



**FAKULTA
ŠROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Chemické obrábění

Chemical Machining

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2018

Jakub FALTEJSEK

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD ŠROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Vedoucí práce: Ing. Pavel NOVÁK, Ph.D.

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem „Chemické obrábění“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Pavla Nováka, Ph.D., s použitím zdrojů uvedených na konci mé bakalářské práce v seznamu použitých zdrojů.

V Praze 27.7.2018

.....
Jakub Faltejsek

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce, Ing. Pavlu Novákovi, Ph.D., za cenné rady a připomínky při tvorbě této práce po odborné i formální stránce. Dále bych chtěl poděkovat mé přítelkyni, rodině, přátelům a spolužákům, zejména Martinu Urbánkovi, za soustavnou pomoc a podporu po dobu mého bakalářského studia.

ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora:	Jakub FALTEJSEK
Název BP:	Chemické obrábění
Anglický název:	Chemical Machining
Rok:	2018
Studijní program:	B2342 Teoretický základ strojího inženýrství
Ústav:	Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí BP:	Ing. Pavel NOVÁK, Ph.D.
Bibliografické údaje:	počet stran 27
	počet obrázků 19
	počet tabulek 9
Klíčová slova:	chemické obrábění, leptání, fotochemické obrábění, maska, rezist, nekonvenční metody obrábění
Keywords:	chemical machining, etching, photochemical machining, maskant, resist, non-conventional machining methods

Anotace:

Bakalářská práce vysvětluje princip technologie chemického obrábění. Popisuje postup při výrobě, rozebírá typy metod chemického obrábění, používané masky a jejich nanášení. Podrobněji se zabývá také použitými chemickými rozpouštědly. Dále pojednává o oblastech využití této technologie, diskutuje problematiku ekologie, bezpečnosti práce a srovnává využitelnost v porovnání s konvenčními technologiemi obrábění.

Abstract:

This bachelor thesis explains the principle of chemical machining. It explains necessary steps in this technology, methods of chemical machining, used maskants and their application. Thesis also covers types of commonly used chemical etchants, areas of use for this technology and also discusses ecological and safety issues of chemical machining and compares usability of chemical machining compared to conventional machining technologies.

OBSAH

1. Úvod	1
2. Základy chemických procesů obrábění	2
3. Postup chemického obrábění	2
3.1. Příprava obrobku	3
3.2. Typy masek a jejich nanášení	4
3.3. Leptání	6
3.4. Finální úpravy obrobku	7
3.5. Výsledná přesnost a kvalita povrchu	8
3.5.1. Kvalita polotovaru	8
3.5.2. Materiálová struktura	8
3.5.3. Rychlost úběru materiálu	10
3.5.4. Hloubka úběru materiálu	11
4. Rozdělení procesů chemického obrábění	13
4.1. Chemické frézování	13
4.2. Fotochemické obrábění	13
4.3. Chemicko-mechanické leštění	15
4.4. Termické odstraňování otřepů	16
5. Používaná rozpouštědla	17
6. Zhodnocení využití a využitelnosti chemického obrábění	22
6.1. Vybrané oblasti využití	22
6.2. Bezpečnost práce a problematika ekologie	24
6.2.1. Bezpečnost práce	24
6.2.2. Problematika ekologie	25
6.3. Srovnání využitelnosti s konvenčními metodami obrábění	25
7. Závěr	27
8. Seznam obrázků	28
9. Seznam tabulek	28
10. Zdroje	28

1. Úvod

Chemické obrábění se řadí mezi nekonvenční technologie obrábění a v mnoha oblastech má své nezastupitelné místo. Její rozšíření do průmyslové výroby začalo v 50. letech 20. století díky leteckému průmyslu. Jako první si tento proces nechala pod názvem „Chemical milling“ (Chemické frézování) v roce 1956 patentovat společnost North American Aviation Inc. Zjistilo se totiž, že tímto způsobem lze ubírat materiál z některých leteckých komponent, čímž dojde ke snížení jejich hmotnosti bez vzniku napětí a z toho plynoucích deformací na jejich povrchu. Historie chemického obrábění však sahá mnoho staletí nazpátek. Už ve starém Egyptě se můžeme setkat s použitím této technologie. Pomocí přírodních kyselin se již tehdy zdobily kovové šperky a jiné předměty.

I v dnešní době je tato metoda hojně využívaná a její aplikace se dávno netýkají jen šperkařství a leteckého průmyslu. Přesto je poměrně obtížné najít obsáhlejší text, zejména v českém jazyce, který by se této problematice věnoval podrobně a vysvětlil technologii chemického obrábění komplexněji, než jen stručným popisem principu.

Cílem této bakalářské práce je popsat technologii chemického obrábění a její princip, jednotlivé kroky chemického obrábění, typy metod, popsat některé důležité oblasti jejího využití a srovnat její využitelnost s konvenčními metodami obrábění. Dále budou v práci představena nejčastěji používaná chemická činidla, jejich vlastnosti a princip, na kterém funguje ubírání materiálu těmito rozpouštědly. V neposlední řadě se také budu zabývat důležitými otázkami problematiky ekologie a bezpečnosti práce.

2. Základy chemických procesů obrábění

Chemické obrábění se řadí mezi tzv. nekonvenční beztržiskové technologie obrábění. Metoda využívá řízené reakce mezi obráběným materiálem a chemickým rozpouštědlem. Před samotným procesem leptání je na obrobek nanesena maska, což je látka, která nereaguje s rozpouštědlem, a chrání tak ty části obrobku, které mají zůstat zachovány. Následně se celý obrobek ponoří do lázně s leptající kapalinou. Nejčastějšími rozpouštědly jsou kyseliny, případně jejich soli a hydroxidy. V lázni dochází díky chemické reakci k úběru materiálu v řádech setin až jednotek milimetrů. Maximální úběr je cca 10 – 13 mm. [2, 3]

Metoda se využívá především pro ztenčování velkoplošných obrobků a k obrábění tenkých obrobků v případech, kde by použití konvenčních metod obrábění bylo velice obtížné, někdy i nemožné, například při výrobě tvarově složitých reliéfů na součástkách. [3]

Využití chemických dějů k obrábění lze dělit podle nejrůznějších kritérií, obvykle lze ale v literatuře najít dělení na tyto tři základní skupiny: [1, 2, 3]

Chemické frézování

Chemické frézování, nebo také chemické leptání, funguje na principu leptání polotovaru nebo jeho částí vhodným chemickým rozpouštědlem. Rozpouštědlo reaguje s materiálem polotovaru a přeměňuje jej na oxidy, které se následně rozptylují v chemické lázni, případně se usazují na stěnách nádoby, ve které leptání probíhá. [1]

Fotochemické obrábění

Tato metoda, zvaná též chemické prostřihování, se dá považovat i za modifikaci chemického frézování, neboť se liší v zásadě jen způsobem nanášení ochranné masky. Samotný proces leptání už je identický s chemickým frézováním. [1]

Termické odstraňování otřepů

Při termickém odstraňování otřepů se nevyužívá přímo chemické reakce, ale jejího druhotného produktu – tepla při ní vzniklého. Samotná reakce probíhá v samostatném prostoru a teplo se následně odvádí do komory s obrobkem. [1, 2, 3]

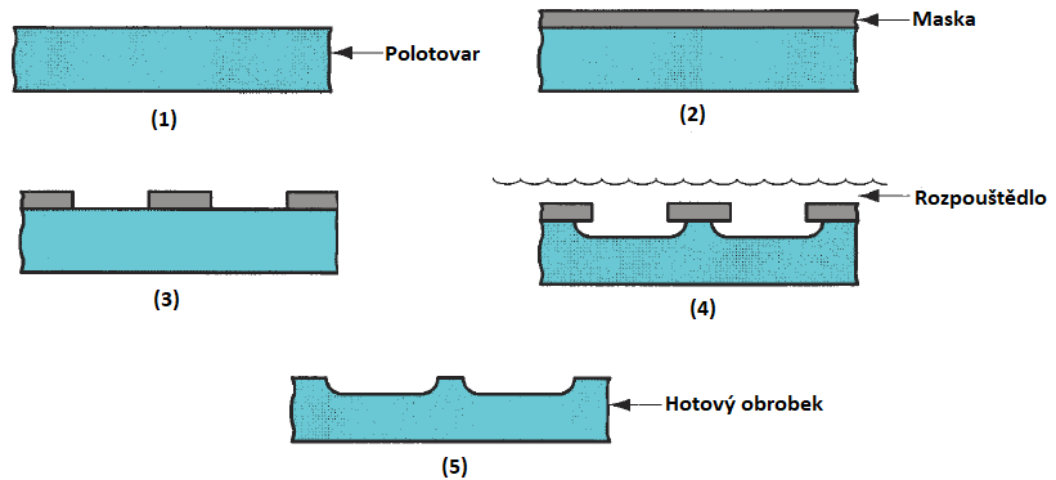
Nejedná se tedy přímo o chemické obrábění podle definice na začátku kapitoly, avšak velká část zdrojů tuto technologii pod chemické obrábění řadí, tudíž jsem se rozhodl ji také zpracovat.

Ostatní druhy obrábění, které lze v literatuře nalézt, se dají považovat za podskupiny výše zmíněných skupin. Podrobnějšímu dělení a popisu druhů chemického obrábění se budu dále věnovat v kapitole 4.

3. Postup chemického obrábění

Proces chemického obrábění lze obecně popsat jako souslednost několika kroků, která obecně platí pro chemické i fotochemické leptání. Metody se liší především v provedení jednotlivých kroků a použitých chemikáliích. [4]

Jednotlivé fáze procesu ukazuje Obrázek 1.



Obrázek 1: Jednotlivé kroky chemického obrábění. [4]

(1) Očištěný polotovar (2) Nanesení masky (3) Vytvarování masky (4) Leptání (5) Hotový obrobek.

Z tohoto procesu vybočuje termické odstraňování otřepů, jak již bylo zmíněno v kapitole 2.

3.1. Příprava obrobku

Příprava obrobku před nanesením masky a leptáním sestává z co nejdůkladnějšího očištění obrobku od prachových částic, znečištění z předchozího výrobního procesu, oxidů na povrchu materiálu, rzi a jiných nečistot. Polotovar by měl také být důkladně odmaštěn. Při špatném očištění by došlo ke zhoršení adheze mezi povrchem obrobku a nanesenou maskou. Ta by se v důsledku toho začala na některých místech odchlípnout, v horším případě i zcela odlupovat, což by vedlo k odleptávání materiálu i tam, kde odleptáván být neměl. [4, 5, 7]

Za účelem očištění obrobku se nejčastěji používá **chemické čištění**. Existuje vícero druhů chemického čištění, kdy každý z nich je vhodnější pro jeden materiál oproti jinému, je zaměřen na jednu určitou skupinu nečistot, a podobně. Nelze tedy obecně předepsat jeden druh čištění. [4]

Nejčastěji se používají následující metody, případně jejich kombinace: [4, 7]

Alkalické čištění, což je v zásadě čištění obrobku zásaditými látkami, jako například hydroxidem sodným (NaOH), hydroxidem draselným (KOH), boraxem ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), apod.

Elektrolytické čištění. Při něm se obrobek ponoří do zásadité lázně, ve které následně probíhá elektrolýza. Tím se vytvoří bubliny, které se třou o povrch obrobku a tím jej čistí.

Čištění emulzí. Povrch lze očistit také organickou látkou, například lihem, detergenty apod.

Čištění kyselinami. Jako čisticí prostředek slouží například kyselina sírová (H_2SO_4), kyselina chlorovodíková (HCl), kyselina dusičná (HNO_3), a další. Tento způsob čištění se však pro účely chemického obrábění nepoužívá, neboť kyseliny mohou narušit strukturu povrchu obrobku, což je nežádoucí jev, který má vliv na kvalitu povrchu po leptání (viz část 3.5).

Čištění ultrazvukem. Tato forma čištění je ze zmíněných nejdůkladnější, ale zároveň také nejnákladnější. V ultrazvukové pračce je obrobek ponořen do kapalného média. Vlivem vysílaných ultrazvukových vln, které vytváří v médiu tlakové vlny o vysoké energii a způsobují značný nárůst teploty v některých místech média, se narušují vazby mezi povrchem obrobku a nečistotami.

3.2. Typy masek a jejich nanášení

Po očištění obrobku se na jeho povrch nanese maska (nebo také rezist), což je povlak, který chrání místa na obrobku, která nemají být odleptána, a tím i určuje jeho výsledný tvar. Z toho logicky vyplývá výběr látek odolných proti působení polárních chemických rozpouštědel. Nejčastěji jsou využívány látky organické. Stručné rozdělení nejčastěji používaných materiálů používaných pro tvorbu masky ukazuje Tabulka 1.

Tabulka 1: Používané materiály masek pro některé materiály obrobků [5, 8]

Materiál obrobku	Materiál masky
Slitiny hliníku	polymery, neopren, butylkaučuková báze
Slitiny železa	polymery, polyvinylchlorid
Slitiny niklu	neopren
Slitiny hořčíku	polymery
Slitiny mědi	polymery
Titan	polymery
Křemík	polymery

Správně nanesená maska by měla splňovat tyto požadavky: [5, 8]

1. Odolnost proti poškození během manipulace s obrobkem.
2. Dobrá přilnavost k povrchu obrobku, aby během leptání nedošlo k jejímu odloupení.
3. Nesmí být příliš tvrdá kvůli nutnosti „vyrýt“ do ní požadovaný tvar obrobku.
4. Inertnost vůči použitému leptadlu.
5. Odolnost vůči teple vyprodukovanému působením rozpouštědla.
6. Snadné odstranění po skončení procesu leptání.

Podle způsobu nanášení lze masky obecně dělit na tři základní typy: [4, 8]

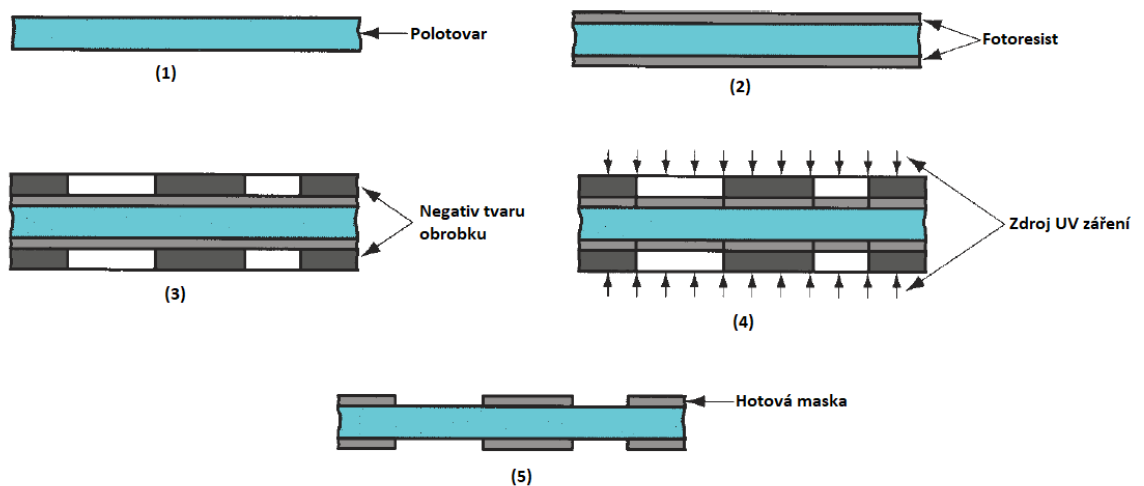
Vytvrzovací maska (cut and peel) se nanáší na celý povrch obrobku, a to buď nasprejováním, nebo ponořením obrobku do lázně. Poté, co maska zaschne a vytvrdne, jsou její části ořezány a odloupeny podle požadovaného tvaru finálního obrobku.

To se provádí pomocí nože a vodících šablon. Tento způsob ořezávání masky je ale časově náročný, a navíc při neopatrném řezání hrozí poškození povrchu obrobku. Dnes se proto stále častěji využívá ořezávání masky laserem. [1, 4, 8]

Tento způsob aplikace masky je nejlevnější a nejméně náročný na provedení. Navíc je touto metodou dosaženo největší tloušťky rezistu, z čehož plyne delší odolnost masky proti leptadlu, a díky tomu lze pomocí vytvrzovací masky provádět leptání do větší hloubky, než je tomu u ostatních způsobů (až do 10 – 12 mm). [4, 8]

Nevýhodou použití vytvrzovací masky jsou, v porovnání s ostatními metodami, relativně vysoké rozsahy tolerancí, viz Tabulka 2.

Fotografický rezist (zkráceně fotorezist), jak napovídá název, využívá k vytvoření výsledného tvaru masky technologii podobnou vyvolávání fotografií. Masky se na povrch obrobku, podobně jako při použití vytvrzovací masky, nanese lakováním, případně ponořením obrobku do lázně. Následně je maska ozářena ultrafialovým světlem skrze filtr ve tvaru negativu finálního tvaru obrobku. Světlo tak pronikne jen k odkrytým částem masky, a tím se vytvrdí. Zbytek masky je následně sloupnut a omyt ve vodní lázni. [4, 10]



Obrázek 2: Proces aplikace fotorezistu. [4]

(1) Očištěný polotovar (2) Nanesení fotorezistu (3) Umístění negativu obrobku na vrstvu rezistu (4) Působení UV záření (5) Hotová maska

Díky tomu se přebytečné části masky nemusí odřezávat, v důsledku čehož se zabrání nepřesnostem při tomto procesu, a lze tak dosáhnout až o řád nižších hodnot tolerancí. Tato metoda je ze všech uvedených nej přesnější. [4, 8]

Nelze však vytvořit resist o takové tloušťce, jako metodou vytvrzovací masky, což znamená kratší možnou dobu leptání součásti, a tím pádem i nižší hloubku odleptané vrstvy. Metoda je navíc relativně náročná na provedení, neboť světlocitlivá vrstva je velmi tenká a náchylná na poškození. Metoda se proto používá především tam, kde jsou požadovány přesnější rozměry. [4, 8]

Někdy se celý proces chemického obrábění s použitím fotorezistu nazývá souhrnně fotochemické obrábění.

Poslední technologií nanášení rezistu je **maska nanášená přes šablonu**. Maska se na povrch obrobku nanáší přes šablonu z hedvábí nebo z ocelových vláken, a požadovaného tvaru rezistu je tak dosaženo ihned po jeho aplikaci na součást. [4, 8]

Díky tomu se, stejně jako u metody fotorezistu, eliminují nepřesnosti způsobené vyřezáváním výsledného tvaru masky.

Nevýhodou tohoto způsobu je nemožnost vytvořit rezist o větších tloušťkách, z čehož opět plyne nevhodnost metody pro větší úběry materiálu. [4, 8]

Metoda masky nanášené přes šablonu je, co se výhod i nevýhod týče, kompromisem mezi výše zmíněnými technologiemi nanášení masky, viz Tabulka 2. [4, 8]

Tabulka 2: Vybrané parametry pro jednotlivé masky [4, 8, 10]

Typ masky	Dosahované tloušťky	Min. rozsah tolerancí
Vytvrzovací	až 2 mm	$\pm 0,125$ mm
Nanášená přes šablonu	až 0,125 mm	$\pm 0,076$ mm
Fotorezist	až 0,125 mm	$\pm 0,013$ mm

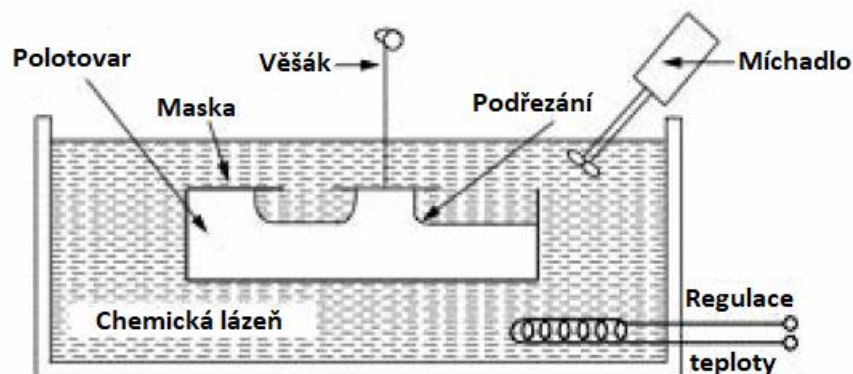
3.3. Leptání

Po vytvrzení masky a opláchnutí polotovaru ve vodě následuje samotný proces obrábění – leptání.

Pro všechny technologie chemického obrábění, vyjma termického odstraňování otřepů, platí stejný obecný postup. Obrobek se na požadovanou dobu ponoří do lázně z koncentrovaného roztoku rozpouštědla. Schéma provedení lázně ukazuje Obrázek 3.

V lázni dochází k chemické reakci mezi nechráněnými částmi obrobku a chemickým činidlem, kdy se kovové ionty materiálu polotovaru váží na leptadlo, kde nahrazují atomy vodíku. Podrobněji se problematice reakcí mezi kovy a rozpouštědly věnuji v části 4.1.

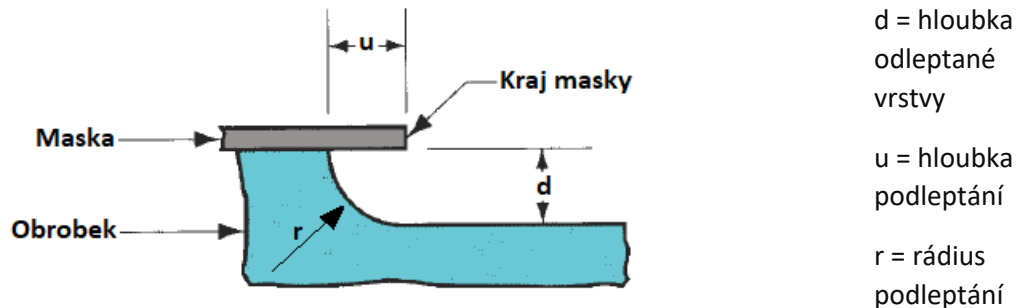
Pro rozvíření lázně je tato promíchávána. Zároveň je do lázně zaveden elektrický okruh pro regulaci teploty lázně. [4, 5, 8]



Obrázek 3: Schéma principu leptání obrobku. [5]

Na obrázku je možné vidět, že při procesu leptání dochází k tzv. **podleptání**. Při leptání se rozpouštědlo dostává i pod masku, a dochází tudíž k úběru materiálu i v nežádaných místech. [4, 11]

Zjednodušenou geometrii podleptání zobrazuje Obrázek 4.



Obrázek 4: Geometrie podleptání. [4]

Míru podleptání lze určit pomocí veličiny zvané leptací faktor, která je dána vztahem (1):

$$(1) F_e = \frac{d}{u}$$

Rozsah hodnoty $F_e = 1-2,75$. [3, 4, 8]

Jak je vidět z Obrázek 4, při podleptání dochází k tvorbě rádiusu r , a z tohoto důvodu prakticky není možné při chemickém obrábění dosáhnout ostrých hran. [1, 3]

Tento nežádoucí jev je nejčastěji způsoben příliš dlouhým vystavením obrobku leptadlu, nebo příliš homogenní strukturou rozpouštědla. Regulace podleptání je možná například použitím anizotropních rozpouštědel (tedy rozpouštědel s rozdílnou rychlostí rozpouštění v různých směrech). [3, 11]

Po vyjmutí obrobku z leptací lázně je omytím pod tekoucí vodou, případně v ultrazvukové pračce, z obrobku odstraněn zbytek leptadla, který ulpěl na obrobku a následně (nejčastěji mechanickou cestou) odstraněna maska. [2]

3.4. Finální úpravy obrobku

Po skončení leptání je nutné zbavit obrobek masky, očistit jej od oxidů leptaného materiálu, které ulpěly na povrchu obrobku, od zbytků rozpouštědla a dalších nečistot. Masku se z povrchu obrobku zpravidla odstraňuje mechanickou cestou. Většina masky je z obrobku seškrábána a odloupena, zbytky je možné odstranit například tryskáním, případně chemickou cestou. Následně je obrobek propláchnut pod proudem tekoucí vody a následuje chemické čištění povrchu, nejčastěji v ultrazvukové pračce (pro podrobnější informace o chemickém čištění viz část 3.1). [4, 5, 7].

Výsledná vysoká kvalita povrchu dosahovaná při chemickém obrábění a fakt, že se při chemickém obrábění netvoří třísky, znamenají, že obrobek už zpravidla nevyžaduje žádné další úpravy, jako například leštění. [5, 8]

3.5. Výsledná přesnost a kvalita povrchu

Rozměrová přesnost a výsledná drsnost povrchu ovlivňuje řada různých faktorů. Vliv výběru typu masky na výslednou kvalitu obrobku již byla popsána v části 3.2, nejedná se však o jedinou možnost ovlivnění této kvality. Další důležité činitele, které mají na kvalitu obrobku po leptání, jsou zejména především kvalita polotovaru, jeho materiálová struktura, rychlost úběru materiálu a také hloubka, do které je materiál ubírán.

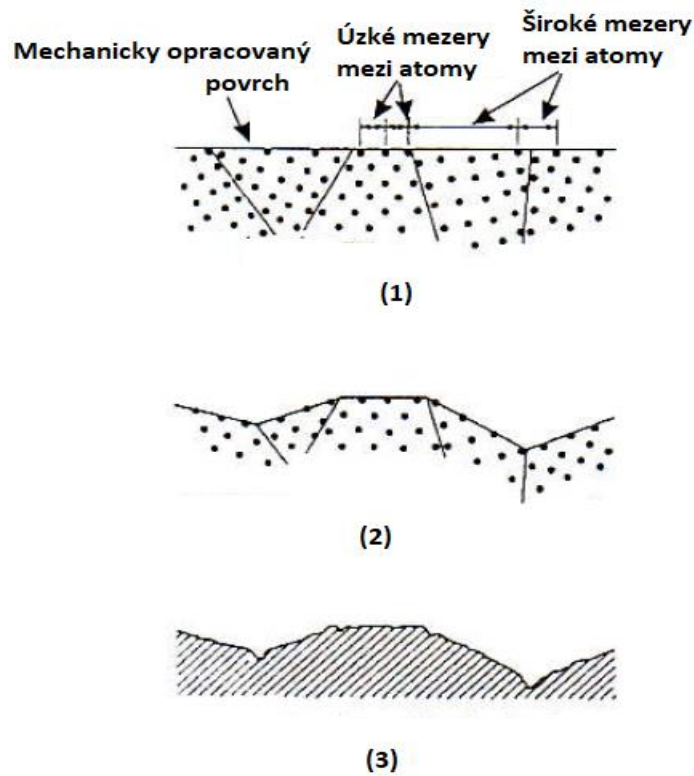
3.5.1. Kvalita polotovaru

Pro zajištění co nejrovnoměrnějšího odleptávání materiálu a menších drsností na povrchu obrobku po leptání je důležité, aby byl polotovar co nejhomogennější z makroskopického hlediska. Při úběru se projeví všechny makroskopické vady, jako například nerovný povrch, škrábance, rýhy a v neposlední řadě také drsnost povrchu polotovaru před obráběním. Tyto vady nelze při chemickém obrábění zcela odstranit, při procesu se pouze s lehkými změnami reprodukuje. [8, 12]

3.5.2. Materiálová struktura

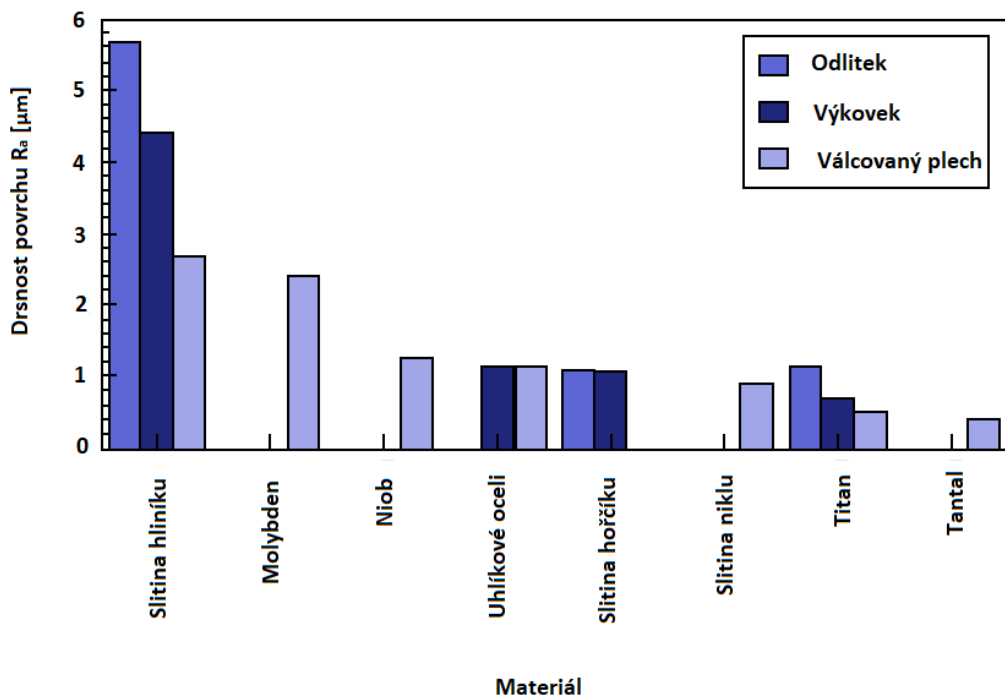
Zásadní vliv na drsnost a tolerance obrobku má také struktura materiálu. Pro dosažení kvalitního výsledku je důležité, aby atomy v povrchové vrstvě obráběného materiálu měly mezi sebou menší vzdálenosti a aby tyto vzdálenosti byly stejné. Při nedodržení těchto požadavků je úběr nehomogenní, což zapříčiní zhoršenou kvalitu obrobku po leptání. Vliv homogenity materiálu na výslednou kvalitu povrchu vysvětluje Obrázek 5. [1, 8, 12]

Rozdíl v dosažitelné drsnosti po chemickém obrábění také závisí na použitém materiálu. Obecně platí, že čím menší jsou jednotlivá zrna v povrchové vrstvě obráběného materiálu, tím nižších drsností lze dosáhnout. Dalším důležitým faktorem je také co nejpodobnější směrová orientace zrn v materiálu. Na Obrázek 6 lze vidět dosahované drsnosti pro vybrané materiály při stejném úběru.



Obrázek 5: Vliv rozložení atomů v materiálu na výslednou kvalitu povrchu. [1]

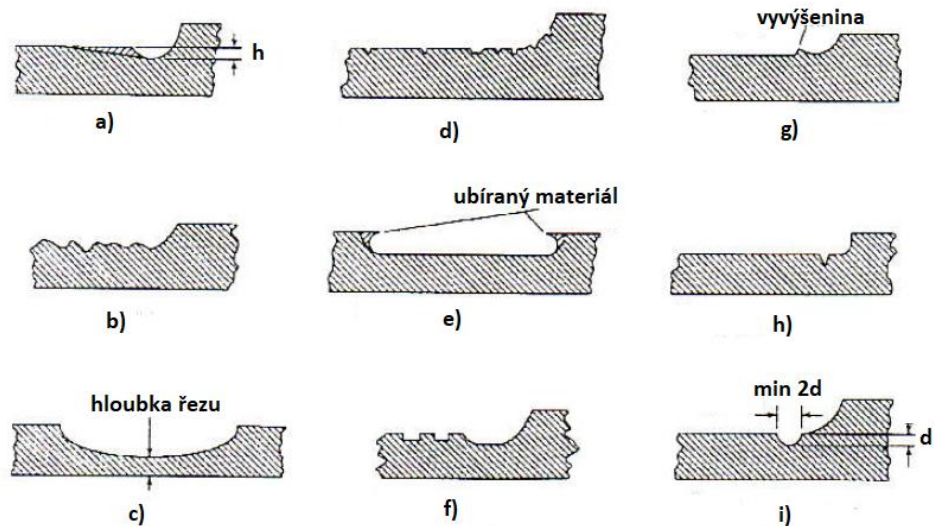
(1) Struktura před leptáním (2) Struktura po leptání (3) Výsledný povrch



Obrázek 6: Graf drsnosti vybraných materiálů po leptání do hloubky 0,25 – 0,4 mm. [8]

Z grafu vyplývá, že u výkovků, odlitků a svařenců kvůli nehomogenní struktuře materiálu dochází k úběru nerovnoměrně, což zapříčiňuje méně kvalitní povrch. Nejhladších povrchů je možné dosáhnout při leptání válcovaných plechů. [1, 8]

V důsledku nehomogenity leptaného materiálu, spolu s dalšími náhodnými vlivy při leptání, může docházet ke vzniku různých defektů a poškození povrchu, viz Obrázek 7.



Obrázek 7: Možné defekty vzniklé při leptání. [1]

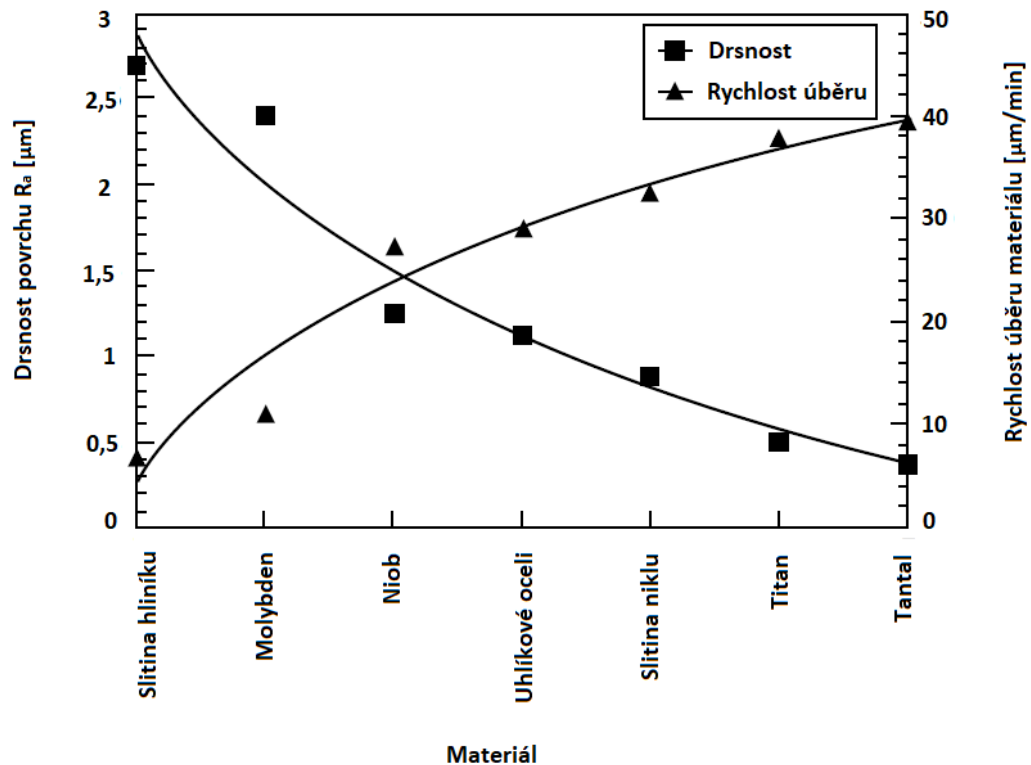
Defekty rozdělujeme následovně: [1, 13]

- Žlábků a rýh v oblasti zaoblení (h = hloubka žlábků).
- Rýhy vzniklé působením plynových bublin při leptání.
- Postupné ztenčování stěny od okraje ke středu obrobku.
- Místní prohlubeni.
- Převisy nad zaoblením způsobené podřezáním na koncích masky.
- Špatné místní odleptání materiálu.
- Vyvýšeniny.
- Vrub vzniklý jako důsledek rýhy na původním polotovaru, případně nechtěným odstraněním masky v průběhu leptání.
- Vrub vzniklý stejně jako v případě h), v tomto případě ale přípustný.

3.5.3. Rychlost úběru materiálu

Pomocí rychlosti úběru materiálu z polotovaru lze nejnázřejměji řídit dosažení požadované kvality obroku. Pro změnu rychlosti totiž stačí změnit koncentraci roztoku rozpouštědla. Čím vyšší koncentrace, tím vyšší bude rychlost úběru. [1, 5]

Jak ukazuje Obrázek 8, rychlost úběru materiálu úzce souvisí s vlastnostmi povrchové vrstvy materiálu. Ta totiž závisí také na homogenitě materiálu. [8]



Obrázek 8: Graf drsnosti povrchu a rychlosti úběru vybraných materiálů. [8]

Je vidět, že rychlost úběru je pro měkčí materiály nižší, což je provázeno vyššími hodnotami drsnosti povrchu, a tudíž i větším rozsahem tolerancí. Srovnání rozsahů tolerancí při pro dané rychlosti úběru ukazuje Tabulka 3.

Tabulka 3: Dosahované tolerance při běžných rychlostech úběru pro různé materiály [12, 13]

Materiál	Rychlost úběru [mm/min]	Tolerance [mm]
Hliník	0,025	$\pm 0,025$
Slitiny hořčíku	0,033	$\pm 0,025$
Nerezová ocel	0,130	$\pm 0,025$
Titan	0,130	$\pm 0,090$

Z Obrázek 8 a Tabulka 3 je patrné, že s rostoucí rychlostí úběru se snižuje drsnost povrchu obrobku a také rozsah tolerancí. Rychlost úběru však nelze zvyšovat donekonečna, neboť je nutné brát v potaz i nežádoucí jevy, které mohou při vyšších rychlostech nastat. Mezi ty patří například zvýšená míra podleptání, rychlejší zahřívání materiálu, masky i lázně, nižší výdrž masky, aj. [8, 12]

3.5.4. Hloubka úběru materiálu

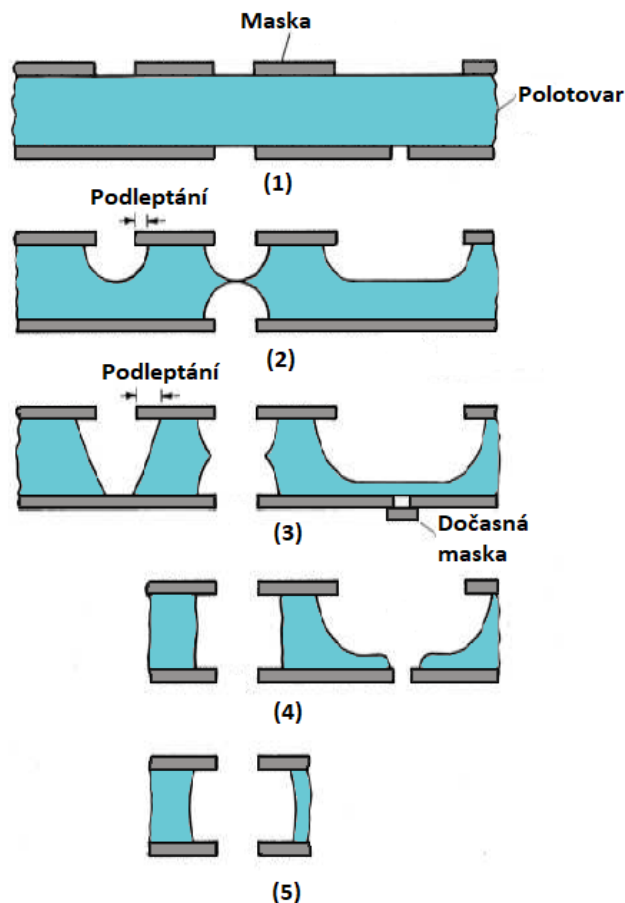
Posledním faktorem, který ovlivňuje kvalitu povrchu je hloubka úběru materiálu. Za předpokladu, že materiál má v odleptávané hloubce homogenní metalurgickou strukturu, ovlivňuje hloubka úběru materiálu pouze rozměrovou přesnost výsledného obrobku. Tato

skutečnost je dána již zmiňovaným podleptáním. Pro větší hloubku úběru materiálu je třeba, aby byl polotovár ponořen do lázně s rozpouštědlem po delší dobu. Jak lze vidět z Obrázek 9, s postupem času se pod masku dostává stále více leptadla, čímž se zvětšuje míra podleptání, z čehož vyplývá i narůstání rozměrových nepřesností. [8, 12, 13]

Změnu hodnot tolerancí se zvyšující se hloubkou úběru materiálu pro některé kovy zobrazuje Tabulka 4.

Tabulka 4: Rozsahy tolerancí pro vybrané materiály při zvyšování hloubky úběru [12, 13]

Materiál	Rozsah pole tolerance při úběru: [mm]			
	0 - 1,3 mm	1,3 - 2,5 mm	2,5 - 6,4 mm	6,4 - 13 mm
Slitiny hliníku	± 0,025	± 0,040	± 0,050	± 0,075
Oceli	± 0,050	± 0,075	± 0,100	± 0,150
Titan	± 0,075	± 0,100	± 0,150	± 0,250
Obecně	± 0,050	± 0,075	± 0,100	± 0,150



Obrázek 9: Změna profilu podleptání s narůstajícím časem působení rozpouštědla. [12]

Fáze 4) a 5) představují situaci po více než 8 hodinách leptání, kdy se z materiálu začne odlupovat maska.

4. Rozdělení procesů chemického obrábění

Jak jsem již uvedl v kapitole 2, chemické obrábění lze obecně dělit na tři hlavní skupiny, a to chemické frézování, fotochemické obrábění a termické odstraňování otřepů. V této podkapitole popisuji tyto skupiny podrobněji a uvádím zde i některé konkrétní příklady jejich využití. Dále zde rozebírám proces chemicko-mechanického leštění, neboť i to je někdy řazeno pod metody chemického obrábění.

4.1. Chemické frézování

Chemické frézování je nejstarším procesem chemického obrábění. S jeho využitím ve větším měřítku se začalo během druhé světové války, a to v leteckém průmyslu. Pomocí leptání plechů docházelo k jejich ztenčování, a tudíž i ke snížení celkové hmotnosti letadel. [4, 12]

Pro tento proces je typické využití vytvrzovací masky a silných rozpouštědel. Používá se tedy zejména tam, kde dochází k většímu úběru materiálu na velkých plochách, a není požadovaná velká přesnost obrobku. [3, 4, 12]

Nejčastější aplikace chemického frézování je v leteckém průmyslu. Jak již bylo řečeno, touto metodou se především ztenčují plechy trupů a křídel letadel. Při konvenčních způsobech frézování totiž dochází vlivem kontaktu obrobku s nástrojem ke vzniku napětí, což vede ke zhoršení mechanických vlastností materiálu, především razantnímu snížení jeho životnosti, což je, vzhledem k tloušťce plechu, nežádoucí. Navíc při ztenčování plechu s tvarově složitými reliéfy by použití konvenčních metod obrábění bylo finančně příliš nákladné. Tyto problémy jsou díky využití chemického obrábění eliminovány. [4, 5, 8]

4.2. Fotochemické obrábění

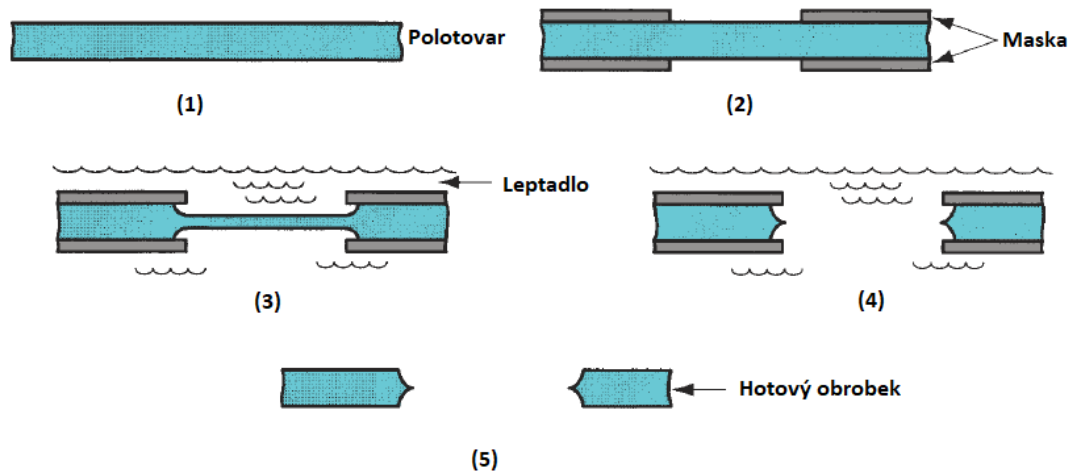
Fotochemické obrábění je v podstatě modifikací chemického frézování. Od toho se tato metoda odlišuje ve způsobu nanášení masky. Ta je, jak již název procedury napovídá, aplikována metodou fotorezisty. Používána jsou také slabší rozpouštědla, neboť příliš silné koncentráty leptadel by mohly poškodit velmi tenkou vrstvu masky, v důsledku čehož by byl materiál ubírán na místech, kde k úběru nemá docházet. [4, 8, 10]

Tato technologie se uplatňuje především pro tvorbu tvarově složitých reliéfů při vysoké požadované přesnosti. Využití je také limitováno tloušťkou plechu, jejíž maximální doporučená hodnota je 1,5 mm. Při vyšších hodnotách tloušťky již není možné zajistit dostatečně nízký rozsah rozměrových tolerancí. [8, 10]

Konkrétním příkladem aplikace fotochemického obrábění je např. **Chemické rytí (nebo také Chemické gravírování)**. Využívá se pro vyrývání písmenných a číselných reliéfů, popřípadě také grafických ornamentů, na tenké plechy, kde by konvenční metody byly neúnosně nákladné, dokonce zcela nepoužitelné. [3, 4, 8]

Proces rytí je podobný ostatním způsobům chemického obrábění, avšak zpravidla je na obrobená místa ještě před odstraněním masky nanášen lak (nebo jiná povrchová vrstva), aby odleptaná místa vynikla, případně byla po obrábění chráněna. [4, 8]

Dalším způsobem použití fotochemického obrábění je **Chemické prostřihování**. Schématické znázornění procesu ukazuje Obrázek 10.



Obrázek 10: Fáze chemického prostřihování. [4]

(1) Polotovary (2) Polotovary s nanesenou maskou (3) Leptání (4) Dokončení leptání (5) Hotový obrobek.

Maska se na obrobek nanáší souměrně z obou stran a leptadlo působí tak dlouho, dokud se požadované části obrobku zcela nerozpustí.

Tato metoda se využívá pro řezání velmi tenkých plechů (i 0,25 mm) a velmi složitých tvarových reliéfů. Použití klasických technologií tváření by totiž působením tvářecích sil došlo ke zničení plechu, navíc zde opět hraje zásadní roli cena nástrojů použitelných pro takto jemné tvářecí procesy. [4, 10, 12]

Příklady součástí vyrobených chemickým prostřihováním lze vidět na obrázku 3.6.

Jako při chemickém gravírování, i zde je limitujícím faktorem především tloušťka obráběného materiálu. U plechů nad tloušťku 0,75 mm nelze garantovat dosažení dostatečné přesnosti rozměrů. [4]

Fotochemické obrábění lze také suplovat klasickým chemickým frézováním s použitím masky nanášené přes šablonu. Tato metoda je obecně levnější, avšak za cenu vyššího rozsahu tolerancí. Vzhledem k pracovním rozměrům obrobků (i setiny milimetrů) nelze kvůli příliš nízké přesnosti nahradit fotochemické obrábění leptáním s použitím vytvrzovací masky (pro srovnání dosahovaných rozsahů tolerancí viz Tabulka 3). [4, 8, 12]

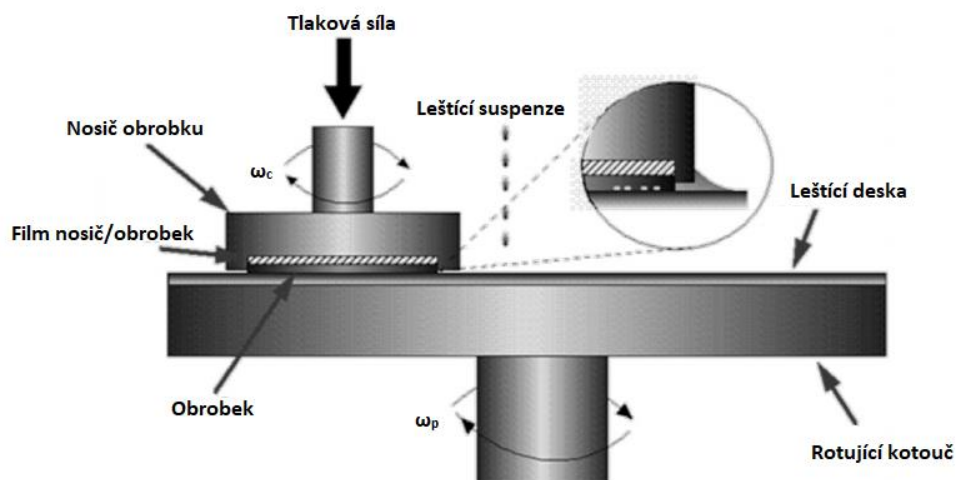
Z výše uvedeného lze tedy obecně tvrdit, že fotochemické obrábění se používá na vytváření složitých reliéfů do tenkých plechů a obecně v oblastech, kde má přesnost a kvalita součástí přednost před pracností a cenou výroby, jako například v elektrotechnice, zdravotnictví, letectví, aj. [2, 3, 8]

4.3. Chemicko-mechanické leštění

Proces chemicko-mechanického leštění lze považovat za hybridní proces chemického leptání a abrazivního leštění. Této kombinace se využívá z toho důvodu, že samotné abrazivní leštění způsobuje poškození obrobku, což zejména u tenkých desek tištěných spojů, k jejichž úpravě se chemicko-mechanické leštění využívá. Nevýhoda chemického leštění naproti tomu spočívá v nerovnoměrném úběru materiálu na ploše obrobku, což způsobuje zhoršení kvality povrchu. [16, 17]

Tyto problémy jsou eliminovány díky užití kombinace těchto dvou technologií. Obrobek je položen na rotující kotouč, na kterém je nanesena směs leptadla a jemných pevných částic, někdy též označovaných jako kal. Rozpouštědlo naleptává povrch obrobku, čímž usnadňuje odstraňování materiálu a předchází jeho poškození, které by mohlo být způsobeno při leštění mechanickou cestou. Kotouč rotuje jinou rychlostí než obrobek, v důsledku čehož dochází ke tření mezi odleptávanou vrstvou materiálu a kalem v suspenzi. Díky abrazivní části obrábění je dosaženo rovnoměrnějšího úběru a tím pádem i hladšího povrchu. [16, 17]

Na Obrázek 11 je vidět schéma stroje na chemicko-mechanické leštění. Na nosič obrobku s filmem proti tření mezi nosičem a obrobkem, který rotuje rychlostí ω_k je upevněn díl (nejčastěji jsou to desky plošných spojů) obráběnou stranou dolu. Nosič se postupně přibližuje ke stolu – kotouči rotujícímu rychlostí ω_p s leštící deskou. Na tu je rovnoměrně nanášena leštící suspenze. Jak je vidět na detailu Obrázek 11, obrobek se ponoří do vrstvičky suspenze až k leštící desce. Kalové částičky v suspenzi narážejí do povrchu obrobku, čímž způsobují odchlípnutí kousků jeho materiálu, které jsou následně odleptány chemickým rozpouštědlem. [17, 19]



Obrázek 11: Schéma stroje pro chemicko-mechanické leštění [18]

Nosič navíc obrobek na desku tlačí. Tento tlak způsobuje větší tření, a tím pádem i rychlejší úběr vyvýšených míst na obrobku oproti zahloubeninám, díky čemuž je dosaženo velmi hladkého a rovného povrchu dílu. [17, 19]

$$(2) \quad r = k_p \cdot P \cdot v_{rel}$$

Rovnice (2) se nazývá **Prestonův vztah** a určuje rychlost úběru materiálu v závislosti na faktorech tuto ovlivňujících. Jednotlivé členy v rovnici představují: [16, 17]

r = rychlost úběru

k_p = Prestonova konstanta (zohledňuje vlastnosti chemické části leštění, materiálové složení obrobku, leštidla a korelace mezi nimi)

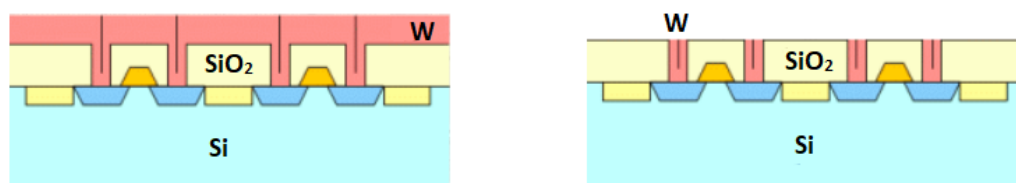
P = tlak vyvíjený přitlačováním obrobku k lešticí desce

v_{rel} = poměr rychlostí kotouče v_p a nosiče v_c

V ideálním případě by měla být obráběná plocha rovnoběžná s horní podstavou lešticí desky. Deska by také měla být inertní vůči použité suspenzi. Ve skutečnosti deska nemusí být zcela rovná, případně může být obrobek v nosiči mírně nakloněn. Navíc deska nikdy není stoprocentně inertní ani chemicky vůči leštidlu, ani mechanicky vůči kalovým částicím. Během leštění tak může docházet k jejímu poškození, což může mít za následek nerovnoměrný úběr materiálu nebo úběr materiálu na místech, kde to není žádáno. Je proto důležité vybírat materiál desky, který pro konkrétní případ leštění déle vydrží a desku pravidelně měnit. [19]

Jako chemická složka suspenze se používají stejné druhy rozpouštědel jako pro chemické obrábění, ale slabší (více o rozpouštědlech v kapitole 5). Abrasivní složku tvoří zrnka oxidů kovů, například oxidu hlinitého, či oxidu křemičitého (Al_2O_3 , SiO_2). [19]

Chemicko-mechanické leštění se využívá především pro leštění měděných integrovaných obvodů v deskách plošných spojů, neboť pro jejich správnou funkci je nutné zajistit co nejhladší povrch. Navíc je z plošných spojů třeba odstranit další látky, které na nich ulpěly při předchozích výrobních postupech. [17]



Obrázek 12: Odstranění přebytečného wolframu z polovodiče [19]

Příkladem použití je odstranění přebytečného wolframu z povrchu polovodiče. Napařováním se wolfram dostane do předem připravených žlábků v desce polovodiče, ale i na jeho povrch, a je tedy nutné jej odstranit. [19]

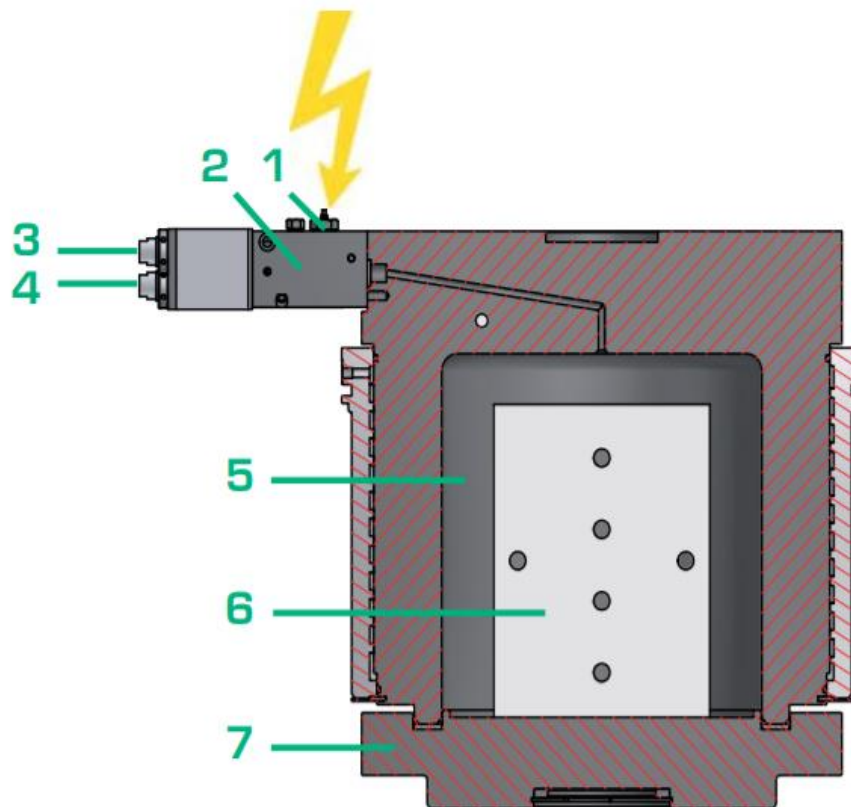
4.4. Termické odstraňování otřepů

Tato chemicko-tepelná metoda obrábění se využívá k odstranění otřepů, ostřin a výronků z povrchu obrobku. Jde o relativně časově a postupově nenáročný proces, který

tak lze snadno automatizovat, navíc se dají takto zbavit otřepů i tvarově složité díly a také dutiny na dostatečně hmotných dílech. [1, 2, 3]

Využívá se tepla vzniklého chemickou reakcí hoření kyslíku s jiným vysoce hořlavým plynným médiem. Schéma odjehlovacího stroje je vidět na Obrázek 13. Jako druhé médium se nejčastěji používá zemní plyn, methan, případně vodík. Plyn je vháněn dávkovači do směšovací komory. Zde proběhne zapálení směsi svíčkou. Celý proces probíhá při tlaku cca 400 Bar a teplota v komoře dosáhne hodnot 2500 – 3000 °C. Doba trvání procesu je kolem 20 milisekund. Působením intenzivního žáru a tlaku po krátkou dobu se v poměru k celkovému obrobku velmi malé otřepy odpaří, ty větší se spálí na prášek. Obrobek je následně třeba umýt, neboť prach z hmotnějších otřepů se usazuje na povrchu dílce. [2, 15]

Před samotným vystavením dílu působení tepla je nutné jej očistit od větších volných částí, jako např. špony. Ty se totiž pouze roztaví, a hrozí jejich „rozstřík“ po povrchu obrobku a tím vzniklé kapičky se následně k obrobku připečou. [15]



Obrázek 13: Schéma odjehlovacího stroje. [15]

- (1) zapalovací svíčka (2) směšovací komora (3) dávkovač plynného media (4) dávkovač kyslíku
 (5) odjehlovací komora (6) obrobek (7) otevírání komory

5. Používaná rozpouštědla

Rozpouštědlo (nebo též leptadlo, činidlo) v podstatě zastává při chemickém obrábění roli nástroje. Jeho výběr závisí na materiálu obrobku, požadované hloubce a rychlosti úběru, a samozřejmě také na požadované výsledné rozměrové přesnosti a kvalitě povrchu

dílu. Leptadlo je navíc potřeba vybrat v souladu s použitým materiálem masky tak, aby vůči sobě byly maska i činidlo chemicky inertní. [4, 10]

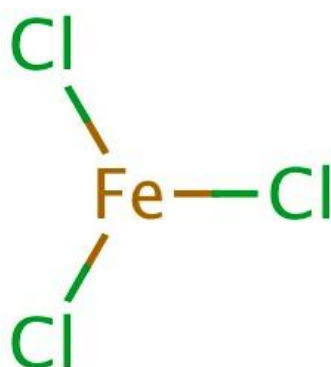
Tabulka 5: Rozpouštědla používaná pro chemické obrábění [4, 5, 8]

Materiál	Rozpouštědla	Rychlost úběru [mm/min]	Leptací faktor F_e
Hliník a jeho slitiny	FeCl ₃ NaOH	0,013-0,025 0,02-0,03	1,5-2,0
Železo a jeho slitiny	HCl:HNO ₃ FeCl ₃	0,025 0,025	2,0
Slitiny hořčíku	HNO ₃	0,038 1,0-2,0	1,0
Měď	FeCl ₃	2,0	2,5-3,0
Titan a jeho slitiny	HF HF:HNO ₃	0,025 0,025	1,0
Křemík	HNO ₃ :HF:H ₂ O	velmi malá	NA

Jak je vidět v tabulce, jako leptací činidla se nejčastěji využívají silné kyseliny, jejich soli a směsi, v případě hliníku a jeho slitin také silně zásaditý hydroxid sodný (NaOH). Pro leptání jednotlivých materiálů se využívá různých mechanismů založených na chemických vlastnostech rozpouštědel. Nyní se zaměříme na nejpoužívanější rozpouštědla, a sice chlorid železitý, kyselinu dusičnou a hydroxid sodný, podrobněji. Pro proces leptání se nejčastěji využívají 40% roztoky činidel. [20]

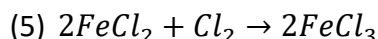
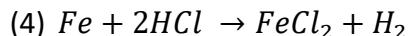
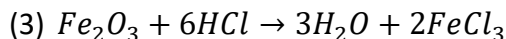
Chlorid železitý

Chlorid železitý (FeCl₃) je v pevném skupenství tmavě hnědá, téměř černá, krystalická látka bez chuti a zápachu. V přírodě se vyskytuje spíše ve formě polykrystalů Fe₂Cl₆. Je velmi dobře rozpustný ve vodě, se kterou tvoří tmavě hnědou velmi kyselou tekutinu slabě kyselého zápachu. Jedná se o relativně nestabilní látku. Chlorid železitý má tendenci se redukovat na stabilnější chlorid železnatý (FeCl₂) a působí tedy jako velmi silné oxidační činidlo. [20, 21]



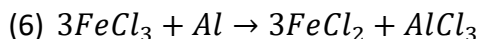
Obrázek 14: Molekulární struktura chloridu železitého [23]

Roztok chloridu železitého se vyrábí různými způsoby. Nejčastěji buď rozpouštěním oxidu železitého (Fe_2O_3) v kyselině chlorovodíkové (HCl) podle rovnice (3), nebo ve dvou fázích, a to rozpuštěním železa v kyselině chlorovodíkové podle rovnice (4), a následně oxidací chloridu železnatého ($FeCl_2$) chlorem podle rovnice (5). Nejprve je podle rovnice rozpouštěno železo v roztoku kyseliny chlorovodíkové (HCl).



Nejčastěji je ale získáván až jako druhotný produkt při chlorování železné rudy, případně při moření ocelí kyselinou chlorovodíkovou (i tento mechanismus popisuje rovnice (3)). Obvyklá koncentrace roztoku chloridu železitého je 40%.

Díky jeho relativně levné výrobě a experimenty prokázaným dobrým parametrům pro obrábění se jedná o nejrozšířenější leptací činidlo používané v průmyslu pro chemické obrábění. Především je vhodné vyzdvihnout fakt, že při jeho reakci s kovem se netvoří vodík, který je problémový, neboť ten se při leptání může dostávat do mezer a žlabů v obrobku a způsobovat nerovnoměrné odleptávání materiálu. Při chemickém obrábění se využívá silně oxidačních vlastností chloridu. V praxi to znamená, že $FeCl_3$ má snahu sám sebe redukovat na chlorid železnatý $FeCl_2$, tzn. přijímat elektrony pro dosažení stabilního stavu. Potřebné elektrony odebírá právě obráběnému kovu. Jako příklad můžeme uvést reakci chloridu železitého s hliníkem.



Z rovnice (6) je vidět, že atomy železa změni svou konfiguraci z Fe^{III} na Fe^{II} – přijmou po jednom elektronu. Naproti tomu hliník se změní z Al^0 na Al^{III} – ztrácí tři elektrony, tedy se oxiduje. Je také patrné, že vzhledem k poměru 3:1 v reakci ve prospěch chloridu železitého jsou potřeba roztoky o vyšších koncentracích, obzvláště pro větší úběr materiálu. [20, 21, 22]

Kromě chemického obrábění se chlorid železitý používá také například na čištění odpadních vod jako srážecí činidlo nebo pro extrahování mědi z měděné rudy. [20]

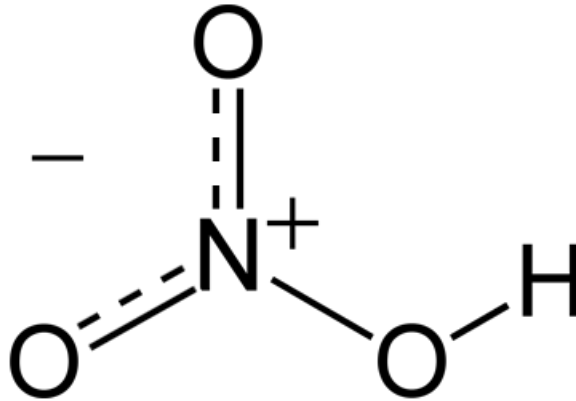
Tabulka 6: Vybrané vlastnosti roztoku chloridu železitého [20]

FeCl ₃	
Teplota varu	280 °C
pH	2
Princip leptání	redoxní reakce (látka je oxidační činidlo)
Mísitelnost s vodou	až 743 g/kg

Kyselina dusičná

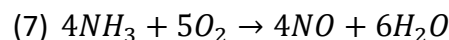
Kyselina dusičná (HNO_3) je velmi silná kyselina, která se v přírodě vyskytuje pouze v podobě dusičnanových solí (skupina NO_3^-). Čistá kyselina je bezbarvá kapalina, případně lehce zbarvená do žluta. Rozpouští především méně ušlechtilé kovy, na které působí jako

agresivní oxidační činidlo. Podobně jako chlorid železitý je kyselina dusičná nestabilní látka, neboť dusík má snahu se redukovat pro dosažení elektronové konfigurace ušlechtilých kovů. [20, 22]

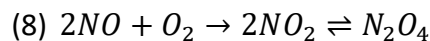


Obrázek 15: Molekulární struktura kyseliny dusičné [23]

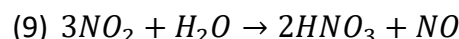
Průmyslově je kyselina dusičná získávána pomocí takzvaného Ostwaldova procesu, který se skládá ze tří kroků. V první fázi dochází ke katalytické oxidaci amoniaku (NH_3) pomocí hoření s kyslíkem (O_2) za vzniku oxidu dusnatého (NO) a vody podle rovnice (7).



Oxid dusnatý se ve druhé fázi dále oxiduje až do vzniku oxidu dusičitého (NO_2), viz (8).



Třetím krokem je absorpce oxidu dusičitého ve vodě. Ten z vody přebírá vodík a jako produkty reakce podle rovnice vznikají kyselina dusičná a oxid dusnatý.

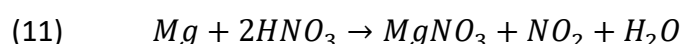


Oxid dusnatý z poslední reakce lze opět recyklovat a využít k opětovné výrobě kyseliny dusičné. [20, 24]

Úběr materiálu kyselinou dusičnou probíhá jako redoxní reakce. Příklad reakce – leptání hořčíku, ukazuje rovnice (10).



Při reakci vzniká jako jeden z produktů vodík, který negativně ovlivňuje výslednou kvalitu obrobku. V průmyslu se používají (pokud to podmínky dovolí) roztoky kyseliny dusičné o vyšší koncentraci, neboť při jejím použití se více projeví její silně oxidační vlastnosti, a tudíž při reakci vodík nevzniká, viz (11). [20, 24]



Některé více elektronegativní kovy není kyselina dusičná schopná rozpouštět. V takovém případě se používá roztok kyseliny dusičné s kyselinou chlorovodíkovou v poměru 3:1. [20]

Mezi další využití HNO_3 patří například výroba raketového paliva, výbušnin atd. [20]

Tabulka 7: Vybrané vlastnosti kyseliny dusičné [20, 24]

HNO ₃	
Teplota varu	cca 90 °C (podle koncentrace)
pH	3
Princip leptání	redoxní reakce (oxidační činidlo)
Mísitelnost s vodou	neomezená

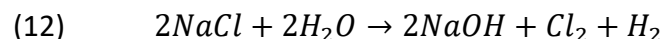
Hydroxid sodný

Hydroxid sodný (NaOH) je velmi silně zásaditá anorganická sloučenina. V přírodě se samostatně nevyskytuje, je však velmi snadné jej získat z jiných sloučenin. Látka je velmi reaktivní. Snadno se rozpouští ve vodě a reaguje i se vzdušným oxidem uhličitým, a je tak poměrně obtížné přesně určit její vlastnosti. Využívá se především jako leptací činidlo pro úběr hliníku, neboť s ocelí a ušlechtilými kovy reaguje jen velmi málo. [20, 24]

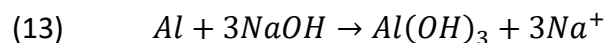

Obrázek 16: Molekulární struktura hydroxidu sodného. [23]

Absence grafického znázornění vazby symbolizuje silnou polaritu vazby mezi ionty.

Nejrozšířenějším způsobem přípravy hydroxidu sodného je jeho získávání elektrolýzou chloridu sodného (NaCl) ve vodě v poměru 1,14:1 ve prospěch chloridu. Mechanismus procesu ukazuje reakce (12).



Proces leptání materiálu hydroxidem sodným využívá silně polární vazby mezi ionty Na⁺ a OH⁻ a probíhá podle rovnice (13).



Tato vazba je velmi nestabilní, sodík má totiž tendenci se štěpit od skupiny OH⁻ v podobě kationtů Na⁺, neboť tím získá elektronovou konfiguraci neonu, čímž dosáhne stabilního stavu. Sodík následně nahradí elektronegativnější hliník. Produkty reakce jsou hydroxid hlinitý (Al(OH)₃) a sodné kationty Na⁺. [20, 24]

Tabulka 8: Vybrané vlastnosti hydroxidu sodného [20, 24]

NaOH	
Teplota varu	1390 °C
pH	13
Princip leptání	látka je polární rozpouštědlo
Mísitelnost s vodou	neomezená

6. Zhodnocení využití a využitelnosti chemického obrábění

6.1. Vybrané oblasti využití

Chemické obrábění je i v dnešní době důležitá a v některých oblastech nenahraditelná technologie výroby. Uplatní se zejména tam, kde by použití konvenčních technologií obrábění bylo velmi nákladné, případně zcela nepoužitelné. Využití technologie úběru materiálu chemickou reakcí se datuje už cca od roku 2500 př.n.l.

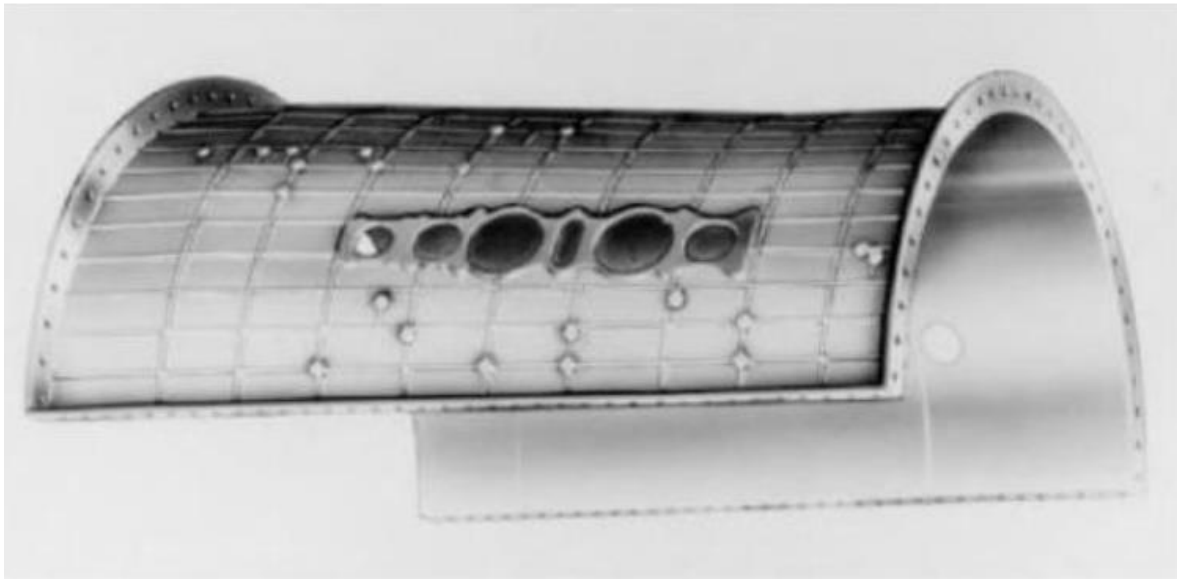


Obrázek 17: Příklad využití chemického obrábění - ocelové brnění (rok 1600, Milano) [25]

Leptání se využívalo především pro **dekorativní účely**. První využívání chemického obrábění je známo už ze starého Egypta, kde se tímto způsobem vyráběly šperky z mědi leptáním kyselinou citronovou. Dalšími příklady využití jsou například zdobení zbraní, brnění a jiných předmětů ornamenty a jinými tvarově složitými reliéfy. Tento způsob využití chemického leptání je velmi rozšířený pro tvorbu ozdobných prvků velmi složitých tvarů a ozdobu tenkých předmětů, jako jsou prstýnky a jiné šperky, chemické gravírování se také využívá pro označování výrobků, tvorbu informačních tabulí, ozdobných vizitek atd. V současnosti se pro tyto účely využívá fotochemického obrábění, případně klasického chemického leptání za použití masky nanášené přes šablonu. [2, 5, 21]

Další oblastí, kde lze s chemickým obráběním setkat, je **letecký průmysl**. Leptáním se ztenčují křídla, plechové kryty a nosné prvky konstrukcí letadel, čímž dochází ke snižování jejich celkové hmotnosti bez narušení mechanických vlastností materiálu. Navíc zde lze

s výhodou využít faktu, že při chemickém obrábění nezáleží na ploše obrobku, neboť ponořením do lázně se obrábí celá plocha, a strojní čas tak záleží pouze na hloubce úběru. Metoda je navíc levná na provedení, neboť požadovaná přesnost velkoplošných dílů umožňuje použití chemického leptání s klasickou vytvrzovací maskou. Tyto přednosti chemického obrábění objevil po druhé světové válce výrobce letadel a leteckých komponent North American Aviation Inc., který takto začal v roce 1953 odlehčovat hliníkové části raket. Takto se zasloužil o rozšíření využití chemického obrábění v průmyslovém měřítku. Pro leptání převážně titanových dílů se využívá směsi kyseliny fluorovodíkové a kyseliny dusičné (HF:HNO₃). Kyselina fluorovodíková odstraní z povrchu oxidy titanu, který je následně leptán kyselinou dusičnou. [5, 26, 27]

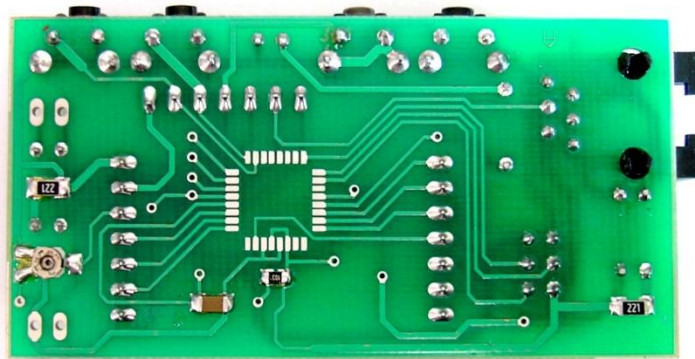


Obrázek 18: Příklad aplikace chemického obrábění. [27]

Obrobený kryt kompresoru leteckého motoru

V současné době se leptání uplatňuje zejména v **elektrotechnice**. Elektronické součástky, plošné spoje, integrované obvody a mikro mechanicko-elektronické systémy dnes dosahují tak malých rozměrů (v řádech mikronů), že konvenční metody obrábění jsou zde prakticky nepoužitelné, neboť jsou limitovány především velikostí nástroje. Chemického obrábění se využívá například pro výrobu vodičů mezi aktivními členy integrovaných obvodů, jejich chemické leštění a odstraňování nežádoucích látek (např. oxidů) z těchto vodičů. Výroba plošných spojů je díky své nízké ceně a běžně dostupným materiálům spojů i leptadel velice populární i v domácích podmínkách. Vzhledem k malým rozměrům a vysokým požadovaným přesnostem se využívá téměř výhradně fotochemické obrábění, v domácím prostředí případně leptání s aplikací masky nanášené přes šablonu. Pro leptání mědi se nejčastěji používá chlorid železitý (FeCl₃). Reakce probíhá podle rovnice (14). [16, 20]





Obrázek 19: Příklad použití fotochemického obrábění-deska plošného spoje. [14]

6.2. Bezpečnost práce a problematika ekologie

Ekologie a bezpečnost práce při chemickém obrábění jsou velmi důležitá témata. K leptání jsou využívány silné žíraviny, a je proto důležité dbát na jejich bezpečné skladování, manipulaci, a samozřejmě také na bezpečnost na pracovišti. S ekologií procesu souvisí zejména likvidace rozpouštědel a vedlejších produktů a také jejich skladování. Zvláště dnes, v době stále přísnějších regulací a nařízení na ochranu životního prostředí, je nutné v průmyslové výrobě věnovat tomuto tématu zvýšenou pozornost.

O ekologických a bezpečnostních aspektech pojednávají bezpečnostní listy vytvořené pro každou prodávanou chemickou látku.

6.2.1. Bezpečnost práce

Jak bylo řečeno v úvodu kapitoly, všechna nejpoužívanější leptadla jsou silné žíraviny. Pracovník v provozu tedy musí být vyškolený pro zacházení a manipulaci s nebezpečnými látkami. Nutnou kvalifikaci pracovníka upravují §44a a §44b zákona č. 258/2000 Sb. o ochraně veřejného zdraví, který zároveň upravuje mimo jiné i povinnosti týkající se zajištění bezpečnosti pracoviště zaměstnavatelem a pravidla pro nakládání s chemickými látkami. [28]

Některé základní poučky pro nakládání s danými látkami a ochranu před jejich nežádoucím působením, stejně jako jejich likvidaci v případě úniku či požáru, jsou shrnuty v již zmiňovaných bezpečnostních listech. Důležité jsou pro ochranu pracovníků především věty o nebezpečnosti chemických látek, které popisují základní rizika při styku člověka s popisovanou chemickou látkou. Jako příklad lze zmínit větu H314, která udává, že způsobuje těžké poleptání kůže a poškození očí (např. kyselina dusičná, chlorovodíková, fluorovodíková nebo hydroxid sodný). Pro preventivní ochranu před působením těchto látek je důležité dbát také části s Pokyny pro bezpečné zacházení, například pokyn P280, který nařizuje používat ochranný oblek, rukavice a brýle. Pro bezpečnost práce je také důležité zajistit dobré odvětrávání místnosti s leptacími lázněmi kvůli úniku toxických plynů a par a čistotu pracovního prostředí. [29]

6.2.2. Problematika ekologie

V dnešní době je velkým trendem snižovat dopady působení člověka na přírodu. Tento trend logicky zasáhl i chemické obrábění, neboť leptadla při něm používaná mají na své okolí neblahý vliv, a je tedy nutné zavádět opatření proti vzniku škod způsobených výrobou chemických látek, a v případě průmyslového chemického obrábění zejména při jejich používání, skladování a likvidaci.

Povinnosti firem nakládajících s chemickými látkami upravuje celá řada zákonů a nařízení, nejdůležitější z nich je Zákon č. 350/2011 Sb., který upravuje vedení povinné agendy o všech chemických látkách, se kterými daný subjekt pracuje, opatření pro bezpečné skladování látek a pravidla o ochraně životního prostředí při práci s nebezpečnými látkami. [28]

I o ekologických rizicích se dají základní informace najít v materiálových listech. Především je důležité zabránit úniku leptadel používaných při obrábění do půdy, veřejné kanalizace, ani do blízkosti vodních zdrojů. S látkami je nutno zacházet jako s nebezpečným odpadem a při jejich úniku, pokud možno, zabránit šíření. [29]

Nařízení a norem ohledně zpracování a likvidace nebezpečných látek je celá řada a je složité všechny splnit. Recyklací použitých látek (většinu leptadel s příměsí obráběného materiálu je možno recyklovat pro další použití), jejich likvidací, odborným poradenstvím ohledně skladování látek a tvorbou agendy o nich se dnes proto zabývají specializované firmy.

6.3. Srovnání využitelnosti s konvenčními metodami obrábění

O tom, proč je v některých oblastech upřednostňováno před konvenčním obráběním, a jaké jsou naproti tomu jeho nevýhody, je možné si udělat základní představu už na základě předchozího textu. V této části jsou tyto výhody a nevýhody použití chemického obrábění rozepsány podrobněji.

Mezi výhody patří například **možnost obrábět velmi složité tvary**. Ta je dána tím, že chemické rozpouštědlo ve formě kapaliny při ponoření obrobku do leptací lázně pronikne do všech míst. Naproti tomu nástroje pro konvenční obrábění jsou limitovány svojí velikostí a geometrií. Čas pro produkci jednoho dílu není závislý na jeho ploše, pouze na hloubce úběru. Díky tomu **lze obrábět plechy o velkém průřezu**, aniž by se tím celý proces zpomalil. Při použití konvenčních metod pro obrábění velkoplošných obrobků by navíc mělo za následek zvyšování nákladů z důvodu velké spotřeby nástrojů. V podstatě je množství dílů vyrobených při jednom leptání závislý jen na velikosti leptací lázně, což umožňuje **obrábění velkého množství dílů najednou**. Při konvenčním obrábění dochází ke kontaktu nástroje a obrobku. Nástroj na obrobek tlačí a v místě, kde se nástroj nachází, dojde ke krátkodobému ohřevu a rychlému vychladnutí materiálu. To způsobuje vznik napětí na povrchu, což může mít za následek zhoršení jeho materiálových vlastností. Při chemickém obrábění, jelikož k takovému kontaktu nedochází, **nedochází ke vzniku povrchových napětí**. To je výhodné zejména při obrábění tenkých součástek, kde by při vzniku napětí a deformací na jejich

povrchu mohl vést k jejich poškození a znehodnocení. Díky dosahovaným vysokým přesnostem a dobré kvalitě povrchu bez otřepů většinou **není nutná další úprava obrobku**. Celá metoda je navíc relativně **finančně nenáročná**, a to zejména díky jednoduchosti provedení procesu a nízkým cenám masek a rozpouštědel oproti nástrojům pro konvenční metody obrábění. Obzvláště díky fotochemickému obrábění lze poměrně jednoduše dosáhnout i přesných velmi komplikovaných tvarů, čímž se významně sníží cena jednoho kusu výrobku. Díky své jednoduchosti navíc chemické obrábění umožňuje **velkou míru automatizace celého procesu**, což vede k dalšímu snižování nákladů. [4, 5, 8]

Chemické obrábění však přináší i některé limitace a nevýhody. Na jedno leptání lze **ubrat materiál maximálně do hloubky cca 13 mm**. Vyšší úběry by vyžadovaly delší časy leptání, avšak po 8 – 10 hodinách se obvykle maska vlivem leptadla poničí a začne se na některých místech odchlipovat, případně zcela odlupovat. Chemickým obráběním **nelze odstranit povrchové vady polotovaru**, jako například škrábance, důlky a vrypy. Tyto se pouze s lehkými změnami reprodukuje. Pro optimální výsledek obrábění je **vyžadována homogenní struktura materiálu**. Je proto velmi komplikované správně leptat odlitky, svařence atd. Další nevýhodou je působení jevu podleptání. Jak je vidět z geometrie podleptání na Obrázek 4, je **téměř nemožné chemickým obráběním vytvořit ostré hrany**. Často je vedlejším produktem leptání **tvorba vodíku ve formě plynových bublin**, které mohou mít za následek špatné odleptávání materiálu v místech jejich vyšší koncentrace. Ve srovnání s konvenčními metodami navíc **leptání trvá relativně dlouho**, zejména pro vyšší úběry materiálu. Průmyslovou výrobu navíc zdražuje také **nutnost bezpečného skladování a likvidace použitých chemikálií** a samozřejmě **nutnost odborně proškolení zaměstnanců ve výrobě**. [4, 5, 8]

Pro přehlednost jsou výhody a nevýhody chemického obrábění oproti konvenčním metodám shrnuty v Tabulka 9.

Tabulka 9: Výhody a nevýhody chemického obrábění [4, 5, 8]

Výhody	Nevýhody
možnost obrábět velmi složité tvary snadné obrábění velkoplošných dílů obrábění velkého množství dílů najednou nedochází ke vzniku povrchových napětí není nutná další úprava povrchu dílu relativně nízké náklady možnost automatizace procesu	omezení hloubky úběru na cca 13 mm nelze odstranit povrchové vady dílu požadavek homogenní struktury materiálu obtížná tvorba ostrých hran tvorba plynového vodíku leptání trvá relativně dlouho nutnost školeného personálu drahá likvidace leptadel

7. Závěr

Chemické obrábění je i dnes stále velmi důležitá výrobní technologie, v některých průmyslových odvětvích dokonce, díky svým specifickým vlastnostem, nenahraditelná. Její vývoj se posouvá neustále dopředu, ať už jde o zdokonalení procesu leptání, výzkum materiálů a aplikace přesnějších a odolnějších masek nebo hledání nových efektivnějších rozpouštědel, která budou zároveň šetrnější k životnímu prostředí.

V této bakalářské práci jsem o chemickém obrábění z dílčích krátkých textů sestavil poměrně obsáhlé pojednání. Podrobně zde popisuji postup při chemickém obrábění. Rozepisuji zde každý krok a popisuji v dnešní době používané metody pro jejich úspěšné splnění. Rozebírám zde také oblasti, kde je tato technologie nejvíce využívána. Srovnávám zde její využitelnost ve srovnání s konvenčními metodami obrábění a zaměřuji se také na problematiku ekologie a bezpečnosti práce při použití leptání jako výrobního procesu. Práce navíc také obsahuje popis nejpoužívanějších rozpouštědel, jejich chemické vlastnosti, a také chemický princip úběru materiálu těmito leptadly.

Přínos této bakalářské práce podle mého názoru spočívá především v tom, že se jedná o rozsáhlý text v češtině, který dává dohromady útržkovité informace o technologii chemického obrábění z odborných zdrojů. Text tak může posloužit například jako studijní materiál pro kohokoliv, kdo má zájem se s touto problematikou seznámit a blíže jí pochopit.

8. Seznam obrázků

Obrázek 1: Jednotlivé kroky chemického obrábění. [4]	3
Obrázek 2: Proces aplikace fotorezistu. [4]	5
Obrázek 3: Schéma principu leptání obrobku. [5]	6
Obrázek 4: Geometrie podleptání. [4]	7
Obrázek 5: Vliv rozložení atomů v materiálu na výslednou kvalitu povrchu. [1]	9
Obrázek 6: Graf drsnosti vybraných materiálů po leptání do hloubky 0,25 – 0,4 mm. [8]	9
Obrázek 7: Možné defekty vzniklé při leptání. [1]	10
Obrázek 8: Graf drsnosti povrchu a rychlosti úběru vybraných materiálů. [8]	11
Obrázek 9: Změna profilu podleptání s narůstajícím časem působení rozpouštědla. [12]	12
Obrázek 10: Fáze chemického prostřihování. [4]	14
Obrázek 11: Schéma stroje pro chemicko-mechanické leštění [18]	15
Obrázek 12: Odstranění přebytečného wolframu z polovodiče [19]	16
Obrázek 13: Schéma odjehlovacího stroje. [15]	17
Obrázek 14: Molekulární struktura chloridu železitého [23]	18
Obrázek 15: Molekulární struktura kyseliny dusičné [23]	20
Obrázek 16: Molekulární struktura hydroxidu sodného. [23]	21
Obrázek 17: Příklad využití chemického obrábění - ocelové brnění (rok 1600, Miláno) [25]	22
Obrázek 18: Příklad aplikace chemického obrábění. [27]	23
Obrázek 19: Příklad použití fotochemického obrábění-deska plošného spoje. [14]	24

9. Seznam tabulek

Tabulka 1: Používané materiály masek pro některé materiály obrobků [5, 8]	4
Tabulka 2: Vybrané parametry pro jednotlivé masky [4, 8, 10]	6
Tabulka 3: Dosahované tolerance při běžných rychlostech úběru pro různé materiály [12, 13]	11
Tabulka 4: Rozsahy tolerancí pro vybrané materiály při zvyšování hloubky úběru [12, 13]	12
Tabulka 5: Rozpouštědla používaná pro chemické obrábění [4, 5, 8]	18
Tabulka 6: Vybrané vlastnosti roztoku chloridu železitého [20]	19
Tabulka 7: Vybrané vlastnosti kyseliny dusičné [20, 24]	21
Tabulka 8: Vybrané vlastnosti hydroxidu sodného [20, 24]	21
Tabulka 9: Výhody a nevýhody chemického obrábění [4, 5, 8]	26

10. Zdroje

- [1] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie: Advanced methods of material removal*. Košice: Viena, 2000. ISBN 80-709-9430-4.
- [2] MIČIETOVÁ, A. *Nekonvenčné metódy obrábania*. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2001. ISBN 80-7100-853-2.
- [3] SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I: elektroerozivní, elektrochemické a chemické obrábění*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2016. ISBN 9788024839431.
- [4] MIKELL P. GROOVER. *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*. 4th ed. Hoboken, NJ: J. Wiley, 2010. ISBN 0470467002.

- [5] CAKIR, Orhan, A YARDIMEDEN a T OZBEN. *Archives of Materials Science and Engineering: Chemical Machining* [online]. 28.8.2007,, 499-502 [cit. 2018-06-25]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/40728038_Chemical_machining?enrichId=rgreq-d841fd72b9e276c6ffa7b47d6c0cb32b-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzQwNzI4MMDM4O0FT0jE0MzgzMjc2Nzg3MDk3NkAxNDExMzI3NjU0ODMx&el=1_x_2&_esc=publicationCoverPdf
- [6] HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění - 3. část* [online]. [cit. 2018-06-25]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf
- [7] JOSEPH R. DAVIS a STEVEN R. LAMPMAN ... *Machining*. 9. ed. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1989. ISBN 08-717-0022-0.
- [8] EL-HOFY, Hassan. *Advanced machining processes: nontraditional and hybrid machining processes*. New York: McGraw-Hill, 2005. ISBN 00-714-6694-0.
- [9] *Non Traditional Machining Processes*. Mansoura University Occupational Safety & Health O.S.H. [online]. [cit. 2018-06-26] Dostupné z <http://osp.mans.edu.eg/s-hazem/NTM/NTCM.html>
- [10] WELLER, E. J. *Nontraditional machining processes*. 2nd ed. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, Publications/Marketing Division, c1984. ISBN 978-087-2631-335.
- [11] DEGARMO, E. Paul. *Materials and processes in manufacturing*. 9th ed., update ed. Hoboken, N.J.: Wiley, c2003. ISBN 04-716-5653-4.
- [12] ANUSREE, T G a P GOVINDAN. Analysis Of Chemical Machining For Practical Applications. *BEST: International Journal of Management, Information Technology and Engineering*. 2014, 2(3), 77-86.
- [13] LANGWORTHY, Eugene M. *Chemical Milling: Metals Handbook - Machining*. Vol. 16. ASM International, 1997.
- [14] BROŽ, Martin. Deska plošného spoje. In: *Wikipedie: otevřená encyklopedie* [online]. 2008 [cit. 2018-07-11]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Plo%C5%A1n%C3%BD_spoj#/media/File:Plosny_spoj_s_SMD.png
- [15] *Zpravodaj-Vítkovické slévárny: Časopis zaměstnanců společnosti Vítkovické slévárny, s.r.o.* [online]. 2014, (3) [cit. 2018-07-12]. Dostupné z: <http://www.vitkovickeslevarny.cz/documents/20181/28250/2014+-+3/b1d5d294-5f17-4110-8172-8aebec64f2e4?version=1.1>
- [16] ZHENGFENG, Wang, Yin LING, Sum HUAN a Phaik LUAN. *Chemical Mechanical Planarization* [online]. [cit. 2018-07-12]. Dostupné z: http://maltiel-consulting.com/CMP-Chemical-mechanical_planarization_maltiel_semiconductor.pdf
- [17] GATZEN, Hans H., Karl-Hans WU a Srecko CVETKOVIC. *Modeling CMP: Investigation of the Mechanical Removal Mechanism* [online]. Institute for Microtechnology, Hanover University [cit. 2018-07-12]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/0404/2a4ebf5c30556e36e5ee72d364652d293785.pdf>

- [18] TESTA, F., C. COETSIER, E. CARRETIER, M. ENNAHALI, B. LABORRIE a P. MOULIN. *Recycling a slurry for reuse in chemical mechanical planarization of tungsten wafer: Effect of chemical adjustments and comparison between static and dynamic experiments* [online]. 9.8.2013 [cit. 2018-07-12]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/258332366_Recycling_a_slurry_for_reuse_in_chemical_mechanical_planarization_of_tungsten_wafer_comparison_betwe](https://www.researchgate.net/publication/258332366_Recycling_a_slurry_for_reuse_in_chemical_mechanical_planarization_of_tungsten_wafer_comparison_between_static_and_dynamic_experiments)
[tw_static_and_dynamic_experiments](https://www.researchgate.net/publication/258332366_Recycling_a_slurry_for_reuse_in_chemical_mechanical_planarization_of_tungsten_wafer_comparison_between_static_and_dynamic_experiments)
- [19] STEIGERWALD, Joseph M., S. P. MURARKA a Ronald J. GUTMANN. *Chemical mechanical planarization of microelectronic materials*. New York: J. Wiley, c1997. ISBN 04-711-3827-4.
- [20] ED.: MATTHIAS BOHNET ... *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*. 6th ed. ; Release 2000-. New York: Wiley, 2000. ISBN 978-352-7306-732.
- [21] CAKIR, O. Chemical etching of aluminium. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008, , 337-340.
- [22] HOUSECROFT, Catherine E. a A. G. SHARPE. *Inorganic chemistry*. 2nd ed. Upper Saddle River, N.J.: Pearson Prentice Hall, 2005. ISBN 01-303-9913-2.
- [23] Ggg
- [24] JURŠÍK, František. *Anorganická chemie nekovů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2001. ISBN 80-708-0417-3.
- [25] MCFLY, G. An etched and partially russeted and gilded half armor made of steel, brass, leather, and textiles. In: *Wikipedia: The Free Encyclopedia* [online]. 18.1.2009 [cit. 2018-07-17]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Chemical_milling#/media/File:1600_Milan_Half_Ar](https://en.wikipedia.org/wiki/Chemical_milling#/media/File:1600_Milan_Half_Armor.jpg)
[mor.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Chemical_milling#/media/File:1600_Milan_Half_Armor.jpg)
- [26] HICKS, R. E. Chemical Milling Of Space Flight Hardware. *APL Technical Digest* [online]. 1967, , 11-16 [cit. 2018-07-17]. Dostupné z: [http://www.jhuapl.edu/techdigest/views/pdfs/V06_N4_1967/V6_N4_1967_Hicks.](http://www.jhuapl.edu/techdigest/views/pdfs/V06_N4_1967/V6_N4_1967_Hicks.pdf)
[pdf](http://www.jhuapl.edu/techdigest/views/pdfs/V06_N4_1967/V6_N4_1967_Hicks.pdf)
- [27] LÜTJERING, Gerd a JAMES C. WILLIAMS. *Titanium*. 2nd ed. Berlin: Springer, 2007. ISBN 978-354-0730-361.
- [28] BOZP a pravidla pro nakládání s chemickými látkami. *BOZP.CZ: Bezpečnost práce* [online]. 2017 [cit. 2018-07-17]. Dostupné z: <https://www.bozp.cz/aktuality/bozp-pravidla-chemicke-latky-smesi/>
- [29] Penta chemicals: bezpečnostní listy. *Penta chemicals* [online]. [cit. 2018-07-17]. Dostupné z: <https://www.pentachemicals.eu/bezpecnostni-listy.php>
- [30] HELLBUS. Strukturní vzorec kyseliny dusičné. In: *Wikipedia: The Free Encyclopedia* [online]. [cit. 2018-07-25]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Kyselina_dusi%C4%8Dn%C3%A1#/media/File:Nitric_](https://cs.wikipedia.org/wiki/Kyselina_dusi%C4%8Dn%C3%A1#/media/File:Nitric_acid_resonance_median.png)
[acid_resonance_median.png](https://cs.wikipedia.org/wiki/Kyselina_dusi%C4%8Dn%C3%A1#/media/File:Nitric_acid_resonance_median.png)