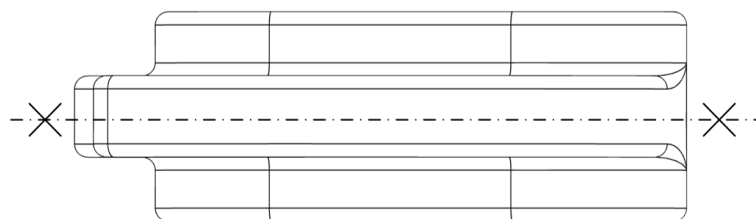
S ohledem na požadavek na snižování výrobních nákladů existují tendence hledat alternativní způsoby výroby. Jak je zřejmé z obrázku č. 21, výroba dílů frézováním není vhodná pro velkosériové výroby. Navíc frézování patří k velmi nákladným způsobům a potenciální úspora plynoucí z využití technologie práškové metalurgie by mohla být značná (více viz kapitola technickoekonomické zhodnocení).



Obrázek 21 Vhodnost užití technologie MIM v závislosti na objemu produkce a tvaru dílce [11]

Výroba odléváním byla vyloučena hned na začátku rozhodování. Odlévané dílce nevykazují dostatečnou mechanickou pevnost, a technologie odlévání neumožňuje dodržet požadovanou drsnost povrchu předepsanou výkresem. Odlévané dílce by vyžadovaly následné obrábění. Navíc druhy oceli užívané k výrobě západky tahové spony nejsou pro tento typ výroby vhodné.

Stejně tak byl zamítnut standardní proces práškové metalurgie, kdy dochází k lisování a následnému slinování. Ačkoliv geometrický tvar, předepsané rozměry a tolerance západky tahové spony by splňovaly parametry pro metodu slinování, díl by musel být kvůli své geometrii zaformován dle obrázku č. 22. Tento způsob zaformování pro lisování by způsobil, že maximální pevnost by byla v ose, ve které nedochází k mechanickému namáhání dílce, což je způsobeno nerovnoměrným šířením tlaku prášku ve všech směrech. Ačkoli jsou komponenty vyrobené klasickým sintrováním využívány jak v celém jističi, tak v pružinovém střádacím mechanismu, pro účely tahové západky jsou nevhodné, neboť nesplňují požadavky na cyklické rázové namáhání.



Obrázek 22 Schéma zaformování tažné západky pro slinování

Jako nejvhodnější alternativa výroby západky tahové spony byla vyhodnocena technologie plastického vstřikování kovů (MIM). Obecný princip metody a postup je rozebrán v teoretické části této práce. Díly vyrobené touto metodou mají ve všech osách stejnou pevnost. Jelikož se jedná o experimentální metodu, byla dohodnuta spolupráce se společností specializující se výhradně na výzkum a výrobu dílů pomocí metody MIM. Tato společnost má dlouholeté zkušenosti s výrobou komponent pomocí metody MIM a její produkty vyráběné touto metodou jsou dodávány do automobilového, elektrotechnického i zbrojního průmyslu.

3.2.3 Úpravy výkresové dokumentace pro metodu MIM

Pro účely výroby vzorků západky tahové spony metodou MIM bylo třeba provést dílčí změny ve výkresové dokumentaci, přičemž s každým dalším testováním byla výkresová dokumentace pozměněna. Konkrétní kroky jsou popsány v podkapitolách zabývajících se jednotlivými testy. Součástí přílohy je nejaktuálnější výkres západky tahové spony.

Počáteční změnou byla kosmetická úprava nefunkční plochy dílů, kde bylo přidáno označení, že dílec byl vyroben metodou plastického vstřikování kovů. Účelem takovéto úpravy bylo okamžité vizuální odlišení frézovaných a MIM dílců pro případ, že by dodávky (alespoň z počátku) probíhaly současně. Na základě upravené výkresové dokumentace byla zhotovena forma, která však musela být již po prvním testování upravena.

Poněkud zásadnější změnou byla volba nového materiálu, který by vlastnostmi odpovídal požadavkům na finální dílec. Alternativní volba k EN 10084-16MnCr₅ a EN10083-3-42CrMo₄ padla na EN-10084-20NiCrMo2-2.

Vzhledem k faktu, že metoda plastického vstřikování kovových nebo keramických prášků byla vynalezena ve Spojených Státech Amerických, tak se historicky pro tyto prášky využívá norma AISI (*American Iron and Steel Institute*). Z toho důvodu je ve výkresové dokumentaci tahové

západky materiál uváděn dle americké normy jako ASTM-A29-AISI 8620, nikoli dle evropských norem (chemické složení, technologické a mechanické vlastnosti jsou zaznamenány v tabulce č. 3).

Tabulka 3 Chemické složení, technologické a mechanické vlastnosti, ekvivalenty značení oceli ASTM-A29-AISI 8620 [76]

Chemické složení							
C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P max.	S max.
0,18-0,23	0,70-0,90	0,15-0,35	0,40-0,60	0,40-0,70	0,15-0,25	0,04	0,04
Technologické vlastnosti							
Žíhání		Kalení		Kalící prostředí		Popouštění	
820-850 °C		840-870 °C		Olej nebo voda		200-700 °C	
Mechanické vlastnosti							
Rm (MPa)				Re min. (Mpa)			
530				385			

Ocel ASTM-A29-AISI 8620 (1654 dle DIN) vlastnostmi odpovídá materiálům užívaným k frézování, a je vhodná k výrobě granulátu pro práškovou metalurgii. Jedná se o nízkolegovanou nikl-chrom-molybdenovou ocel, která je vhodná pro dílce vyžadující houževnatost jádra a odolnost vůči opotřebení. Během kalení a nitridování je pružná, nicméně kvůli nízkému obsahu uhlíku reaguje špatně kalící ohřev pomocí přímého plamene nebo indukčního ohřevu. [76]

Jak je popsáno v následující kapitole, po druhém vzorkování musela být provedena změna materiálu z původně užívaného ASTM-A29-AISI 8620 na ASTM-A29-AISI 4140, který by měl projevovat vyšší houževnatost a odolnost vůči opotřebení. Chemické složení, technologické a mechanické vlastnosti materiálu AISI 4140 jsou zaznamenány v tabulce č. 4.

Tabulka 4 Chemické složení, technologické a mechanické vlastnosti, ekvivalenty značení oceli ASTM-A29-AISI 4140 [77; 78]

Chemické složení							
C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P max.	S max.
0,38-0,43	0,75-1,00	0,15-0,35	0,80-1,10	-	0,15-0,25	0,04	0,04
Technologické vlastnosti							
Žíhání		Kalení		Kalící prostředí		Popouštění	
800-850 °C		870-900 °C		Olej nebo voda		550-700 °C	
Mechanické vlastnosti							
Rm (MPa)				Re min. (Mpa)			
655				415			

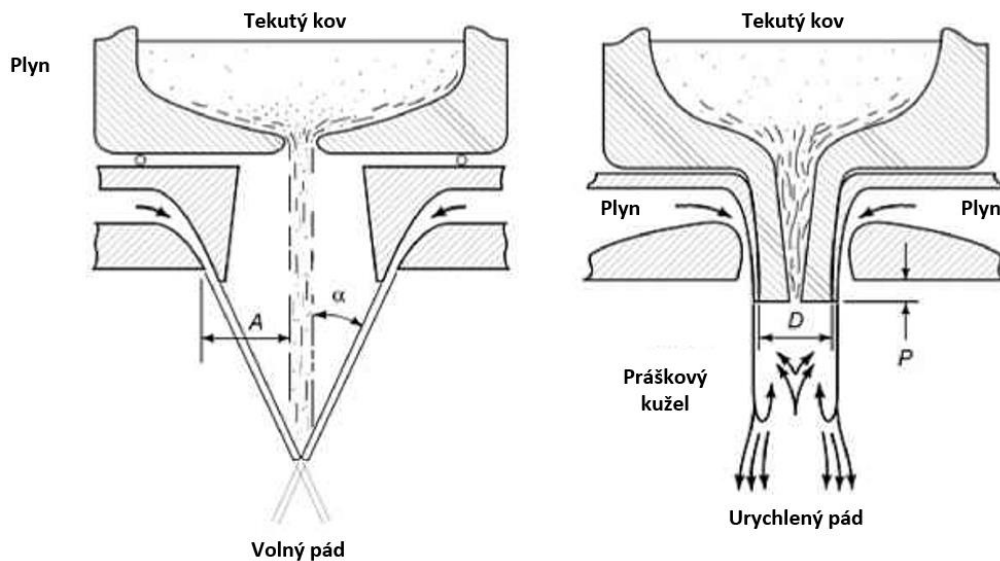
3.1 Výrobní postup vzorků

V následujících podkapitolách je stručně popsána výroba vzorků užitých pro testování západky tahové spony. Vzhledem k faktu, že vzorky byly dodávány externí společností, vychází informace o postup samotné výroby ze záznamů provedených na jednání s dodavateli a přiložených výrobních protokolů. Část postupu není dostatečně podrobně popsána z důvodu zachování výrobního tajemství.

3.1.1 Výrobní postup výroby prášku

První materiál použitý pro tažnou západku byl AISI 8620, jehož ekvivalentem je dle evropských norem 20NiCrMo2-2 případně 16 125 dle ČSN. Pro první i druhý prášek byla použita stejná

metoda výroby prášku. Druhý kovový prášek byl použit dle americké normy materiál AISI 4140 srovnatelnou ocelí dle norem EN je 42CrMo4, případně dle ČSN 15 142.



Obrázek 23 Schéma výroby kovového prášku [81]

Prášky byly vyrobeny pomocí plynové atomizace, kdy byl tekutý kov protlačen s pomocí plynu argonu skrz trysku. Použití inertního plynu argonu je zde voleno, aby nedocházelo ke kontaminaci prášku nechtěnými vměstky jako například kyslíkem. Tímto procesem vznikly ocelové prášky o průměrné zrnitosti 22 μm . Způsob výroby kovového prášku je demonstrován na obrázku č. 23.

Jako pojivo byl použit polymer polyethylenglykol (PEG), který je běžně využíván jako pojivo v granulátu pro MIM. Používán je zejména díky své nízké viskozitě, dobré rozpustnosti ve vodě komerčně dostupný. Ocelový prášek byl zamíchán a zahrnut do pojiva, kdy směs obsahovala 20 % PEG a 80 % hmotnosti ocelového prášku. Proces míchání trval 20 minut. Tato směs byla následně extrudována skrz modifikovatelnou hlavici, aby výsledný produkt byl granulát ve tvaru válečků o průměru zhruba 0,5 mm. Výrobní firma tento materiál již zakoupila jako lisovací granulát od specializovaného výrobce pro přímé použití.

3.1.2 Proces vstřikování

Proces vstřikování probíhal na hydraulickém lisovacím stroji Arburg Allrounder s uzavírací silou 1 000 kN (viz obrázek č. 24). Jediným rozdílem vůči strojům užívaným na vstřikování plastů je speciální šnek s regulovatelnou polohou a speciální modul válců, které jsou vyrobeny z otěruvzdorného materiálu a odolávají tak abrazivnímu účinku kovového prášku.

Lisovací teplota byla určena na 180 $^{\circ}\text{C}$, a to zejména s ohledem na přítomnost polyethylenglykolu, který má nízkou tání. Jeden cyklus stroje činí 20 s, přičemž za tento časový úsek je lisovací stroj schopen vyrobit dva dílce. Předpokládaná životnost formy je 300 000 cyklů, tedy celkem 600 000 kusů dílců. V praxi to představuje pokrytí přibližně 7,5 let požadovaných dodávek (při zachování konstantního tempa odběru). Forma byla sestavena s vypočítaným smrštěním po odstranění pojiva a slinování o 18 % objemu. Dílům, které jsou vyrobeny se po procesu vstřikování říká tzv. „zelené součásti“.



Obrázek 24 Arburg Allrounder 420 C [79]

3.1.3 Slinování

První krok po plastickém vstřikování bylo odstranění pojiva. Proces odstranění se skládá z dvou podprocesů, jak bylo uvedeno v teoretické části. První část odstranění pojiva spočívala v jeho rozpuštění, což minimalizovalo vznik defektů na součástech. Tyto „zelené části“ byly ponořeny do vodní lázně, přičemž voda způsobila částečné rozpuštění polyethylenglykolu a jeho přeměnu do gelového stavu. Během tříhodinového cyklu došlo postupně k těmto stavům:

- Průnik rozpouštědla – vody do pojiva
- Rozpad pojiva a postupný vznik roztoku
- Difuze roztoku na povrch tažné západky
- Roztok pojiva a vody z povrchu tažné západky odkapal do vany

Druhá, hlavní část odstranění pojiva, je termální odstraňování. Celá dávka tažných západek byla pomalu schodovitě ohřívána až na 600 °C, aby došlo k postupnému odpařování pojiva. Během ohřevu docházelo v dílech k vytváření sítí kanálků, které pomohly k odpařování pojiva. Doba ohřevu byla 35 hodin a po uplynutí tohoto časového úseku už nezbylo žádné pojivo. Hnědé součásti, jak se nazývají části po odstranění pojiva, byly následně odeslány na sintrování.

Jak proces odstraňování pojiva, tak sintrování byl prováděn v termické peci značky Elnik Systems (obrázek č. 25). Společnost Elnik Systems se specializuje na pece používané pro výrobu dílů metodou MIM. Pece jsou stavěny pro tlak 10 až 800 Mbar, který je vyvoláván pomocí vodíku, dusíku nebo argonu. Sintrovací teplota byla zvolena 1 200 °C.



Obrázek 25 Sintrovací pec [80]

3.1.4 Nitrocementace

Dávky sintrovaných tažných západek byly odeslány do externí kalírny, kde došlo k chemicko-tepelnému zpracování. Jako vhodný způsob pro splnění výkresové hloubky tvrdosti CHD 0,7 (*Case Hardness Depth, hloubka nauhličení*) byla zvolena nitrocementace, která je vhodná pro velkosériové výroby drobnějších dílů. Toto zpracování je vhodné pro nízkolegované oceli, což jsou oba materiály AISI 8620 i AISI 4140. Nitrocementované součásti mají vysokou odolnost vůči opotřebení, což je kýžená a požadovaná vlastnost tahové západky.

Nitrocementace tahové západky byla provedena v plynné atmosféře za současného sycení povrchu uhlíkem a dusíkem. Nitrocementace byla provedena při 860 °C. Po difuzním nasycení povrchu byly součásti přímo kaleny v oleji, aby došlo k co nejmenší deformaci dílů. Nakonec byly díly popuštěny při nízké teplotě 180 °C, aby došlo k snížení křehkosti povrchové vrstvy.

3.1.5 Isostatické lisování za tepla

Jak je zmíněno v následujících kapitolách, vzorky vyrobené pomocí MIM technologie s následnou nitrocementací nesplnily testy životnosti zaměřené na cyklické zatížení dílů. Z toho důvodu byla v posledních dvou vzorkováních použita technologie HIP, izostatické lisování za tepla, což vedlo k další konsolidaci sintrovaného prášku a eliminovalo póry a vnitřní trhliny.

Jak je zmíněno v kapitole 2.2, HIP není běžně dostupná technologie, proto byly tažné západky poslány do švédské firmy, kde došlo k izostatickému lisování za tepla. Podmínky a parametry lisování nebyly zveřejněny a zůstaly tajemstvím švédské firmy.

3.1.6 ARCOR

Jako alternativní chemicko-tepelné zpracování bylo pro určité dávky vzorků využito technologie ARCOR. Konkrétně pro tažnou západku bylo využito metody ARCOR VP, což

značí, že došlo ke karbonitridaci v solné lázni kyanatanu sodného a draselného. Následně byly dílce pulírovány, čímž došlo k zahlázení povrchu. Poslední krok potupu byla oxidace v oxidační peci.



Obrázek 26 Srovnání povrchové úpravy ARCOR (vlevo) a nitrocementace (vpravo)

ARCOR VP vytvořila na povrchu součásti vrstvu ϵ -karbidu. Tato vrstva zlepšuje otěrové vlastnosti dílce a zvyšuje tvrdost povrchové vrstvy u nízkolegované oceli využitě na tažnou západku až na 800 HV₁. Na obrázku níže je vidět porovnání tažné západky zpracované pomocí nitrocementace s následnou konzervací a tažné západky zpracované technologií ARCOR. Na dílu s ARCOR úpravou je znatelná černá barva povrchu, zatímco nitrocementované díly mají kovovou barvu. Srovnání dílců, na něž byla aplikována technologie ARCOR a nitrocementovaných dílců je znázorněno na obrázku č. 26.

3.1.7 Konzervace

Jak standardní frézované tažné západky, tak vzorky tažné západky, které byly nitrocementované, prošli také procesem konzervace. Bylo využito konzervace pro ochranu ocelových materiálů proti korozi při transportu dílů mezi výrobami a při skladování před dalším zpracováním. Konzervace také funguje jako finální povrchová úprava pro díly bez nátěru nebo lakování a pro krátkodobé plynem nitridované a nitrocementované dílce.

Samotná konzervace se skládá z několika kroků. Jako první byly chemicky odstraněny drobné ořepky na dílech. Následně byly tažné západky vloženy do ponorné nádrže na odmaštění při teplotě 50–80 °C. Zde byl využit alkalický odmašťovací a čistící přípravek Pragolod 46 o koncentraci 4–10 %, doba ponoru byla 5 minut.

Po odmaštění došlo k opětovné aplikaci speciálních konzervačních maziv. Pro tento druh konzervace je přípustné využití antikoroziho oleje SK 254 v koncentraci 5–6 % při teplotě 20–55 °C nebo přípravku Anticorit WOK Z 2 v koncentrované emulzi 20 % při teplotě 50–70 °C. V případě tažné západky dochází k mazání pomocí prvního způsobu v antikoroziho oleji. Jako poslední krok konzervace byly díly přesunuty do sušící pece, kde byly sušeny při maximální teplotě 80 °C.

V případě, kdy po vizuální kontrole jsou viditelné špatně ošetřené povrchy, dochází k ruční konzervaci dílů. Pro tento případ se využívá směsi WD40 s rozpouštědlem HAKU 1025/820.

Poměr této směsi je 225:775 a je po smíchání aplikována ručně pomocí štětce na lokální nedostatky povrchu.

3.2 Testované vzorky

Jakékoli zavádění nových dílců do sériové výroby jističů, ať už se jedná o změnu technologie jejich výroby nebo zavedení úplně nového dílce, je spojeno se sérií testů a výběrovým řízením vedeným se subdodavatelem. Při testování je kladen velký důraz na spolehlivost vzhledem k faktu, že výrobky jsou určeny pro nadproudové jištění. V následujících odstavcích je stručně popsán postup zavádění nového dílce do výroby a zdůrazněna jsou nejvýznamnější kritéria, která jsou při uvádění dílců do výroby zohledňována.

V rámci dosahování úspor je každoročně prováděna analýza dílců vhodných pro změnu technologie metodou DTC (*Design to Cost – snižování nákladů změnou konstrukce při zachování funkčních parametrů*), v jejichž důsledku by bylo možné dosáhnout snížení výrobních nákladů. Pozornost je zaměřena na frézované dílce, které tvoří velkou položku v rozpočtu. Jako vhodný dílec byla identifikována západka tahové spony, a to vzhledem ke konstrukční náročnosti, velkému objemu dodávek a vysoké pořizovací ceně. Metoda MIM se pak jevila jeho odpovídající alternativní způsob výroby s potenciálem pro budoucí využití pro další frézované dílce.

Po identifikaci nahrazovaného dílce byl proveden výběr dodavatele. Výběr potenciálního dodavatele musí být odsouhlasen v dlouhém schvalovacím řízení vedením společnosti, tak aby jeho jednání bylo v souladu s firemní politikou. Například není přípustné, aby dodavatel porušoval pracovní nebo bezpečnostní normy. Spolehlivost, komunikativnost, nabízené smluvní podmínky a v neposlední řadě i dohodnutá cena patří k hlavním kritériím výběru. Tato problematika je blíže analyzována v kapitole technicko-ekonomické zhodnocení.

S dodavatelem je poté provedena volba výběru vhodného materiálu. Vzhledem k faktu, že společnost zabývající se výrobou jističů je celosvětovým vývozcem, standardy jističe musí splňovat evropské a asijské normy IEC (*International Electrotechnical Commission, Mezinárodní elektrotechnická norma*), UL (*Underwriters Laboratories, USA norma*) a ANSI (*American National Standards Institute, Americký národní institut pro vytváření norem*) normy. V případě exportu do USA a současném prodeji v Evropě musí materiál splňovat jak normy IEC, tak být certifikován v souladu s náročnějšími UL normami.

Po výběru a odsouhlasení materiálu následuje úprava výkresu, na jehož základě je poté vyrobena forma. Po slnutí prvního testovacího vzorku provádí dodavatel měření, zda vzorek splňuje výkresem dané hodnoty – například rozměrové a geometrické tolerance, drsnost povrchu vybraných ploch nebo tvrdost dílce. V případě úspěšné výstupní kontroly na straně dodavatele je provedena téměř totožná vstupní kontrola na straně odběratele, tzn. společnosti vyrábějící jističe. Opět je provedeno přeměření a porovnání vůči výkresovým hodnotám.

Pokud součástka projde vstupní kontrolou, je proveden montážní (někdy také nazýván zástavbový) test nejhoršího naměřeného kusu. Po ověření schopnosti namontování je ověřena funkčnost dílce. Testovací vzorek je po předběžném otestování odeslán do laboratoře. Zde je provedeno testování dílce. Dílec, popřípadě dílec s celým mechanismem, je podroben zkoušce provozuschopnosti jističe dle normy ČSN EN 60947-2:05 ED.4:18 8.3.3.4.3 - provozuschopnost jističe bez proudu, přičemž požadavkem je, aby dílec vydržel alespoň 10 000 cyklů.

V případě úspěšného testu následuje proces zavedení do výroby. Dodavatelem jsou dodány oficiální vzorky. Opět je provedeno vstupní měření a oficiální montážní test, tzv. ISIR (*Initial Sample Inspection Report; Zpráva z přejímky vzorku*). Oddělení konstrukce finálně posoudí rozměry, oddělení technologie následně posoudí schopnost montování. Nakonec jsou s dodavatelem sjednány finální podmínky dodávek jako cena za kus, frekvence a forma dodávek atd.

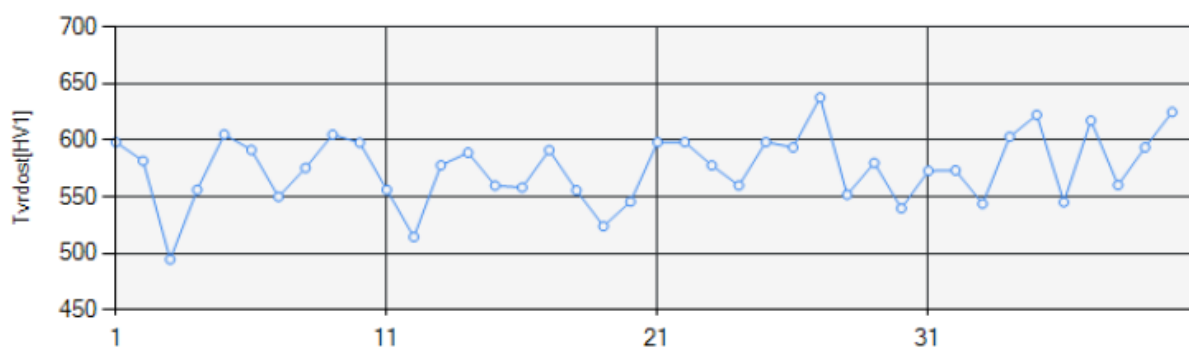
V následujících podkapitolách jsou popsány specifika jednotlivých testování. Celkem byly provedeny čtyři vzorkování, avšak ani jedno bohužel nemůže být považováno za úspěšné. V poslední podkapitole je navržena možná konstrukční změna západky tahové spony tak, aby metoda MIM mohla být znovu opakována s příznivým výsledkem

3.2.1 První vzorkování

První série testovacích dílů byla vyrobena z materiálu AISI 8620. U vyrobených dílců bylo následně provedeno tepelné zpracování – nitrocementace s CHD 0,4 + 0,3 mm a antikorozi konzervace ve WD40. Dle naměrů nebylo dosaženo povrchové tvrdosti $700 \pm 30 \text{ HV}_1$ a tvrdosti v hloubce 0,4 mm 550 HV_1 , jak je vidět v grafu číslo 2.

Tyto vzorky ovšem neprošly vstupní kontrolou rozměrových a geometrických tolerancí. Došlo k výrazné odchylce průměrů obou děr a nebyla dosažena tolerance D10 pro průměry 6 mm a 8 mm. Tyto vzorky byly tedy zamítnuty ještě před montážním testem. Po zpětném hlášení do dodavatelské firmy došlo ke korekci formy – konkrétně k výměně čepů pro formování díry.

Po úpravě formy byla vytvořena druhá série vzorků se stejným materiálem a stejným způsobem postprocessingu. I u druhé série vzorků byla shledána nižší tvrdost. Ve srovnání s první sérií vzorky prošly vstupní kontrolou, neboť dodané dílce splňovaly výkresovou toleranci. Odchytky byly nicméně naměřeny na nefunkčních plochách dílců. I přes odchytky naměřené na nefunkčních plochách dílců byla úspěšně provedena zástavbová zkouška do střádacího mechanismu.



Graf 2 Měření tvrdosti HV_1 na 40 vzorcích

Dílce z druhé série ovšem úspěšně neprošly montážním testem. Hned při prvním testovacím sepnutí střádače dodaná západka tahové spony praskla. K prasknutí došlo i při opakovaných testech s dalšími vzorky ihned při sepnutí mechanismu.

3.2.2 Druhé vzorkování

Po konzultacích s dodavatelem byla pro první sérii druhého vzorkování provedena změna materiálu z AISI 8620 na ASTM-A29-AISI 4140, který využívá na výrobu mechanicky namáhaných součástí, jako jsou úderníky do zbrojního průmyslu – tedy podobně dynamicky

namáhané komponenty, avšak za současného zachování způsobu chemicko-tepelného zpracování (nitrocementace s CHD 0,4 + 0,3 mm).

Změna materiálu však nepřinesla kýžený výsledek. Ačkoli dodané vzorky splnili všechny výkresové parametry a byly úspěšně namontovány v zástavbové zkoušce střádače, po prvním sepnutí mechanismu došlo k prasknutí západky tahové spony. I při opakování testů se materiálem AISI 4140 se opakoval stále stejný scénář – západka tahové spony při prvním sepnutí vždy praskla.

Neúspěšnost testů při prvním testování druhého vzorkování vedly k úvahám o změně způsobu chemicko-tepelného zpracování. Externí kalírna prověřila možnost zvýšení pevnosti dílů pomocí úprav tepelného zpracování pro vzorky z materiálu AISI 4140. Bylo zjištěno, že pro dosažení povrchové tvrdosti $700 \pm 30 \text{ HV}_{10}$ 0,4 + 0,3 mm lze použít nitridaci a karbonitridaci. Jako alternativní způsob chemicko-tepelného zpracování byla nakonec zvolena technologie ARCOR, která spočívá v karbonitridaci v solné lázni s následnou oxidací.

Změna způsobu chemicko-tepelného zpracování přinesla první úspěchy. Kromě toho, že testovací sada prošla vstupní kontrolou rozměrových a geometrických tolerancí, byla úspěšná i v zástavbovém testu.

Střádač se vzorkem západky tahové spony byl namontován do vzduchového jističe a tento jistič prošel kompletním testováním během montáže. Testovaný jistič splnil jak dynamické a izolační vlastnosti, tzn. jistič je schopen spínat a rozepínat kontakty v časovém intervalu daném normou, tak projevil odpovídající vypínací schopnosti. Po úspěšném testování ve výrobě byl tedy kompletní jistič včetně střádacího mechanismu odeslán do zkušební laboratoře, kde byly provedeny testy ověřující mechanickou životnost nově instalované součástky. Požadavkem bylo projevít provozuschopnost bez proudu v minimální délce deset tisíc cyklů sepnutí a následného rozepnutí.

Test byl neúspěšně ukončen po 158 provedených cyklech kvůli poruše na střádacím mechanismu. Po demontáži mechanismu a následné analýze testovaného jističe byla nalezena opět prasklá západka tahové spony. Průběh testování je zobrazen na obrázku č. 27. Přes 150 úspěšných cyklů jističe byl velký posun od defektu dílu při prvním vzorkování, nicméně životnost byla stále o dva řády nižší, než je deklarovaná životnost jističe.



Obrázek 27 Tažná západka po 158 cyklech v jističi

3.2.3 Třetí vzorkování

Externí dodavatelská firma avizovala, že možnosti samotné metody MIM byly již vyčerpány a není možné vytvořit vzorky s vyšší dynamickou pevností. Jako vhodná alternativa byla identifikována kombinace metody MIM s následnou úpravou dílce metodou HIP, díky níž by došlo k lepší homogenizaci struktur západky, snížení počtu mezer působících jako koncentrátoři napětí a bylo by dosaženo teoretické stoprocentní hustoty.

Vzhledem k faktu, že metodu HIP v České republice zatím používá pouze pár vybraných institucí, byla pro kooperaci na vzorkování západek tahové spony domluvena spolupráce se švédskou firmou. V případě úspěšného testování by byla technologie izostatického lisování za tepla zajištěna dodavatelem výrobků vytvořených technologií MIM.

Testovací vzorky pro třetí vzorkování byly vyrobeny z materiálu AISI 4140 s tepelným zpracováním ARCOR. Takto upravené díly byly následně poslány do Švédska, kde došlo k izostatickému lisování za tepla. Dílce nicméně vykazovaly značné rozměrové odchylky, především rozteče děr a jejich průměry byly výrazně větší, než jaké připouštěla výkresová dokumentace. Důvodem bylo smrštění a deformace dílu v důsledku izostatického lisování za tepla.

I přestože dílce nesplnily vstupní test rozměrových a geometrických tolerancí, na základě rozhodnutí oddělení technologie byla provedena interní úprava dílců třetího vzorkování, tak aby bylo možné provést testování. Pomocí frézování byly provedeny korekce průměrů děr a drobné úpravy jejich roztečí tak, aby odpovídaly výkresu.

Upravené dílce byly opět testovány ve zkušební laboratoři na 10 000 cyklů sepnutí takto sestaveného jističe. Západka tahové spony vyrobená pomocí MIM s tepelným zpracováním ARCOR, následným izostatickým lisováním za tepla a korekcí pomocí frézování úspěšně vydržela celé testování deseti tisíc cyklů. Ačkoliv byl výsledek testování úspěšný, oddělení produkční kvality chtělo zopakovat test životnosti s originálními díly, které by byly dodány výrobcem v požadované kvalitě bez nutných rozměrových úprav frézováním.



Obrázek 28 Defekt vzorku č. 1



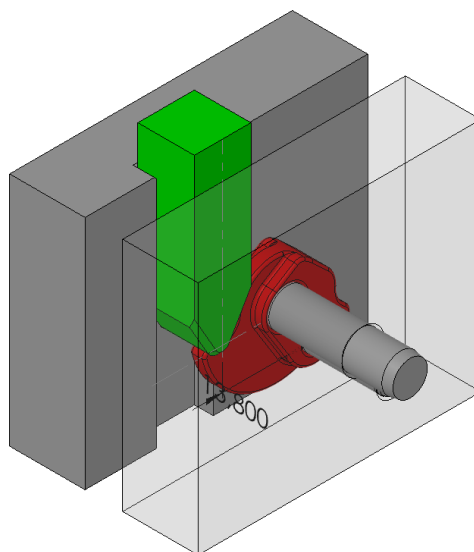
Obrázek 29 Defekt vzorku č. 2

Po opětovných úpravách formy byly dodány vzorky odpovídající výkresu, následně byl proveden montážní test a došlo i na testy životnosti. Na testy byly poslány dva jističe s různými vypínacími schopnostmi. Jistič s vypínací schopností 100 kA a vzorkem západky tahové spony č. 1 vydržel pouze 6 516 cyklů jističe, poté byl test zastaven z důvodu sepnutí jističe během střádání spínacího mechanismu. Tento defekt je znakem defektu na západce tahové spony (viz obrázek č. 28).

Test druhého jističe s vypínací schopností 85 kA byl přerušen po 2 131 cyklech. Důvodem zastavení testování byla neschopnost střadače sepnout jistič do pracovní polohy a identifikována byla závada na západce (viz obrázek č. 29). Na základě posledních tří testů začalo zkoumání stability vlastností součásti vyráběné pomocí metody MIM a porovnávání s frézovanými kusy, které je popsáno v následující podkapitole.

3.2.4 Destruktivní zkouška vzorků

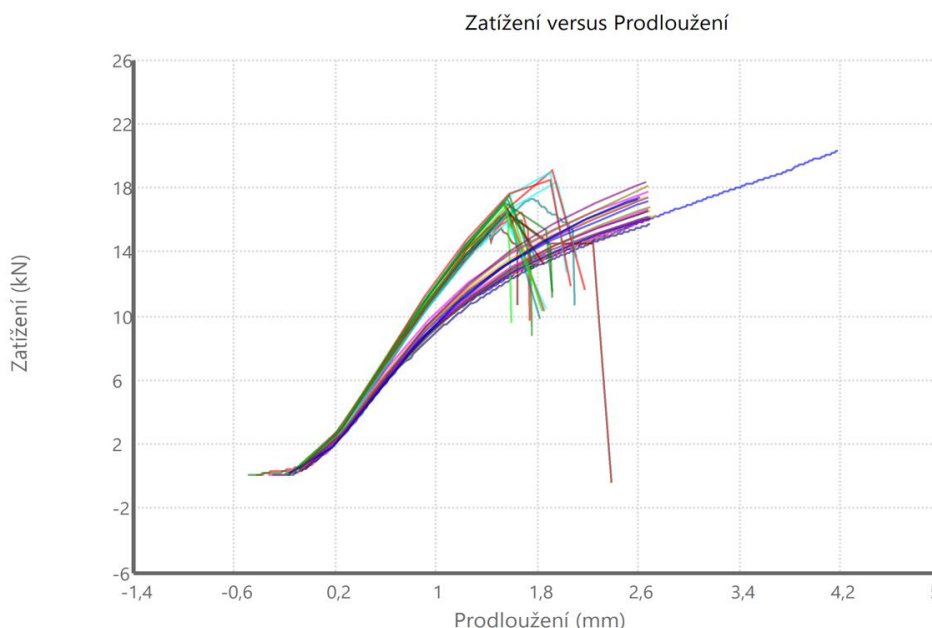
Vzhledem k faktu, že je velmi obtížné měřit jakékoliv relevantní veličiny (např. mez kluzu a mez pevnosti) tahové západky během samotného spínání střadače či celého jističe, byl sestrojen speciální stlačovací přípravek na měření síly potřebné k destrukci pro sledovanou západku tahové spony vyrobenou různými postupy.



Obrázek 30 Schéma testovacího mechanismu

Měřicí přípravek se skládá z dvou rovnoběžných ocelových desek, mezi které je vzorek upevněn a zajištěn dvěma čepy tak, aby simuloval spínání střadacího mechanismu. Na rozdíl od střadacího mechanismu je zde zajištěno staticky určité uložení. Na výběžek vzorku, kde dochází při spínání k maximálnímu zatížení, je tlačén trn, simulující zatěžující sílu až do deformace vzorku. Na trn je připojen dynamometr, který měří zatěžující sílu v reálném čase, a zároveň je měřena hloubka stlačení trnu. Z každého zatěžového testu je vygenerován graf závislosti zatěžované síly na délce prodloužení. Na obrázku č. 30 je zobrazen model testovacího přípravku. Na popsaném testovacím zařízení bylo nejprve otestováno 20 kusů západky tahové spony od stávajícího dodavatele vyrobených frézováním používaných v současné výrobě z materiálu 42CrMo4. Z grafu č. 3 je patrné, že dochází k přetržení vzorku při zatížení v rozmezí 14 až 17 kN, při prodloužení 1 až 1,5 mm (zelené a oranžové linie).

Prvních pět vzorků bylo testováno kvazistaticky rychlostí 10 mm/min. Poté byla snaha simulovat dynamické zatěžování západky, jako při chodu jističe a na dalších 15 testů bylo prováděno rychlostí 200 mm/min, což je limit testovacího lisu. Nebyly nalezeny žádné rozdíly mezi těmito rychlostmi zatěžování. Nutno konstatovat, že ani rychlost 200 mm/min není dostatečná pro simulaci dynamického namáhání během spínání jističe. Při maximálním zatížení západky tahové spony při spínání jističe 7 800 N dochází k deformaci 0,6 mm



Graf 3 Výsledky destrukčního testování frézovaných a MIM dílců (třetí vzorkování)

V dalším kroku bylo na přípravku změřeno 20 kusů vzorků vyrobených pomocí metody MIM (třetí vzorkování) s následnou úpravou HIP a povrchovou úpravou ARCOR. Na grafu č. 3. je vidět, že nedošlo k lomu vzorků (modré a fialové křivky), jako u testování frézované součásti. Při prvním testu, kdy byla západka stlačena až o 4,2 mm. Ačkoliv nedošlo k lomu, západka již byla deformována do nefunkčních rozměrů.

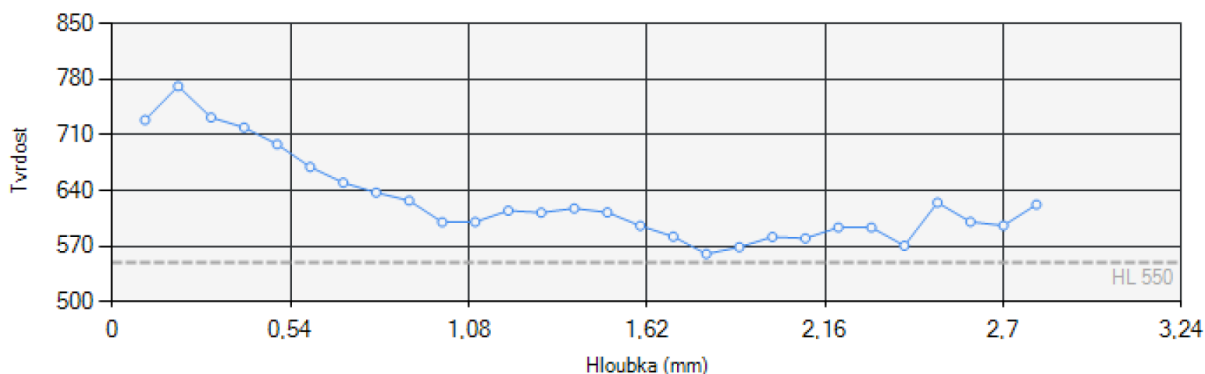
Následující testy byly zastaveny okolo deformace 2,2 mm bez lomu, ačkoliv ještě docházelo ke zvyšování zatěžující síly až k 18 kN. Vzorky s touto kombinací výroby a tepelným zpracováním tedy jsou velmi houževnaté a nedochází ke křehkému lomu při této rychlosti zatěžování. Opět bylo prvních pět vzorků testováno rychlostí 10 mm/min a dalších 15 vzorků rychlostí 200 mm/min a ani zde nebyl pozorován rozdíl měřených veličin. Pro maximální pracovní zatížení 7 800 N je patrná deformace 0,8 mm, což je o 0,2 mm více než u frézované západky. Na obrázku č. 31 jsou zachyceny technologií MIM sintrované západky po destrukčních zkouškách.



Obrázek 31 Vzorky tahové západky vyrobené technologií MIM po destrukčních zkouškách

3.2.5 Čtvrté vzorkování

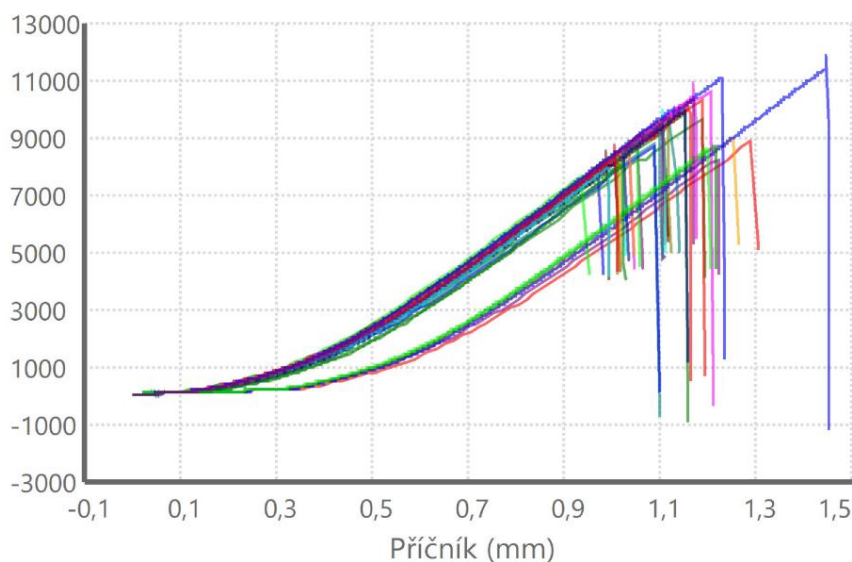
Neuspokojivé výsledky s testováním originálně dodaných dílců vyrobených z materiálu AISI 4140 s následným post-procesingem izostatickým lisováním za tepla a tepelným zpracováním ARCOR přiměly dodavatele k návratu k materiálu AISI 8620. Dodané vzorky úspěšně prošly vstupním testem rozměrů, stejně tak jako testem tvrdosti HV_1 dle standardu CHD jak je patrné z grafu č. 4. je patrné, že vzorek západky tahové spony splňuje normu udávající jejich tvrdost.



Graf 4 Průběh tvrdosti čtvrtého vzorkování

Vzorky ze čtvrtého vzorkování byly vystaveny stejné destruktivní zátěžové zkoušce. V rozmezí 7 a 11 kN došlo k prasknutí vzorků, jak je čitelné z grafu č. 5. Po vyhodnocení výsledků bylo rozhodnuto, že pevnostní vlastnosti vzorků nejsou dostatečné pro to, aby byl postaven testovací jistič.

Zatížení versus Příčník



Graf 5 Výsledky destrukčního testování MIM dílců (čtvrté vzorkování)

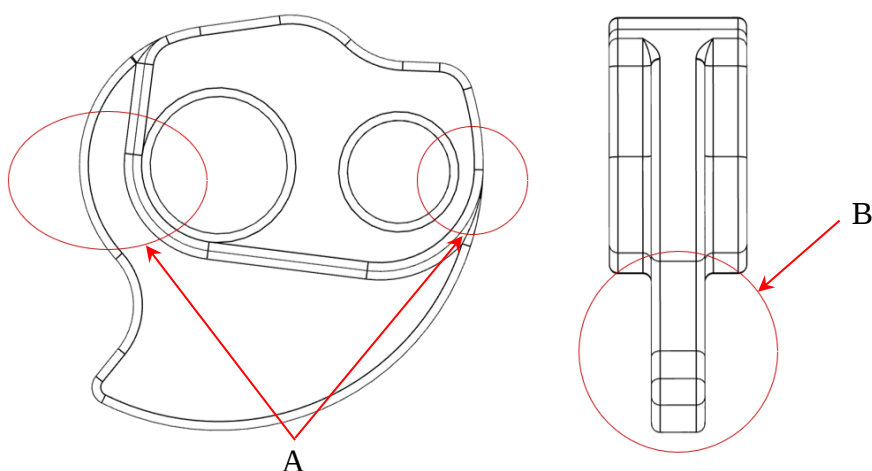
3.2.6 Následný postup

Technologie MIM se ukázala jako nevhodná pro součást západka tahové spony při současném designu dílu. Nemůže ji používat ve standardní výrobě ani s využitím izostatického lisování za tepla, které ještě zlepšilo její pevnostní vlastnosti. Jako jediná možnost k využití této metody se jeví konstrukční změny na západce tahové spony, případně využití metody pro jiný dílec.

Dle zkušeností z destrukčních zkoušek a výsledků v testovací laboratoři s jističi lze nutné konstrukční změny odhadnout.

Z obrázku č. 31 v kapitole 3.2.4 lze usoudit, že jedno ze slabých míst západky tahové spony je pomyslná spojnice středů děr západky tahové spony, kde je dílec nejslabší. V tomto kritickém místě při testování stlačovacím přípravkem docházelo k lomu nejčastěji. K ošetření tohoto defektu je třeba přidat materiál v nejužším místě západky tahové spony a rozšířit součást – vyznačeno v obrázku č. 32 pod písmenem A.

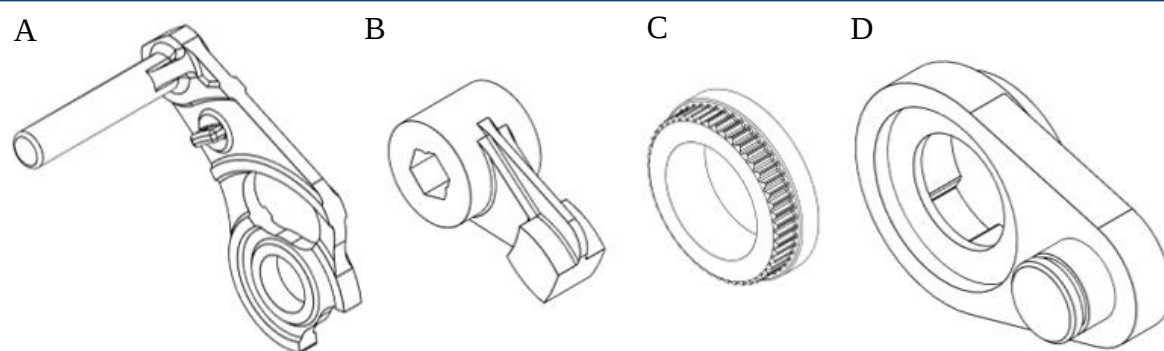
Při stejné dávce destruktivních testů bylo detekováno několikrát prasknutí „nosu“ tahové západky – také viditelné v obrázku č. 31 v kapitole 3.2.4. Tento defekt lze ošetřit rozšířením „nosu“ tahové západky, čímž dojde k rozložení zatěžující síly a sníží se pravděpodobnost defektu. Znázornění této úpravy je v obrázku č. 32 pod písmenem B. Úprava „rozšíření nosu“ taktéž pomůže proti defektu, který se objevil při třetím vzorkování, kdy při testech životnosti došlo k plastické deformaci „nosu“ v místě, kde se dotýká západka tahové spony s kladkou vypínací západky při sepnutí jističe. (Viditelné na obrázku č. 29 v kapitole 3.2.3)



Obrázek 32 Úpravy západky tahové spony

Obě tyto konstrukční úpravy vedou k masivnější konstrukci západky tahové spony, což by způsobilo kolize s díly, které jsou v těsné blízkosti západky tahové spony a je třeba je také konstrukčně upravit pro hladký chod střádacího mechanismu. Masivnější konstrukce západky tahové spony by ovlivnila konstrukci několika dílů celého střádacího mechanismu, především sestava vypínací západky, která by musela mít větší rozteč plechů, vyšší nýty a širší kladku, což by ovlivnilo sestavu dalších 8 dílů, které na ní navazují a musela by tak být principiálně změněna celková konstrukce střádacího mechanismu.

Pokud by byla vůle pokračovat ve výzkumu využití technologie MIM, případně HIP pro jiné součásti na vzduchových jističích, nebylo by lehké je vytipovat. V jističi se nenachází příliš součástí, které by splňovali parametry pro výrobu metodou MIM a HIP, které jsou popsány v kapitole 2.1.3. Zároveň většina využívaných dílů je již optimalizována pro technologie jako přesné stříhání nebo standardní proces sintrování. Jako zástupci splňující parametry pro výrobu metodou MIM byly vybrány součástky zobrazené na obrázku č. 33: tlumič (A), výkyvná páka (B), lisovací ložisko (C) a výsuvná vačka (D).



Obrázek 33 Návrhy dílů na výrobu pomocí MIM

4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Vzhledem k faktu, že navrhovaný způsob výroby dílce západky tahové spony nebyl úspěšně aplikován do výroby a produkce dílce metodou MIM nebyla kvůli dosažení technických limitů v komerčním měřítku vůbec zahájena. Nicméně, jak řekl Thomas Alva Edison: „Neselhal jsem 10 000krát. Pouze jsem našel 10 000 způsobů, které nefungují [82].“ Provedení ekonomického zhodnocení je tak možné pouze na potenciální rovině.

Vzhledem k faktu, že změna způsobu výroby by představovala i změnu dodavatele, je nutné vzít v úvahu přínosy i rizika související s tímto krokem. Jedním z nejdůležitějších kritérií výběru dodavatele západky tahové spony je cena výrobku. Poptávané množství je 80 000 ks západek ročně. Prodejní kontraktovaná cena jedné západky realizované metodou frézování je 650 Kč, naproti tomu nabízená cena západky vyrobené metodou MIM a následně chemicko-tepelně opracované je 180 Kč. Na jednom kusu tudíž potenciální úspora činí 470 Kč, při 80 tisíci kusech ročně se jedná o potenciální úsporu 37,6 milionu Kč, jak je patrné z tabulky č. 5.¹

Tabulka 5 Srovnání nákladů výroby dílce metodou MIM a frézování

	Frézování	Metoda MIM + HIP
Poptávané množství (ks)	80 000	80 000
Cena za jednotku (Kč)	650	180
Roční náklady (Kč)	52 000 000	14 400 000
Potenciální roční úspora (Kč)	37 600 000	

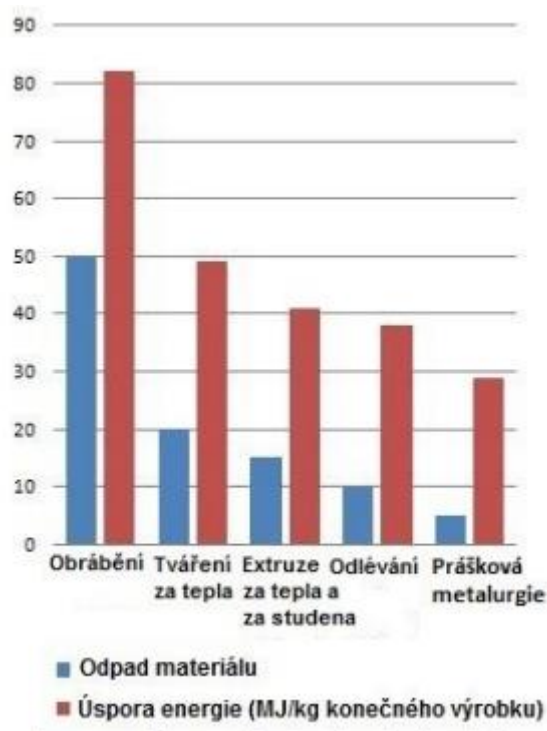
Nutno podotknout, že tyto ceny byly nasmlouvány v polovině roku 2021. Od té doby cena železa v souvislosti s koronavirovou pandemií a následně i válkou na Ukrajině prudce stoupla. Pro srovnání, v roce 2016 stála tuna železné rudy přibližně 45 USD, v roce 2021 pak překonala hranici 200 USD/tunu. Hlavním hnacím faktorem je zvýšená poptávka a omezení produkce ze strany Číny, která je největším světovým exportérem oceli. Spolu se značným nárůstem cen pohonných hmot, energií a uhlí se tak výrobky ze železa a oceli stále prodražují, což ještě zvyšuje důraz na hledání úsporných opatření. [83; 84]

Ačkoli je cena postprocessingu pro oba způsoby výroby víceméně stejná, cena základního zpracování se zásadně liší. Hlavním důvodem je vyšší energetická náročnost frézování, srovnání je znázorněno na obrázku 34. Při sintrování je také vyprodukováno větší množství odpadu ve formě třísek, zatímco při metodě MIM je efektivně využit téměř všechen vstupní materiál.

Kromě odpadu ze zpracovávaného materiálu dochází při frézování k opotřebení a nahrazování nástrojů, zatímco forma vytvořená pro MIM je schopná vydržet 300 000 cyklů, aniž by na ní musely být prováděny zásadní úpravy.

Ačkoli by úspora představovala 37,6 milionu Kč ročně při zachování konstantního poptávaného množství a ceny, cena není jediným kritériem výběru dodavatele. Primární roli hraje schopnost součástky plnit svoji funkci, kterou dílce vyrobené metodou MIM nesplňují. Proto i přes značné potenciální úspory není možné takové dílce používat.

¹ Všechny ceny byly vynásobeny koeficientem, aby nedošlo k prozrazení obchodního tajemství



Obrázek 34 Srovnání úspor materiálu a energie pro odlišné technologie výroby [3]

Nutno poznamenat, že změna dodavatele západky tahové spony by představovala určité riziko vzhledem k množství společností zabývajících se touto technologií a možnosti jejich snadné nahraditelnosti. V případě frézování je po překonání byrokratického aparátu korporátu bylo potenciální nahrazení dodavatele relativně snazší, a to zejména s ohledem na absenci speciálních požadavků na výrobu formy atd. Exkluzivita dodavatele technologie MIM je opravdu velká, nehledě na nutnost následného zpracování metodou HIP, kde se množství dodavatelů v rámci EU počítá v řádu jednotek. Riziko výpadku dodávky, což může v krajním případě vyústit v pozastavení výroby, a tudíž vést ke značným finančním ztrátám v řádech milionů eur za ušlý zisk je významným faktorem rozhodování.

ZÁVĚR

V konkurenčním prostředí elektrotechnického průmyslu stále více narůstá tlak na snižování výrobních nákladů. Kromě automatizace procesů nebo zkracování výrobních časů jednotlivých zařízení i lidského faktoru existují tendence hledat úspory i formou změny technologie výroby. Ačkoli je většina kovových dílců v jističi tvářena plošným stříháním, několik součástí je frézováno. Právě na tyto součástky cílí snahy o dosažení úspor, neboť frézování patří k dražším způsobům výroby kovových dílců.

Zvolena byla západka tahové spony, tedy dílec, který je součástí střadače, jehož hlavní funkci je zajistit včasné sepnutí jističe, a tím i jeho bezproblémovou funkčnost. Západka tahové spony se vzhledem k požadavkům na životnost a mechanické vlastnosti, při současném dodržení rozměrových a geometrických tolerancí jevila být vhodným dílcem pro aplikaci alternativního způsobu výroby, konkrétně metody plastického vstřikování kovů s následným chemicko-tepelným zpracováním.

Po provedení drobných konstrukčních úprav a volbě vhodného typu kovového prášku i pojiva byla provedena série několika vzorkování, které je nezbytnou součástí zavádění dílce vyráběného odlišnou technologií do výroby. Ani jedno z testování však nelze považovat za úspěšné.

První vzorky vyrobeny z oceli AISI 8620 s následnou nitrocementací nesplnily rozměrové a geometrické tolerance. Po korekci formy pro práškové vstřikování již vzorky splňovaly výkresovou toleranci pro otvory, avšak nesplňovaly požadavky na nefunkčních plochách. I přes toto omezení byly úspěšně namontovány do jističe, avšak po prvním sepnutí střadače tažná západka praskla.

Po neúspěšném testování došlo ke změně materiálu na AISI 4140, který je užívaný pro mechanicky více namáhané součástky, při zachování způsobu chemicko-tepelného zpracování, tedy nitrocementace. I zde při prvním sepnutí jističe západka tahové spony praskla. Po změně chemicko-tepelného zpracování na technologii ARCOR, prošel jistič i se západkou vyrobenou metodou MIM montážním testem. Západka nicméně neprošla testem životnosti, po 158 provedených cyklech opět praskla.

Pro třetí testování byly vzorky vyrobeny z materiálu AISI 4140 s následným užitím ARCOR a technologie izostatického lisování za tepla, která měla zajistit homogenizaci struktury. Takto vyrobené dílce však nesplnily měření geometrických tolerancí a musela být provedena další změna formy. Ani takto vyrobené dílce však neprošly testem životnosti s požadavkem 10 000 cyklů, první vydržel 6 516 cyklů, druhý vzorek pouze 2 131 cyklů.

Při doposud posledním testování byly vzorky slinovány z materiálu AISI 8620 s následným chemicko-tepelným zpracováním metodou ARCOR a izostatickým lisováním za tepla. Ani tato kombinace však nevedla k nalezení úspěšného řešení, vzorky neprošly destrukčním testem.

Pro tažnou západku se technologie MIM ukázala být nevhodným řešením zejména kvůli povaze cyklického zatěžování, i přestože teoreticky měly vlastnosti dílců vyrobených technologií MIM s následným chemicko-tepelným zpracováním a izostatickým lisováním za tepla odpovídat vlastnostem CNC frézovaných dílců z válcované oceli. Ačkoli by finanční úspora činila 37,6 milionu korun, vzhledem k neúspěchu zůstala pouze v teoretické rovině.

Pro úspěšné uvedení dílců vyrobených práškovou metalurgií by tak bylo nutné provést zásadní konstrukční změny na střadacím mechanismu jističe. Masivnější konstrukce západky tahové spony by však vyžadovala úpravu osmi navazujících součástí, popřípadě změnu celkové konstrukce střadacího mechanismu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Eurobalt. Metal Injection Moulding Solutions. [obrázek]. [online]. [cit. 11.5.2022]. Dostupné z: <https://eurobalt.net/metal-injection-molding/>.
 2. DVOŘÁK, Milan a Michaela MAREČKOVÁ. *Teorie tváření*. Studijní opory pro kombinované studium I. Stupeň, 2. ročník CTT-K. Vysoké učení technické v Brně, Ústav strojírenské technologie, odbor tváření kovů a plastů. [online]. Brno. září 2006. [cit. 14.4.2022]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/technologie_tvareni/index.htm.
 3. SKOTNICOVÁ, Kateřina a Miroslav KURSA. *Prášková metalurgie: studijní opory: učební text, scénáře, testy*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN isbn978-80-248-3378-1.
 4. EPMA. *Introduction to PM HIP Technology*. [online]. 2019. [cit. 12.2.2022]. Dostupné z: <https://www.epma.com/hot-isostatic-pressing>.
 5. VŘEŠŤÁL, Jan, Jiří SOPOUŠEK a Pavel BROŽ. *Chemicko-tepelné zpracování materiálů*. [online]. [cit. 30.4.2022]. Dostupné z: https://www.sci.muni.cz/chemsekcce/c8870/pdf/Uloha6_Chemtepzprac.pdf.
 6. ZÁBAVNÍK, Viktor. *Chemicko-tepelné spracovanie kovov*. Košice: Technická univerzita, [1991]. ISBN 80-7099-162-3.
 7. JECH, Jaroslav. *Tepelné zpracování oceli: metalografická příručka: určeno [také] pro studenty středních průmyslových škol hutnických*. 3., upr. a dopl. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1977. Řada hutnické literatury.
 8. CAO, Peng, Muhammad Dilawer HAYAT. *Feedstock Technology for Reactive Metal Injection Molding: Process, Design and Application*. [online]. 2020. ISBN 978-0-12-817501-9. [cit. 15.5.2022]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128175019/feedstock-technology-for-reactive-metal-injection-molding>. DOI: 10x1016/B978-0-12-817501-9.00001-6.
 9. GERMAN, Randall M. PIM breaks the \$1 bn barrier. *Metal Powder Report*. [online]. Vol.63, No.3, March 2008, pp.8-10. [cit. 15.4.2022]. ISSN 0026-0657. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0026-0657\(08\)70036-5](https://doi.org/10.1016/S0026-0657(08)70036-5).
 10. GONZALEZ-GUTIERREZ, Joamin, Igor EMRI, Gustavo Beulke STRINGARI. *Powder Injection Moldig of Metal and Ceramic Parts*. [online]. March 2012. [cit. 16.2.2022]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/221927080_Powder_Injection_Molding_of_Metal_and_Ceramic_Parts/link/0fcfd50812cd447143000000/download.
 11. Global Industry Analysts, *Global Metal and Ceramic Injection Molding Market to Reach \$3.7 Billion by 2017, According to New Report by Global Industry Analysts, Inc.* [online]. [cit. 3.3.2022]. Dostupné z: https://www.prweb.com/releases/metal_injection_molding/ceramic_injection_molding/prweb8585249.htm.
 12. Vibrom. *Technologie MIM*. [online]. [cit. 12.2.2022]. Dostupné z: <https://www.vibrom.cz/cz/technologie-mim>.
-

13. Powder Injection Moulding International. *An overview of the Metal Injection Moulding process*. [online]. [cit. 9.4.2022]. Dostupné z: <https://www.pim-international.com/metal-injection-molding/an-overview-of-the-metal-injection-moulding-process/>.
14. Rompa Group. *Merging two established technologies for an optimal product*. [online]. (10. 5. 2021) [cit. 22.3.2022]. Dostupné z: <https://www.rompagroup.com/news/merging-two-established-technologies-for-an-optimal-product.aspx>.
15. KUMAR, Senthil K. a Anup K. GHOSH. Mechanical properties of injection molded long fiber polypropylene composites, Part 1: Tensile and flexural properties. *Polymer Composites*. [online]. Vol. 28, No. 2, pp. 259-266, 15 March 2007. [cit. 19.5.2022]. <https://doi.org/10.1002/pc.20298>. Dostupné z: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pc.20298?casa_token=m3mu3sdXVT4AAAAA:x3x4egLhCuPc8nSLQF5S8WDgd4rIpknj7q52dfergoIBrtLADo6QDA21pABM8HADBu0SoyByPscHN4o.
16. Indo-MIM. *How MIM Works*. [obrázek]. [online]. [cit. 4.2.2022]. Dostupné z: <http://www.rainmakersinteractive.in/indoMim/howMimWorks.html>.
17. GONCALVES, Aparecido C. Metallic powder injection molding using low pressure. *Journal of Materials Processing Technology*. [online]. Vol.118, No.1-3, December 2001, pp.193-198. ISSN 0924-0136. DOI:10.1016/S0924-0136(01)00916-5. [cit. 2.2.2022]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/229290489_Metallic_powder_injection_molding_using_low_pressure/link/5fabf3a392851cf7dd0e08b2/download.
18. HAUSNEROVÁ, Berenika. Powder injection moulding – An alternative processing method for automotive items. *New Trends and Developments in Automotive System Engineering*. [online]. Rijeka, Croatia, 2011, pp 129-145. [cit. 13.3.2022]. ISBN 9789533075144. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/221910037_Powder_Injection_Moulding_-_An_Alternative_Processing_Method_for_Automotive_Items
19. SCHLIEPER, Georg. Tooling for metal injection molding (MIM). In *Handbook of Metal Injection Molding. Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering*. [online]. 2012, pp. 93-108. ISBN 9780857090669. <https://doi.org/10.1533/9780857096234.1.93>. [cit. 1.4.2022]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857090669500054>.
20. TSENG, Wenjea J. a Chung-King HSU. Cracking defect and porosity evolution during thermal debinding in ceramic injection moldings. *Ceramics International*. [online]. Vol.25, No. 5, July 1999, pp.461-466. ISSN 0272-8842. [cit. 13.3.2022]. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(98\)00061-3](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(98)00061-3).
21. GONZALEZ-GUTIERREZ, Joamin, Santiago CANO CANO, Stephan SCHUSCHNIGG, Christian KUKLA, Janak SAPKOTA a Clémens HOLZER. *Additive Manufacturing of Metallic and Ceramic Components by the Material Extrusion of Highly-Filled Polymers: A Review and Future Perspectives*. [online]. May 2018. [cit. 1.3.2022]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/figure/Schematic->

representation-of-the-shaping-debinding-and-sintering-SDS-process-and_fig3_325266287

22. XINGQUAN, Jiang, Duxin LI, Renwei LU, Zhongchen YANG a Zhiyong LIU. Study of hyperbranched polymer on POM-based binder in metal injection molding. *Materials Research Express*. [online]. IOP Publishing Ltd, Vol. 6, No. 12, 6 March 2020. [cit. 16.3.2022]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2053-1591/ab79d0>.
23. BOLJANOVIC, Vukota. Powder metallurgy. In *Metal Shaping Processes. Casting and Molding, Particulate Processing, Deformation Processes*. [online]. Metal Removal. Industrial Press Inc., 2010, ISBN 9780831 133801, New York, USA, pp. 75-106. [cit. 17.3.2022]. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=bX5_9tUbi6EC&pg=PA73&hl=cs&source=gbv_toc_r&cad=4#v=onepage&q&f=false.
24. ZIMMERMAN, Franz X., Jerry TOOPS. Hot Isostatic Pressing: Today and Tomorrow. *Hasmak.com* [online]. 2008. [cit. 13.3.2022]. Dostupné z: <http://hasmak.com.tr/tozpdf/HIP-Today-andTomorrow.pdf>.
25. TOIVONEN, Aki. Applicability of HIP for reactor components. [online]. January 2009. [cit. 18.1.2022]. DOI:10.13140/RG.2.1.4140.8488; Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/281741321_Applicability_of_HIP_for_reactor_components
26. Nippon Tungsten. *Application of HIP technology*. [online]. 2006. [cit. 12.2.2022]. Dostupné z: <http://www.nittan.co.jp/en/tech/techinfo/hip.html>.
27. MM průmyslové spektrum. *Izostatické lisování za tepla*. [online]. 18.7.2005. [cit. 5.2.2022]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/izostaticke-lisovani-za-tepla>.
28. Renishaw. *Práškové kovy pro aditivní výrobu*. [online]. 2022. [cit. 19.2.2022]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/praskove-kovy-pro-aditivni-vyrobu--31457>.
29. DOBRZANSKI, Leszek A. Fabrication Technologies of the Sintered Materials Including Materials for Medical and Dental Application. [obrázek]. *Powder Metallurgy – Fundamentals and Case Studies*. [online]. In Tech, Rijeka, Croatia, March 2017, pp 17-52. [cit. 13.3.2022]. DOI 10.5772/65376. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Comparison-of-the-methods-a-hot-pressing-HP-and-b-hot-isostatic-pressing-HIP_fig6_315756201.
30. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
31. BOSSLET, Joachim. *Základy a aplikace karbonitridace v solné lázni*. [online]. Durferit GmbH, Mannheim. Berlín, 2006. [cit. 26.3.2022]. Dostupné z: <http://www.katringplus.cz/file.php?nid=9686&oid=3731765>.
32. Meduna vakuová kalírna. *Cementace*. [online]. [cit. 16.2.2022]. Dostupné z: <https://www.kalirna.cz/cz/sluzby/23-cementace.html>.
33. DORAZIL, Eduard a Jan HRSTKA. *Strojírenské materiály a povrchové úpravy: určeno pro posl. fak. strojní*. Brno: VUT, 1985. Učební texty vysokých škol.

-
34. HRUBÝ, Vojtěch. *Katalog technologických listů iontové nitridace*. Brno: STROJTECH, 1991.
35. SILBERNAGEL, Arnošt. *Nauka o kovech pro střední průmyslové školy hutnické*. 3., nezm. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981.
36. MICHNA, Štefan, Jarmila TRPČEVSKÁ a Iva NOVÁ. *Strojírenská technologie*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2012. ISBN isbn978-80-7414-501-8.
37. Bodycote. *Nízkotlaká cementace (LPC)*. [online]. [cit.3.3.2022]. Dostupné z: <https://www.bodycote.com/cs/sluzby/tepelne-zpracovani/vytvrzovani-povrchu-s-naslednym-kalenim/nizkotlaka-cementace-lpc/>.
38. Strojářská bible. *Chemicko tepelné zpracování*. [obrázek]. [online]. 2022. [cit. 8.2.2022]. Dostupné z: <https://www.astmsteel.com/product/aisi-alloy-4140-steel-bar/https://www.strojarskabible.cz/chemicko-tepelne-zpracovani/>.
39. PÍŠEK, František, Ladislav JENÍČEK, Přemysl RYŠ, Mojmír CENEK, Karel MAZANEC a Antonín HRBEK. *Nauka o materiálu I: nauka o kovech*. Druhé rozšířené a zcela přepracované vydání. Praha: Academia, nakladatelství Československé akademie věd, 1975.
40. MOLÍKOVÁ, Eva. *Tepelné zpracování slitin Fe - C*. Nauka o materiálu. Ústav materiálových věd a inženýrství [online]. Brno, 2012. [cit. 6.3.2022]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/nomd/Index.html>.
41. PLUHAR, Jaroslav. *Nauka o materiálech*. Bratislava: Alfa, 1989.
42. SKOČOVSKÝ, Petr a Ivan DURMIS. *Technológia tepelného spracovania kovov*. Bratislava: Alfa, 1984.
43. SALABOVÁ, Petra. Podtlaková cementace. *Tribotechnika*. [online]. TechPark vydavatelstvo, 2013, Vol. 6, Nr. 3, pp 54-55. [cit. 7.3.2022]. Dostupné z: https://www.scribd.com/embeds/144596602/content?start_page=1&view_mode=book&access.
44. Tos Varnsdorf. *Chemische und thermische Metallbearbeitung*. [online]. 2022. [cit. 30.3.2022]. Dostupné z: <https://www.tosvarnsdorf.cz/de/dienste/chemische-und-thermische-metallbearbeitung/>.
45. MACEK, Karel, Petr ZUNA a Jiří JANOVEC. *Tepelné úpravy kovových materiálů*. Praha: ČVUT, 1993. ISBN isbn80-010-1002-3.
46. VÁŇOVÁ, Petra. *Základy tepelného zpracování* [online]. [cit. 19.1.2022]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/9453357-Zaklady-tepelneho-zpracovani-kovu.html>.
47. KRAUS, Václav. *Tepelné zpracování a slinování*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2013. ISBN 978-80-261-0260-1.
48. VĚCHET, Stanislav a Karel NĚMEC. *Tepelné zpracování ocelí (druhy a způsoby)*. [obrázek]. [online]. [cit. 7.4.2022]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2810347/>.
-

-
49. HLUCHÝ, Miroslav, Rudolf PAŇÁK a Oldřich MODRÁČEK. *Strojírenská technologie 1*. 3. přeprac. vyd. Praha: Scientia, 2002. ISBN isbn80-718-3265-0.
50. DOKTOR, Tomáš. *Tepelné zpracování ocelí. Kalení a popouštění. Chemicko-tepelné zpracování. Tepelné zpracování litin*. [online]. [cit. 18.4.2022]. Dostupné z: http://www.mech.fd.cvut.cz/members/doktor/k618mt/prednaskove-prezentace/k618mri1_lecture08.pdf.
51. Meduna vakuová kalírna. *Nitridace*. [online]. [cit. 3.2.2022]. Dostupné z: <https://www.kalirna.cz/cz/sluzby/26-nitridace.html>.
52. SOMERS, Marcel. *Nitriding and Nitrocarburizing: Status and future challenges*. [online]. Heat Treatment nad Surface Engineering – Proceedings of Heat Treatment and Surface Engineering. January 2013, pp. 69-84. [cit. 8.3.2022]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/287263972_Nitriding_and_nitrocarburizing_Status_and_future_challenges.
53. HOLEMÁŘ, Alois a Vojtěch HRUBÝ. *Iontová nitridace v praxi*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1989. Redakce strojírenské a metalurgické literatury. ISBN isbn80-030-0001-7.
54. SMÓLING, Kálmán. *Tepelné a chemicko-tepelné spracovanie v príkladoch*. Bratislava: Alfa, 1989. Edícia strojárскеj literatúry (Alfa).
55. DAVIS, Joseph R. *Surface hardening of steels: understanding the basics*. [online]. Materials Park, OH: ASM International, 2002. [cit. 5.4.2022]. ISBN: 0-87170-764-0. Dostupné z: https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/06952G_Frontmatter.pdf.
56. HRUBÝ, Vojtěch, TULKA, J., KADLEC, J. *Povrchové technologie*. 1. vyd. Brno: Vojenská akademie, 1995.
57. SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS a František PROKEŠ. *Výběry z norem pro konstrukční cvičení*. Vyd. 3. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN isbn978-80-7204-636-2.
58. DAVIS, J. R. *Gear materials, properties, and manufacture*. Materials Park: ASM International, 2005. ISBN isbn978-087-1708-151.
59. Bodycote. *Nitrocementace*. [online]. 2019. [cit. 12.2.2022]. Dostupné z: <https://www.bodycote.com/cs/sluzby/tepelne-zpracovani/vytvrzovani-povrchu-s-naslednym-kalenim/nitrocementace/>.
60. Meduna vakuová kalírna. *Nitrocementace*. [online]. [cit. 5.2.2022]. Dostupné z: <https://www.kalirna.cz/cz/sluzby/25-nitrocementace.html>.
61. HERRING, Daniel H. *Carbonitriding of Fasteners*. [obrázek]. [online]. [cit. 17.5.2022]. Dostupné z: <https://digitaledition.forgemag.com/carbonitriding-of-fasteners/>.
62. PYE, David. *Practical nitriding and ferritic nitrocarburizing*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2003. ISBN: ISBN 0-87170-791-8.
-

-
63. Meduna vakuová kalírna. *Karbonitridace*. [online]. [cit. 12.4.2022]. Dostupné z: <https://www.kalirna.cz/cz/sluzby/27-karbonitridace.html>.
64. HERRING, Daniel H. *Comparing and Contrasting Carbonitriding and Nitrocarburizing*. [obrázek]. [online]. [cit. 9.5.2022]. Dostupné z: <https://www.industrialheating.com/articles/92958-comparing-and-contrasting-carbonitriding-and-nitrocarburizing>.
65. KŘÍŽ, Antonín. Tepelné zpracování kovových materiálů. Chemicko – tepelné zpracování. [online]. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. [cit. 2.4.2022]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/44902112-Chemicko-tepelne-zpracovani.html>.
66. KRAUS, Václav. *Prášková metalurgie*. [online]. [cit. 12.4.2022]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/21690672-Praskova-metalurgie-ing-v-kraus-csc-opakovani-z-nauky-o-materialu-1.html>
67. DAVIS, Joseph R. *Metals handbook*. Desk Edition. ISBN 978-0-87170-654-6.
68. CHANDLER, Harry. *Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels*. Materials Park, Oh.: ASM International, 1995, 2nd Edition. ISBN 978-0-87170-520-4.
69. Techniques Surfaces Czech Republic s.r.o. *Technologie „ARCOR V“ KARBO–NITRO–OXIDACE* (Nitridace v solné lázni s následnou oxidací). [online]. [cit. 13.4.2022]. Dostupné z: <http://www.katringplus.cz/file.php?nid=9686&oid=6469857>.
70. Direct Industry. *Automotive nitriding – ARCOR – HEF GROUPE – ISO 9001 / ISO/TS 16949 / large series*. [obrázek]. [online]. [cit. 19.3.2022]. Dostupné z: <https://www.directindustry.com/prod/hef-groupe/product-12952-2287559.html>.
71. *Přehled vlastností oceli 16MnCr5 (16MnCrS5)*. [tabulka]. [online]. [cit. 7.4.2022]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/77632/F2-DP-2018-Dudlicek-Jan-priloha-%5B15%5D%20Bolzano_16MnCr5.pdf?sequence=-1&isAllowed=y.
72. *Ocel 14 220*. [online]. [cit. 17.4.2022]. Dostupné z: https://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/database/ocel_14220.pdf.
73. JKZ Bučovice. *ČSN 14 220 / 1.7131 / 16MnCr5*. [online]. [cit. 7.4.2022]. Dostupné z: <https://www.jkz.cz/cs/produkty/konstrukcni-oceli/csn-14-220-17131-16mn-cr5/>.
74. *Přehled vlastností oceli 42CrMo4 (42CrMoS4)*. [tabulka]. [online]. [cit. 6.4.2022]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/96783/F2-BP-2021-Durkovicova-Terezia-priloha-MOP_vlastnosti_42CrMo4.pdf?sequence=-1&isAllowed=y
75. European Standards. *ČSN EN ISO 2639. Ocel – Stanovení a ověření hloubky cementace*. [online]. [cit. 7.3.2022]. Dostupné z: <https://www.technickenormy.cz/en/csn-en-iso-2639-ocel-stanoveni-a-overeni-hloubky-cementace/>.
76. ASTM Steel. *AISI 8620 Steel*. [online]. 2021. [cit. 12.3.2022]. Dostupné z: <https://www.astmsteel.com/product/aisi-8620-steel-alloy/>.
-

-
77. ASTM Steel. *AISI 4140 Steel*. [online]. 2021. [cit. 11.2.2022]. Dostupné z: <https://www.astmsteel.com/product/aisi-alloy-4140-steel-bar/>.
78. Virgamet. 42CRMO4, 1.7225, AISI 4140, 42CRMOS4, 1.7227, 42CD4, 708M40, 38HM – THOUGHT HARDENING STEEL ACCORDING TO DIN EN 10083-3. [online]. 2022. [cit. 12.2.2022]. Dostupné z: <https://virgamet.com/40hm-42crmo4-1-7225-aisi-4140-toughening-steel>.
79. Arburg.com. *Arburg Allrounder 420 C*. [obrázek]. [online]. [cit. 7.4.2022]. Dostupné z: https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/presse/2009/16179-01_420c_ge.jpg.
80. Metal AM. *Metal Binder Jetting nad FFF: Considerations when planning a debinding and sintering facility for volume production*. [obrázek]. [online]. [cit. 7.4.2022]. Dostupné z: <https://www.metal-am.com/articles/planning-a-debinding-and-sintering-facility-for-volume-3d-printing/>.
81. Beyond Discovery. *Gas Atomization*. [obrázek]. [online]. [cit. 17.4.2022]. Dostupné z: <https://www.beyonddiscovery.org/powder-metallurgy/gas-atomization.html>.
82. Goodreads. *Thomas A. Edison Quotes*. [online]. [cit. 7.5.2022]. Dostupné z: https://www.goodreads.com/author/quotes/3091287.Thomas_A_Edison.
83. Trading Economics. *Steel*. [online]. [cit. 10.5.2022]. Dostupné z: <https://tradingeconomics.com/commodity/steel>.
84. Ferrum s.r.o. *Ceny železa a oceli 2022: proč pořád rostou a kdy dojde ke kulminaci?* [online]. [cit. 5.5.2022]. Dostupné z: <https://www.ferrum-mb.cz/aktuality/ceny-zeleza-a-oceli-proc-tak-rostou-a-kdy-se-rust-zastavi/>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboły

Označení	Legenda	Jednotka
A _{c1}	Teplota eutektoidní transformace	[°C]
A _{c3}	Teplota, kdy je již všechen ferit přeměněn na austenit	[°C]

Zkratky

Označení	Legenda
MIM	Metal Injection Moulding
PIM	Powder Injection Moulding
CIM	Ceramic Injection Moulding
PEG	Polyethylenglykol
POM	Polyoxymethylen (polyacetal)
HIP	Hot Isostatic Pressure (Pressing)
CIP	Cold Isostatic Pressure (Pressing)
TIG	Tungsten Inert Gas
CHD	Case Hardness Depth
IEC	International Electrotechnical Commission
DTC	Design to Cost
ISIR	Initial Sample Inspection Report
ANSI	American National Standards Institute
UL	Underwriters Laboratories
CNC	Computer Numeric Control
2C-MIM	Double Component Metal Injection Moulding
EN	European Standards
DIN	Deutsches Institut für Normung
ČSN	Československé technické normy
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials

SEZNAM PŘÍLOH

Seznam výkresů

Tažná západka; 2022-DP-170883-01

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Příklady výrobků plastického vstřikování kovů [1].....	8
Obrázek 2 Západka tahové spony zjednodušený výkres.....	9
Obrázek 3 Schéma jistič – strádací mechanismus – tažná západka	10
Obrázek 4 Kovový prášek a pojivo pro MIM [16].....	13
Obrázek 5 Postup výroby metodou MIM [8, upraveno autorem]	14
Obrázek 6 Vstřikovací jednotka pro MIM [19, upraveno autorem]	16
Obrázek 7 Grafické znázornění debindingu [21, upraveno autorem]	17
Obrázek 8 Srovnání izostatického lisování za tepla s lisováním za studena [29, upraveno autorem]	21
Obrázek 9 Schéma zapojení HIP [26, upraveno autorem]	22
Obrázek 10 Srovnání hloubky a tvrdosti při různých způsobech chemicko-tepelného zpracování [30].....	24
Obrázek 11 Průměrná rychlost růstu cementační vrstvy v různém prostředí [38].....	26
Obrázek 12 Pec typu MONOCARB [6].....	27
Obrázek 13 Způsoby martenzitického kalení [48]	28
Obrázek 14 Vliv legujících prvků na tvrdost nitrídační vrstvy [56]	30
Obrázek 15 Vliv legujících prvků hloubku nitridové vrstvy [56].....	31
Obrázek 16 Výbrus nitrocementované vrstvy, obsah dusíku a uhlíku (v %) [61, upraveno autorem]	33
Obrázek 17 Obsahu dusíku a uhlíku v závislosti na vzdálenosti od povrchu (v %) [64, upraveno autorem].....	34
Obrázek 18 Příklady ARCORA dílců [70]	37
Obrázek 19 Model strádacího mechanismu s popisem hlavních komponent	39
Obrázek 20 Sestava uzavíracího řetězu.....	40
Obrázek 21 Vhodnost užití technologie MIM v závislosti na objemu produkce a tvaru dílce [11]	42
Obrázek 22 Schéma zaformování tažné západky pro slinování.....	43
Obrázek 23 Schéma výroby kovového prášku [81]	45
Obrázek 24 Arburg Allrounder 420 C [79].....	46
Obrázek 25 Sintrovací pec [80].....	47
Obrázek 26 Srovnání povrchové úpravy ARCORA (vlevo) a nitrocementace (vpravo).....	48
Obrázek 27 Tažná západka po 158 cyklech v jističi	51
Obrázek 28 Defekt vzorku č. 1.....	52
Obrázek 29 Defekt vzorku č. 2.....	52
Obrázek 30 Schéma testovacího mechanismu	53
Obrázek 31 Vzorky tahové západky vyrobené technologií MIM po destrukčních zkouškách	54
Obrázek 32 Úpravy západky tahové spony	56
Obrázek 33 Návrhy dílů na výrobu pomocí MIM.....	57
Obrázek 34 Srovnání úspor materiálu a energie pro odlišné technologie výroby [3].....	59

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Chemické složení, technologické a mechanické vlastnosti, ekvivalenty značení oceli ČSN 14 220 [71; 72; 73]	41
Tabulka 2 Chemické složení, technologické a mechanické vlastnosti, ekvivalenty značení oceli ČSN 15 142 [74].....	42
Tabulka 3 Chemické složení, technologické a mechanické vlastnosti, ekvivalenty značení oceli ASTM-A29-AISI 8620 [76]	44
Tabulka 4 Chemické složení, technologické a mechanické vlastnosti, ekvivalenty značení oceli ASTM-A29-AISI 4140 [77; 78]	44
Tabulka 5 Srovnání nákladů výroby dílce metodou MIM a frézování	58

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Průběh tvrdosti povrchu frézované tažné západky	41
Graf 2 Měření tvrdosti HV ₁ na 40 vzorcích	50
Graf 3 Výsledky destrukčního testování frézovaných a MIM dílců (třetí vzorkování)	54
Graf 4 Průběh tvrdosti čtvrtého vzorkování	55
Graf 5 Výsledky destrukčního testování MIM dílců (čtvrté vzorkování)	55