



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Hybridní technologie obrábění

Hybrid machining

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2018

Roman CHYLE

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový

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

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V praze, dne 31.7.2018

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval především vedoucímu mé bakalářské práce, Ing. Pavlu Novákovi, Ph.D. za jeho cenné rady, konzultace a další pomoc při zpracování mé práce. Dále bych rád poděkoval Mgr. Anetě Mrázkové za kontrolu a opravu mé práce dle pravidel českého pravopisu a také Veronice Šerákové za podporu a pomoc s překladem zahraniční odborné literatury.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou hybridních technologií obrábění. V první, nejrozsáhlejší části práce, je uvedeno rozdělení hybridních technologií. U každé technologie je detailně popsán její princip, vlastnosti, možnosti uplatnění, výhody a nevýhody jejího použití.

Ve druhé části se tato práce zabývá konkrétním využitím hybridních technologií a příklady aplikace jednotlivých procesů v praxi.

V závěru práce pojednává o porovnání hybridních technologií s ostatními výrobními procesy. Srovnáním kvalitativních parametrů, rychlostí obrábění a dalších vlastností.

Klíčová slova: hybridní technologie obrábění, asistované procesy, hybridní procesy, technologie obrábění, hybridní obrábění

Abstract

This bachelor thesis deals with the issues of hybrid machining technologies. The first and most extensive section of this paper presents the division of the hybrid technologies. The principles, characteristics, possibilities of application, advantages and disadvantages of using them are described in detail for each technology.

The second part of this work focuses on specific use of hybrid technologies and examples of applications of individual processes in practice.

The end of this work contains a comparison of hybrid technologies with other machining processes. It compares qualitative parameters, machining removal rates and other characteristics.

Key words: hybrid machining technologies, assisted processes, hybrid processes, machining technology, hybrid machining

Obsah

Úvod	6
1. Typy metod hybridních technologií a jejich charakteristika	7
1.1 Elektrochemicky asistované procesy (EAP).....	7
1.1.1 Elektrochemické broušení (ECG).....	8
1.1.2 Elektrochemické honování (ECH).....	10
1.1.3 Elektrochemické superfinišování (ECS)	12
1.1.4 Elektrochemické leštění (ECB).....	14
1.1.5 Ultrazvukem asistované elektrochemické obrábění (USMEC).....	16
1.2 Tepelně asistované procesy (TAP)	18
1.2.1 Elektroerozivní rozpouštění (EEDM)	18
1.2.2 abrazivní elektroerozivní broušení (AEDG)	19
1.2.3 Abrazivní elektroerozivní obrábění (AEDM).....	20
1.2.4 Ultrazvukem asistované elektroerozivní obrábění (EDMUS).....	21
1.2.5 Elektrochemické erozivní broušení (ECDG).....	22
2. Oblasti využití hybridních technologií	24
2.1 Důvody aplikace hybridních technologií	24
2.2 Konkrétní využití vybraných hybridních technologií	24
2.2.1 Využití technologie ECG	24
2.2.2 Využití technologie ECH	25
2.2.3 Využití technologie EEDWM.....	25
3. Srovnání s ostatními výrobními metodami	26
3.1 ECG vs broušení.....	26
3.2 ECH vs honování.....	26
3.3 ECSF vs superfinišování	27
3.4 USMEC vs ECM	27
3.5 AEDG vs broušení	27
3.6 EDMUS vs EDM	28
Závěr.....	29
Seznam použitých zkratk.....	30
Zdroje:	31

Úvod

Po celou dobu lidské historie byl technologický vývoj spojen s využitím nových nebo zdokonalením stávajících materiálů. Stále nové a dokonalejší materiály nabízely širší možnosti jejich využití a tím usnadňovaly lidem každodenní život. S novými materiály však byla spojena i potřeba na vývoj technologií pro jejich obrábění.

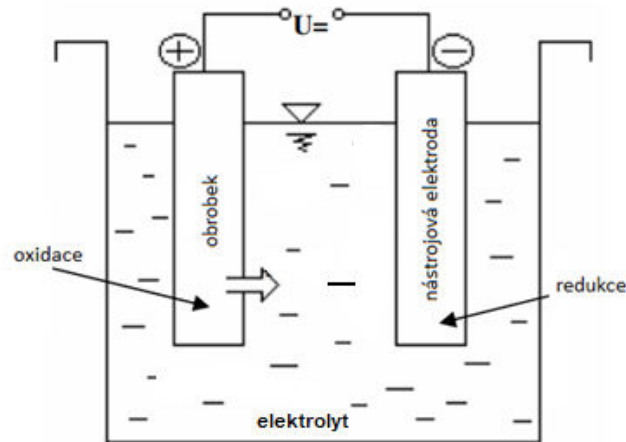
Za ta tisíciletí jsme se od kamene dostali až do současnosti, kdy materiály, které využíváme například v letectví, automobilovém průmyslu, nástrojovém inženýrství nebo třeba lékařství, disponují značně vylepšenými teplotními, mechanickými a chemickými vlastnostmi, jako je zvýšená tvrdost, pevnost, odolnost proti opotřebení, korozi, tepelná odolnost, atd. Tento trend v neustálém vylepšování vlastností stávajících a zároveň ve vývoji nových materiálů znamená také potřebu vývoje technologií na jejich obrábění. Ve chvíli, kdy už konvenční nebo nekonvenční metody obrábění pro jejich obráběcí parametry nestačí, nebo by jejich použití bylo ekonomicky nevýhodné, nalézají své uplatnění právě hybridní technologie obrábění. Tyto technologie kombinují různé obráběcí procesy, ať už konvenční nebo nekonvenční, do jednoho procesu, za účelem zvýšení efektivity obrábění a mnohdy také dosažení lepších kvalitativních parametrů.

Ve své práci se zabývám jejich rozdělením, popisem jednotlivých technologií, oblastmi jejich využití, obráběcími parametry, kterých jsou jednotlivé technologie schopny dosáhnout a v závěru také jejich porovnáním s ostatními výrobními procesy. Vzhledem k faktu, že každý zdroj uvádí rozdělení hybridních technologií odlišně, jsem se rozhodl držet se rozdělení podle knihy „Fundamentals of Machining Processes, Conventional and Nonconventional Processes“ od autora Hassan Abdel-Gawad El-Hofy.

1. Typy metod hybridních technologií a jejich charakteristika

1.1 Elektrochemicky asistované procesy (EAP)

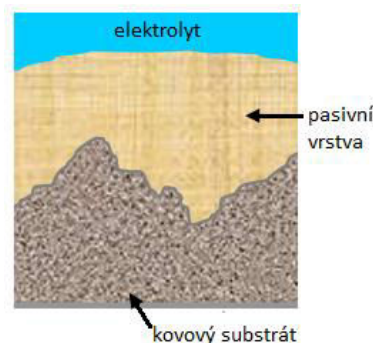
Elektrochemicky asistované procesy kombinují různé způsoby obrábění s obráběním elektrochemickým (ECM). Metoda ECM je založena na principu anodického rozpouštění elektrody v elektrolytu za přítomnosti elektrického pole, obrázek 1. Aby proces fungoval, musí být obrobek z elektricky vodivého materiálu. Tento obrobek je pak připojen na kladný zdroj stejnosměrného napětí (anoda). Na nástrojovou elektrodu (kovová část nástroje) je připojen záporný pól (katoda), [2].



Obrázek 1 - princip ECM [2]

Aby došlo k požadovanému vývoji chemických reakcí, které zajistí postupnou erozi obrobku, tj. oxidace na anodě a redukce na katodě, musí být napětí přivedené do procesu vyšší, než součet rozkladových napětí na obou elektrodách a poklesu napětí v prostoru mezi elektrodami.

Jakmile ovšem začne probíhat anodické rozpouštění obrobku, na jeho povrchu začne docházet k tzv. pasivaci. Pasivace je děj, při kterém se na povrchu kovu, vytváří tzv. pasivní vrstva (obrázek 2). Pasivní vrstva je ochranná vrstva kovu, která brání dalšímu uvolňování iontů z kovu do elektrolytu, a tím negativně ovlivňuje efektivitu procesu ECM.[2]



Obrázek 2 - Pasivní vrstva [2]

Odstranit tuto vrstvu lze několika způsoby [2]:

- chemicky
- hydrodynamicky – pomocí proudu a tlaku elektrolytu
- elektricky – periodické otáčení polarity zdroje napětí
- mechanicky – odstranění vrstvy abrazivem pomocí obráběcího nástroje
 - ECM s elektroerozivním obráběním (EDM)
 - ECM s ultrazvukovým obráběním (USM)

Vzhledem k EAP, které se v praxi využívají, dochází ve většině případů k odstranění pasivní vrstvy mechanicky [2].

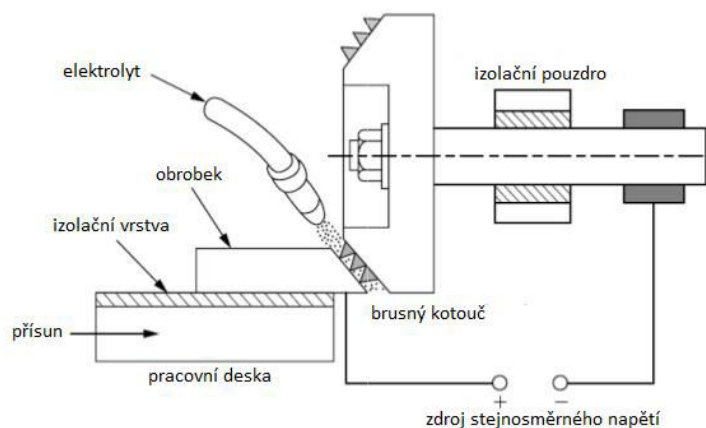
1.1.1 Elektrochemické broušení (ECG)

Princip technologie

Elektrochemické broušení je speciální druh elektrochemického obrábění (ECM), kde místo tvarovaného nástroje, slouží jako katoda speciálně konstruovaný brusný kotouč. Obrobek je zde připojen na kladný pól stejnosměrného napětí, a tudíž zde figuruje jako anoda (obrázek 3) [1].

Nosič brousícího kotouče a brousící kotouč samotný, je tvořen vodivým materiálem. Pracovní povrch brousícího kotouče je pokryt izolačním abrazivem. Jako abrazivum se používá diamant nebo oxid hlinitý (Al_2O_3). Do prostoru mezi brousící kotouč a obráběným povrchem, jejichž vzdálenost se pohybuje okolo 0,025 mm, je přiváděn elektrolyt, nejčastěji tvořený roztokem dusičnanu sodného ($NaNO_3$), který zde plní funkci především jako elektrochemické rozpouštědlo, díky kterému se zvyšuje objem obráběného materiálu a tedy i rychlost obrábění [1].

Brousící kotouč rotuje s povrchovou rychlostí mezi 20 až 35 m/s. Do obvodu je přiváděn elektrický proud, který dosahuje velikosti 50 až 300 A. Hodnota elektrického napětí mezi brousícím kotoučem a obráběným povrchem se pohybuje v rozmezí 4 až 40 V. Vzniklá hustota elektrického proudu v tomto prostoru je obvykle mezi 20 až 240 A/cm² [1].



Obrázek 3 - Princip elektrochemického broušení

Rychlost odebrání materiálu

Materiál je v tomto procesu odstraňován především díky elektrochemickému rozpouštění. Mechanickým broušením je odebráno pouze 5 – 10 % z celkového objemu odebíraného materiálu. Rychlost odebrání materiálu je v případě ECG přibližně 4x vyšší, než u klasického konvenčního broušení, a pohybuje se okolo $1600 \text{ mm}^3/\text{min}$ [5].

V prostoru mezi broušicím kotoučem a obráběným povrchem jsou místa, kde je šířka mezery menší než výška aktivních částí brusných zrn. V těchto místech, probíhá zároveň elektrochemické rozpouštění (ECD) a mechanické broušení. V prostorách, kde se BK, respektive brusná zrna, už nedotýkají obrobku, ale stále je zde přítomen elektrolyt, probíhá čisté ECD [1].

Při obrábění může nastat situace, kdy se již mechanické broušení nebude podílet na obráběcím procesu. Podmínky, za kterých tato situace nastane, závisí na parametrech elektrického obvodu procesu, elektrochemické obrobitelnosti materiálu v daném elektrolytu, rychlosti přísunu obrobku a vlastnostech brusného kotouče, především na výšce brusného zrna [1].

Přesnost a kvalita povrchu

Výsledná kvalita povrchu závisí na mnoha parametrech, jako například na přísunu obráběné součásti, povrchové rychlosti brusného kotouče, složení a rychlosti průtoku elektrolytu, velikosti elektrického proudu a v neposlední řadě také metalurgické vlastnosti obráběného materiálu [2].

Příliš pomalý přísun obrobku má za následek horší kvalitu obrobeného povrchu a nižší dosažené tolerance. Pokud je přísun naopak příliš rychlý, dochází k nadměrnému broušení kotouče. Za správně zvolených podmínek obráběcího procesu lze dosáhnout relativně vysoké přesnosti a vysoké kvality povrchu [1, 2].

Při klasickém broušení lze dosáhnout tolerancí až $\pm 0,003 \text{ mm}$ a drsnosti od 0,1 do 0,3 Ra, nicméně je provázáno vznikem vysokých teplot a tlaků, což ztěžuje broušení tenkých součástí. Dosažené rozměrové tolerance metodou ECG jsou vyšší, obvykle okolo $\pm 0,125 \text{ mm}$, ale lze obrábět i velice tenké součásti, od 1,02 mm a drsnost výsledného povrchu se pohybuje od 0,2 do 0,3 Ra [1, 25].

Aplikace technologie ECG [1]

- obrábění částí z těžko obrobitelných materiálů, jako jsou slinuté karbidy, slitiny odolné proti tečení (Inconel, Nimonic), slitiny titanu a kovové komposity
- broušení, dělení materiálu, řezání a ostření nástroje
- odstraňování únavových trhlin z povrchu ocelových konstrukcí

Výhody technologie ECG [1]

- absence vytvrzování povrchu
- eliminace brusných otřepů
- absence poškození tenkých křehkých částí, citlivých na teplo
- dobrá kvalita povrchu
- delší životnost brusného kotouče

Nevýhody technologie ECG [1]

- vysoká pořizovací cena technologie
- lze obrábět pouze elektricky vodivé materiály
- problémy s filtrací a likvidací elektrolytu
- ztráta přesnosti při obrábění na vnitřních rozích, v důsledku elektrochemického rozpouštění

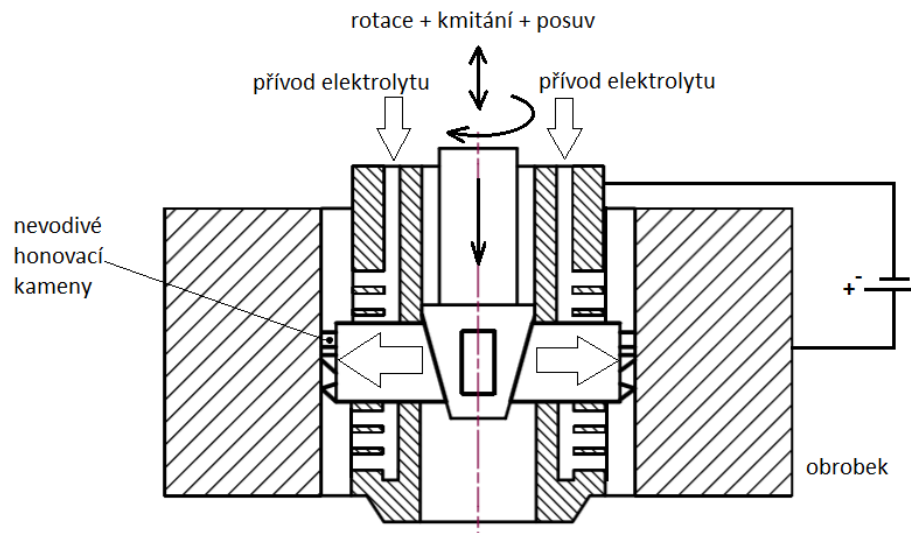
1.1.2 Elektrochemické honování (ECH)

Princip technologie

Elektrochemické honování je technologie, která kombinuje elektrochemické obrábění a konvenční honování. Jak je zobrazeno na obr. č. 4, vřeteno nástroje, jež je vyrobeno z vodivého materiálu, je připojeno na záporný pól zdroje stejnosměrného napětí, a tudíž v elektrochemickém procesu figuruje jako katoda. Na obráběnou součást je naopak připojen kladný pól napětí, a tedy v procesu plní funkci anody [1].

Na nástroj z vodivého materiálu jsou připevněny tzv. honovací kameny. Použité kameny se nijak zvlášť neliší od klasických honovacích kamenů, musí ovšem odolávat korozi od přítomného elektrolytu. Jsou z nevodivého materiálu, a jsou zodpovědné za mechanickou část obrábění v procesu. Ve vnějším plášti nástroje jsou po celém jeho obvodu vytvořeny malé díry, kterými je do prostoru mezi nástroj a obráběný povrch o šířce 0,076-0,250 mm přiváděn elektrolyt, jenž umožňuje elektrochemické rozpouštění obráběného povrchu. Jako elektrolyt se používá nejčastěji roztok dusičnanu sodného (NaNO_3) o hustotě 240 g/l. Obvykle se elektrolyt přehřívá na 38 °C a do mezielektrodového prostoru (prostor mezi nástrojem a obrobkem) je přiváděn pod zvýšeným tlakem 1 MPa objemovou rychlostí 95 l/min [1].

Velikost stejnosměrného napětí, přiváděného do procesu, se pohybuje v rozmezí od 6 do 30 V a vzniklá hustota elektrického proudu dosahuje hodnoty až 465 A/cm²[1].



Obrázek 4 - princip elektrochemického honování [1]

Rychlost odebrání materiálu

Obráběcí rychlost elektrochemického honování je 3x až 5x vyšší než u konvenčního honování a 4x vyšší než u vnitřního válcového broušení [1].

Přesnost a kvalita povrchu

Při obrábění metodou ECH lze dosáhnout nízkých geometrických tolerancí. Rozměrových tolerancí je dosahováno v rozsahu až $\pm 0,003$ mm. Výsledná drsnost povrchu je vyšší než u konvenčního honování (R_a až $0,02 \mu\text{m}$) a pohybuje se v rozmezí $0,2 - 0,8 \mu\text{m} R_a$ [1, 6].

Aby byl po obráběcím procesu zajištěn povrch bez povrchového pnutí materiálu, způsobeném tlakem honovacích kamenů na obráběný povrch, je nosič honovacích kamenů na nástroji umístěn tak, aby i pod ním byly v plášti nástroje díry, kterými je přiváděn elektrolyt. Tím je zajištěno, že při vytahování nástroje z obrobku, dochází po tlakovém namáhání obráběného povrchu honovacími kameny ještě k čistému ECM povrchu, což má za následek odstranění povrchového pnutí [1].

Aplikace technologie ECH [4]

- obrábění všech vnitřních popřípadě vnějších válcových ploch, kde je požadována vysoká přesnost a kvalita obrobce. Například válce spalovacího motoru
- obrábění součástí, které jsou citlivé na teplo

Výhody technologie ECH [1, 8]

- několika násobně vyšší rychlost obrábění než u konvenčního honování
- absence povrchového pnutí po obrábění
- dosažení nízkých rozměrových tolerancí
- dosažení přesných geometrických tolerancí

- vysoká životnost honovacích kamenů v důsledku odebírání materiálu především ECM
- výsledný povrch je bez otřepů
- eliminace povrchových mikrotrhlin

Nevýhody technologie ECH [1, 8]

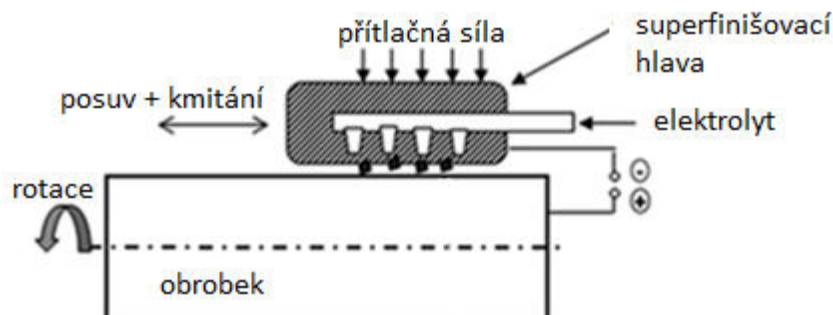
- vysoká pořizovací cena
- vysoké náklady na provoz a údržbu
- lze obrábět pouze elektricky vodivé materiály
- problémy s filtrací a likvidací elektrolytu

1.1.3 Elektrochemické superfinišování (ECS)

Princip technologie

Elektrochemické superfinišování kombinuje konvenční superfinišování s elektrochemickým rozpouštěním. ECS, se stejně jako klasické superfinišování používá převážně k obrábění vnějších povrchů rotačních součástí. Jak je vidět na obrázku č. 5, obrobek, na který je přiváděn kladný pól zdroje stejnosměrného napětí, což znamená, že plní funkci anody, obvykle koná rotační pohyb. Nástroj, který je připojen na záporný pól, a tudíž zde figuruje jako katoda, se pohybuje podél obrobku posuvným pohybem a zároveň kmitá, což má za následek překrytí jednotlivých stop od brusných zrn a tedy následného vyhlazení povrchu [1].

Do pracovního prostoru mezi nástroj a obrobek je přiváděn elektrolyt, díky kterému, za pomoci přítomného elektrického proudu, dochází k elektrochemickému rozpouštění obráběného povrchu. Složení, koncentrace a teplota elektrolytu mají značný vliv na obráběcí rychlost. Další parametry, které významně přispívají k ovlivnění rychlosti obrábění, jsou velikost elektrického napětí, frekvence a amplituda kmitavého pohybu nástroje, rychlost otáčení obrobku a v neposlední řadě také hrubost brusného zrna obráběcích tyčí, nebo velikost tlaku superfinišovacích kamenů na obrobek [1, 10].

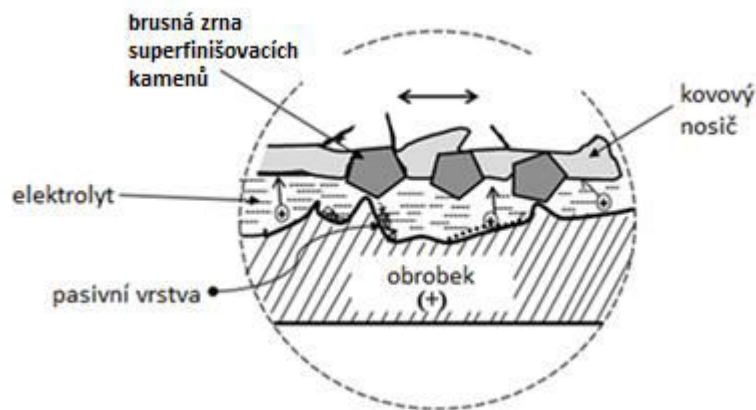


Obrázek 5 - princip elektrochemického superfinišování [10]

Rychlost odebrání materiálu

Jak jsem již zmiňoval v odstavci 1.1, při procesu se na obráběném povrchu, tedy na anodě, kvůli ECD vytváří oxidová vrstva. Ačkoliv v porovnání s konvenčním superfinišováním je obráběcí rychlost ECS vyšší, důsledkem tohoto jevu se snižuje velikost procházejícího elektrického proudu přibližně o 10 – 20 % a elektrochemické rozpouštění povrchu je redukováno až o 50%. Tyto faktory snižují obráběcí rychlost procesu, avšak mají významný vliv na výslednou kvalitu povrchu [1, 10].

Mechanická část obráběcího procesu, vykonávána jemnými brusnými zrnky na superfinišovacíh kamenech, má za následek, že na vyšších bodech obráběného povrchu (obrázek 6) dojde k odstranění této oxidické vrstvy. To způsobuje, že zde na rozdíl od níže položených míst povrchu, kde vrstva oxidu pořád zůstává, dochází k vyšší rychlosti odběru materiálu, a tím pádem dochází k relativně dokonalému vyrovnávání nerovností povrchu [10].



Obrázek 6 - detail povrchu při ECS [10]

Přesnost a kvalita povrchu

Z důvodu uvedeného o odstavci výše je zřejmé, že při technologii elektrochemického superfinišování lze dosáhnout vysoké kvality povrchu a zároveň vysokých rozměrových a geometrických tolerancí. Co se rozměrových tolerancí týče, lze dosáhnout přesnosti až $\pm 0,013$ mm na průměru. U geometrických tolerancí válcovitosti a přímosti se lze dostat až na hodnotu $\pm 0,007$ mm [1].

Díky výše zmíněné kombinaci pohybů konající jak nástroj, tak obrobek, dochází k překrytí stop od superfinišovacíh kamenů, a proto je výsledný povrch po obrábění hladký a lesklý [10].

Aplikace technologie ECS [10]

- obrábění těžko obrobitelných slitin
- obrábění nástrojových ocelí
- obrábění součástí citlivých na teplo a mechanickou deformaci

Výhody technologie ECS [1, 10]

- vyšší rychlost obrábění než u konvenčního superfinišování
- dosažení relativně nízkých rozměrových tolerancí
- dosažení relativně přesných geometrických tolerancí
- nízká výsledná drsnost povrchu
- lesklost obrobeneho povrchu
- výsledný povrch je bez otřepů

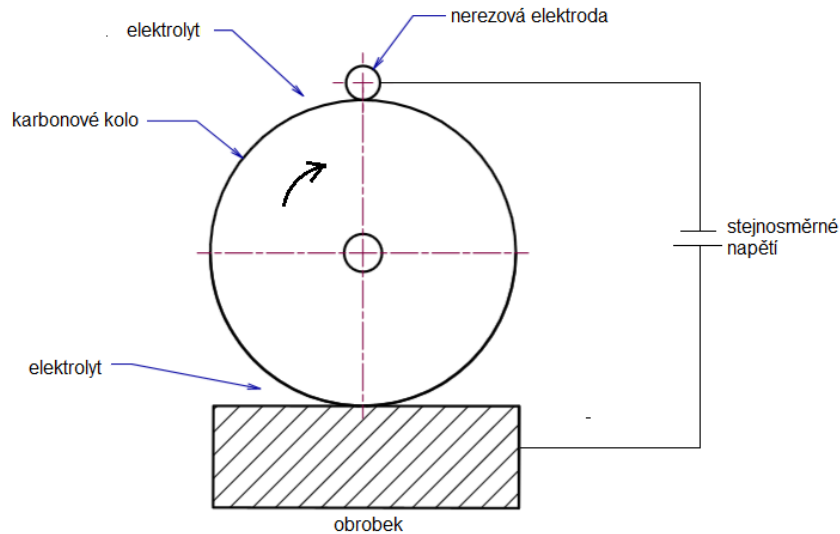
Nevýhody technologie ECS [1, 10]

- vysoká pořizovací cena.
- vysoké provozní náklady.
- nižší životnost superfinišovacích kamenů v důsledku koroze od přítomnosti elektrolytu
- lze obrábět pouze vodivé materiály
- problémy s filtrací a likvidací elektrolytu

1.1.4 Elektrochemické leštění (ECB)**Princip technologie**

Elektrochemické leštění kombinací technologie ECM a mechanického leštění. Mechanické leštění je pomalý dokončovací proces používaný pro dosažení hladkého a zrcadlového vzhledu povrchu obrobku. Mechanické leštění, které je prováděno za sucha, produkuje velké množství prachu. K jeho eliminaci a za účelem vylepšení dosažených vlastností finálního povrchu po obrábění, je tato metoda nahrazována právě metodou ECB [8].

Stejně jako v předchozích případech i zde je do procesu přiveden stejnosměrný elektrický proud. Nástroj je připojen na záporný pól zdroje napětí, tudíž je zde nástroj katodou a na obráběnou součást je připojen kladný pól, a tedy v procesu plní funkci anody (obrázek 7). Hustota přivedeného elektrického proudu se pohybuje v rozmezí 0,1 až 7 A/cm². Karbonové kolo rotuje s obvodovou rychlostí 1 – 6 m/s a průtok elektrolytu (používá se buď roztok NaCl nebo roztok NaNO₃) se pohybuje v rozmezí 1 až 10 l/min [1, 8].



Obrázek 7 – princip ECB [1]

Rychlost odebrání materiálu

U ECB má na rychlost obrábění vliv několik faktorů. Nejvýznamnější roli pro odběr materiálu má hustota elektrického proudu, typ elektrolytu a rychlost karbonového kola. Pro vysokorychlostní leštění se jako elektrolyt používá roztok NaCl za přítomnosti vysokého elektrického proudu. Pro další navýšení úběru materiálu, se do elektrolytu přidává Al_2O_3 jako abrazivum [1].

Výsledná kvalita povrchu

Stejně jako rychlost odebrání materiálu i kvalita povrchu závisí na mnoha faktorech. I zde platí, že zvyšováním rychlosti obrábění, klesá kvalita obrobeneho povrchu. Přidáním abraziva do elektrolytu pro urychlení úběru materiálu snížíme výslednou lesklost a hladkost povrchu.

Při vhodně zvolených podmínkách lze technologií ECB dosáhnout zrcadlového vzhledu povrchu a drsnosti od 0,04 Ra do 1,5 Ra [1,8].

Aplikace technologie ECB

Jako finišovací technologie se ECB používá právě na závěrečné úpravy povrchu. Technologie je vhodná pro obrobky jednoduchých tvarů a je omezena pouze na elektricky vodivé materiály obrobku [5].

Výhody technologie ECB

- lze dosáhnout nízkých drsností povrchu po obrábění (až Ra 0,04)
- výsledný povrch je hladký a lesklý
- díky přítomnosti elektrolytu je eliminován únik nečistot do vzduchu

Nevýhody technologie ECB

- lze obrábět pouze obrobky jednoduchých tvarů
- technologií ECB je možné použít pouze na elektricky vodivé materiály
- zvýšené náklady na provoz
- problémy s filtrací elektrolytu

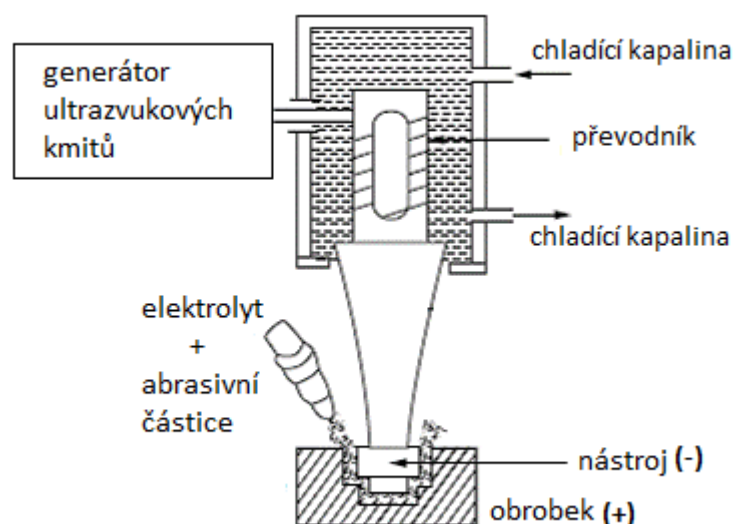
1.1.5 Ultrazvukem asistované elektrochemické obrábění (USMEC)

Princip technologie

Další variantou vylepšení technologických vlastností metodou ECM a poslední elektrochemicky asistovaná technologie obrábění, je dle výše uvedeného členění ultrazvukem asistované ECM neboli USMEC. Princip spočívá v tom, že nástroj kmitá ultrazvukovou frekvencí 20 kHz s amplitudou mezi 8-30 μm . Díky přítomnosti abrazivních zrn v elektrolytu tedy dochází nejen k ECD, ale zároveň probíhá i mechanické štěpení obráběného povrchu (obrázek 7) [1].

Jak je uvedeno v odstavci 1.1, při ECM vzniká na povrchu obráběného kovu pasivní vrstva. Ve všech předchozích uvedených případech je její odstraňování zajištěno mechanicky, a sice obráběcím nástrojem. V případě technologie USMEC je tohoto efektu dosaženo právě díky abrazivním zrnům v elektrolytu a jeho chaotickému, tlakově proměnnému toku [7].

Co se týká elektrického obvodu a jeho parametrů, obvykle se volí napětí v rozmezí od 3 do 15 V a vzniklá proudová hustota dosahuje hodnoty 5 – 30 A/cm^2 [1].



Obrázek 7 - schéma USMEC [11]

Rychlost odebrání materiálu

Účinnost tohoto obráběcího procesu je zlepšena z hlediska vyšší obráběcí rychlosti a nižšího opotřebování nástroje. Rychlost odebrání materiálu závisí na mnoha faktorech. Teplota elektrolytu, frekvence kmitání nástroje, amplituda kmitu, šířka mezery mezi nástrojem a obrobkem a rychlost průtoku elektrolytu, to vše má na úběr materiálu vliv a proto lze jejich vhodnou kombinací docílit relativně vysokých obráběcích rychlostí. [6]

Přesnost a kvalita povrchu

Výsledná kvalita povrchu je nižší než u samotného ECM. Metodou ECM lze dosahovat hodnot Ra v rozmezí od 0,1 do 0,25 [1]. U metody USMEC výsledná drsnost povrchu dosahuje minimální hodnoty 0,4 μm Ra [6].

Aplikace technologie USMEC

Tato technologie vzhledem k faktu, že ECM lze obrábět pouze vodivé materiály, nemá příliš široké využití. Technologií USMEC se proto obrábí především [6]:

- tvrzené oceli
- křehké slitiny

Výhody technologie USMEC [1, 7]

- rychlejší oproti USM
- nižší opotřebení nástroje oproti USM
- lze obrábět křehké slitiny
- absence povrchových pnutí
- absence mechanického namáhání povrchu

Nevýhody technologie USMEC [1, 7]

- lze obrábět pouze vodivé materiály
- nízké obráběcí rychlosti
- snížená přesnost obrábění
- horší kvalitativní parametry než u USM

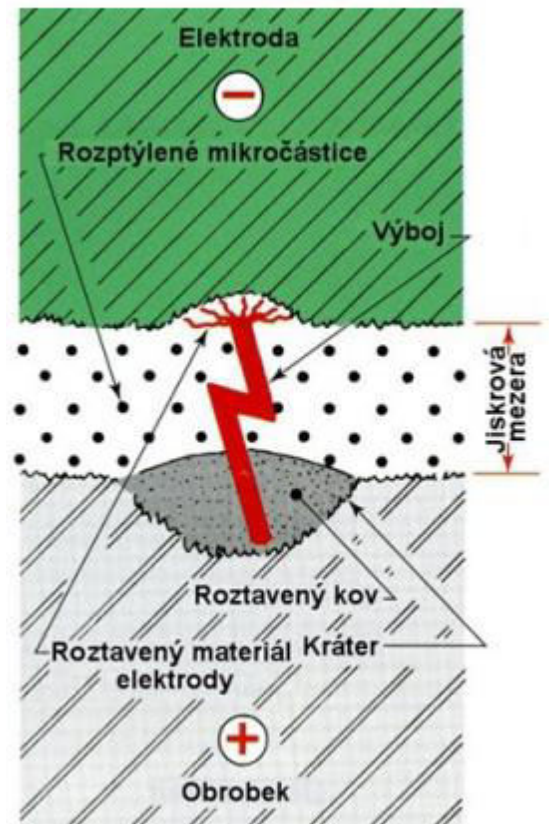
1.2 Tepelně asistované procesy (TAP)

Princip technologie

Tepelně asistované procesy jsou procesy, u nichž hlavní obráběcí část zajišťuje tepelné erozivní obrábění. Při vhodné kombinaci například s elektrochemickým obráběním nebo i některými mechanickými obráběcími procesy lze opět dosáhnout lepších technologických vlastností procesu, jako je obráběcí rychlost nebo kvalitativní parametry obrobeneho povrchu [1].

Tepelné erozivní obrábění využívá vzniku velmi intenzivního lokálního tepla v důsledku například elektrického výboje. Díky tomuto efektu dojde k odstranění materiálu roztavením a následným odpařováním malých ploch na povrchu obrobku.

Kromě obráběcí technologie, která ke vzniku tepelně ovlivněných míst využívá elektrického výboje (EDM) (obrázek 8), existují další typy těchto technologií, které využívají laserový paprsek (LBM), elektronový paprsek (EBM), iontový paprsek (IBM) a plasmový paprsek (PJM) [1].



Obrázek 8 – princip EDM [12]

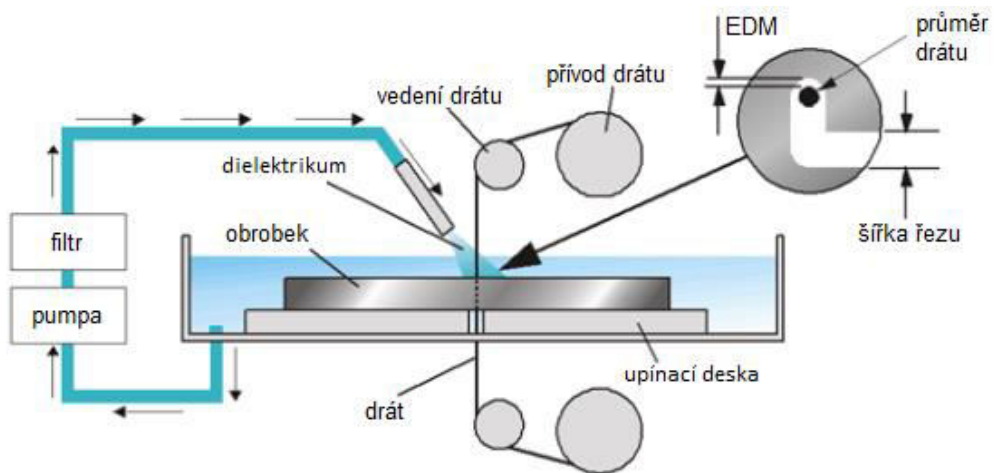
1.2.1 Elektroerozivní rozpouštění (EEDM)

Princip technologie

Elektroerozivní obrábění kombinuje vlastnosti ECM a EDM prostřednictvím elektrických výbojů v elektrolytech. Díky této kombinaci se dosáhne vysoké rychlosti odebírání materiálu. EEDM našla širokou škálu uplatnění například u technologie řezání drátem, vrtání děr a obrábění kompozitů [1].

Příklad využití technologie

Obráběcí zařízení pro řezání drátem s EEDM, neboli elektroerozivní drátové řezání (EEDWM), zobrazeno na obrázku 9, využívá jako obráběcí médium pulzní napětí a kapalné elektrolyty. Rychlost posuvu nástroje, amplituda vibrací a fázový úhel určují okamžitou šířku mezery obrábění a tím i intenzitu a trvání fází ECM a EDM během EEDWM. Výboje EDM se objevují na náhodných místech v mezerách mezi nástrojem a obrobkem [13].



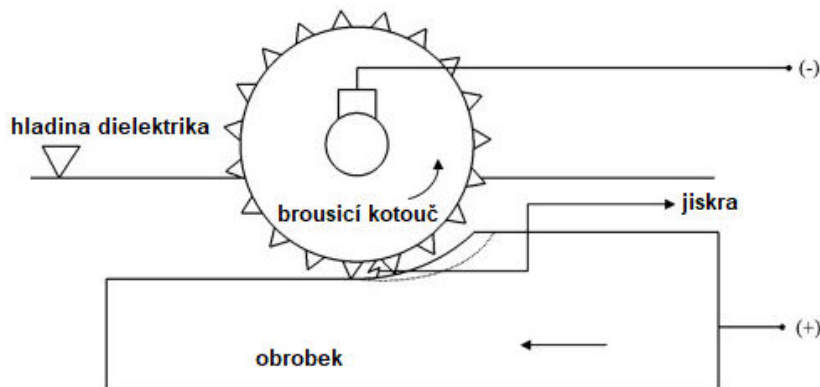
Obrázek 9 – princip EDWM [13]

1.2.2 abrazivní elektroerozivní broušení (AEDG)

Princip technologie

Abrazivní elektroerozivní broušení (AEDG) je hybridní proces, který kombinuje EDM a broušení pro obrábění elektricky vodivých tvrdých materiálů [14]. V procesu AEDG byla kovová nebo grafitová elektroda, použitá v procesu elektroerozivního broušení (EDG), nahrazena kovovým brusným kotoučem (obrázek 10) [1].

EDM v tomto procesu značně snižuje odporové síly působící na brousící kotouč, snižuje opotřebení brousícího kotouče [1].



Obrázek 10 – princip AEDG [15]

Rychlost odebrání materiálu

Díky mechanické složce odebrání materiálu u metody AEDG je dosaženo až pětinašobné rychlosti odstraňování materiálu než je tomu u EDM, tedy až $4000 \text{ mm}^3/\text{min}$. S rostoucími otáčkami se zvyšuje podíl erozivní složky na celkovém objemu odebraného materiálu [1].

Aplikace technologie AEDG

Technologie AEDG se využívá především pro obrábění supertvrdých materiálů jako je:

- polykrystalický diamand
- průmyslová keramika
- slinuté karbidy
- kovové kompozity

AEDG naopak není vhodné pro obrábění tenkých a křehkých součástí, u kterých tlak brousícího kotouče může způsobit poškození [1].

Výhody technologie AEDG

- obrábění tvrdých a odolných materiálů
- vyšší obráběcí rychlost než u EDM

Nevýhody technologie AEDG

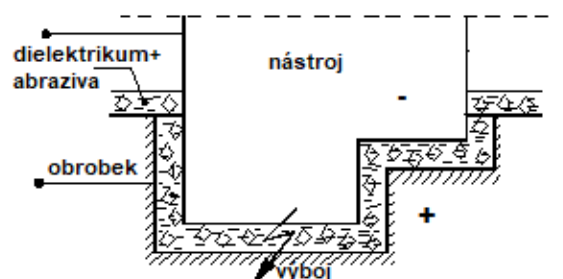
- není vhodné pro obrábění tenkých a křehkých obrobků
- problémy s filtrací a likvidací dielektrika
- vyšší pořizovací cena technologie
- vyšší provozní náklady

1.2.3 Abrazivní elektroerozivní obrábění (AEDM)

Princip technologie

Abrazivní elektroerozivní obrábění (AEDM) je technologie, která je kombinace EDM, kde jsou do dielektrika přidány abrazivní částice, jako například práškový karbid křemíku, které v této technologii zastávají mechanickou část obrábění (obrázek 11) [1].

Přidáním prášku karbidu křemíku (SiC) do dielektrika, důsledkem čehož se zvětšuje velikost mezery mezi nástrojem a obrobkem, se snižuje elektrický odpor. Důsledkem toho se zvětšuje rozptyl elektrických výbojů.



Obrázek 11 – princip AEDM [16]

Výsledná kvalita povrchu

Přimíchání abrazivního prášku do dielektrika umožňuje technologii AEDM dosáhnout zrcadlového vzhledu povrchu složitých tvarů a vytváří rovnoměrně tepelně

ovlivněnou vrstvu bez trhlin. Metodou AEDM dochází k tvorbě záпустky bez nutnosti odstranění postižené vrstvy, to znamená bez jejího leštění [1, 16].

Aplikace technologie AEDM

Technologie AEDM nemá velké spektrum využití. Používá se především k výrobě tvárných výlisků, kde již není potřeba odstranění tepelně ovlivněné vrstvy mechanickým leštěním [1].

Výhody technologie AEDM [1, 16]

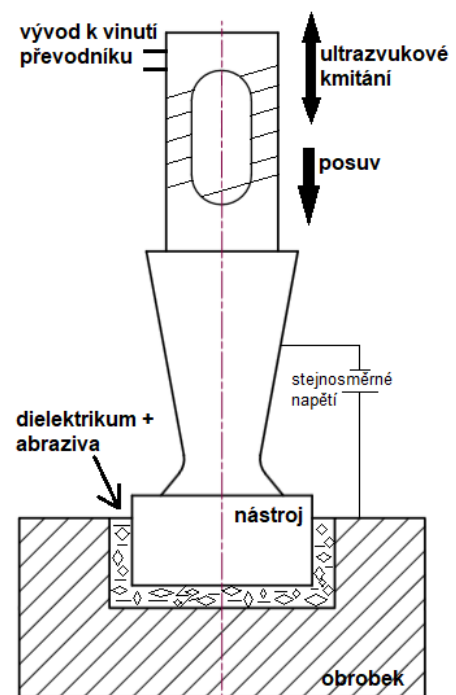
- zrcadlový lesk výsledného povrchu
- eliminace tepelně ovlivněné vrstvy
- výsledný povrch bez prasklin
- lze obrábět složité tvary

Nevýhody technologie AEDM [1, 16]

- nízká obráběcí rychlost
- nákladný provoz

1.2.4 Ultrazvukem asistované elektroerozivní obrábění (EDMUS)

Technologie EDMUS je kombinací EDM a ultrazvukového obrábění (USM). Díky spojení těchto technologií do jednoho obráběcího procesu dochází ke značnému zvýšení produktivity tohoto obráběcího procesu oproti jednotlivým technologiím při stejných obráběcích podmínkách [1, 17]. Princip technologie (obrázek 12) je podobný principu technologie USMEC. Na rozdíl od USMEC se ovšem místo elektrolytu, společně s abrazivem jako obráběcí medium, přivádí do prostoru mezi obrobek a nástroj dielektrikum (například deionizovaná voda). Chaotický pohyb abraziv, způsobený kmitáním nástroje, navíc výrazně přispívá k odstraňování nataveného materiálu způsobeného EDM a tím nejen že urychluje obrábění, ale také vyhlazuje povrch od mikrotrhlin, což vede k zvýšení únavové životnosti obráběných dílů [1, 18].



Obrázek 12 – princip EDMUS [17]

Rychlost odebírání materiálu

Použití ultrazvukových vibrací během EDM výrazně zvyšuje rychlost odebrání materiálu. U metody EDMUS je obráběcí rychlost přibližně 2x vyšší než u nekonvenčního EDM [1, 18].

Výsledná kvalita povrchu

Metodou EDMUS lze dosáhnout výsledné drsnosti povrchu 0,08 - 0,5 Ra, což je 2 - 3x nižší drsnost povrchu, než u samostatného EDM. Drsnost povrchu, stejně tak jako rychlost odebírání materiálu, roste se zvyšováním přivedeného elektrického napětí, amplitudy vibrací nástroje a hustotou elektrických výbojů [1, 18].

Aplikace technologie EDMUS

EDMUS nalézá své uplatnění v oblasti, kde se využívají pevné a tvrdé materiály a kde je žádoucí co nejmenší poškození obráběného povrchu. Využívá se například pro vrtání chladících otvorů a malém průměru na lopatkách některých turbín. Kvůli EDM v procesu je tato technologie omezena pouze na obrábění vodivých materiálů. Pokud ovšem místo EDM zkombinujeme USM s některou jinou metodou využívanou pro tepelné erozivní obrábění, jako například LBM nebo PJM, lze obrábět i nevodivé materiály, například keramiku nebo metalokeramiku (slitiny kovu a keramiky) [19].

Výhody technologie EDMUS

- oproti EDM několikanásobně vyšší rychlost obrábění
- výsledný povrch je bez mikrotrhlin
- dosahována nízká drsnost povrchu
- tvar elektrody není takřka ničím omezený

Nevýhody technologie EDMUS

- omezení na vodivé materiály
- vysoké náklady na provoz
- vysoká pořizovací cena

1.2.5 Elektrochemické erozivní broušení (ECDG)

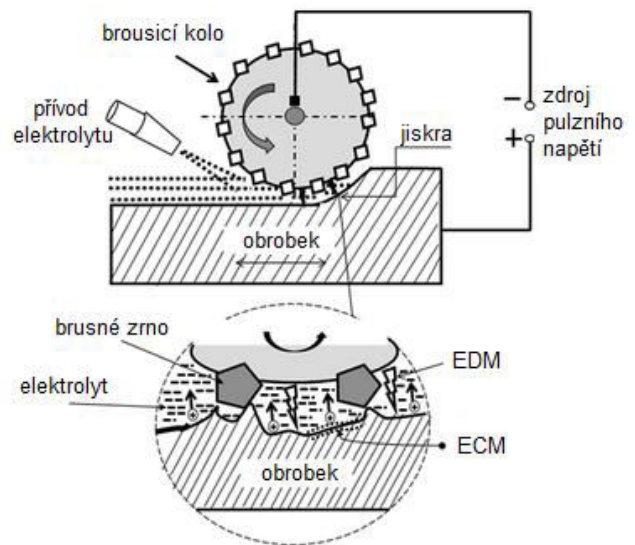
Princip technologie NaNO_3

Elektrochemické erozivní broušení kombinuje EDM, ECM a mechanické broušení. Jak je vidět na obrázku 13, brousící kotouč je připojen na záporný pól, zatímco obrobek je připojen na kladný pól zdroje pulzního elektrického stejnosměrného napětí. Elektrolyt je tvořen roztokem směsi NaNO_3 , NaNO_2 , NaPO_4 a KNO_3 a je přiváděn do prostoru mezi nástroj a obrobek. Rotující brousící kotouč je nastaven do polohy hloubky řezu a vykonává pouze rotační pohyb, zatímco obrobek se konstantní rychlostí posouvá. K odstraňování materiálu dochází všemi způsoby najednou. Zároveň zde probíhá elektrochemické rozpouštění povrchu obrobku,

mechanické odebrání materiálu díky přítomným brousícím zrnům a také eroze způsobená elektrickými výboji [1].

Rychlost odebrání materiálu

Kombinací všech tří technologií do jednoho procesu výrazně zvyšuje obráběcí rychlost. Procesy se zároveň ovlivňují. Výboje mezi nástrojem a obrobkem přispívají k depasivaci oxidické vrstvy vytvořené na povrchu obrobku během ECM, což urychluje další rozpouštění povrchu. Elektrické výboje také průběžně odstraňují vrstvu iontů, usazených na povrchu kola v důsledku ECD [1].



Obrázek 13 – princip ECDG [20]

Výsledná kvalita povrchu

Technologie ECDG vytváří lepší kvalitu povrchu téměř bez mikrotrhlin a otřepů. Budeme-li do určité míry zvyšovat přivedené napětí, bude se zmenšovat hloubka mikrotrhlin a můžeme také zvýšit rychlost posuvu obrobku a hloubku broušení, při zachování stejných kvalitativních parametrů obrobku [1, 21].

Aplikace technologie ECDG

Aplikace této technologie je stejně, jako u ostatních technologií asistovaných elektroerozivním obráběním, omezena pouze na elektricky vodivé materiály, což značně omezuje její využití. Pro své vlastnosti však nalézá uplatnění u obrábění tvrdých kovových slitin a ocelí a používá se například pro:

- obrábění součástí z těžko obrobitelných materiálů, jako jsou slinuté karbidy, slitiny odolné proti tečení, slitiny titanu nebo kovové komposity
- odstraňování únavových trhlin z povrchu ocelových konstrukcí
- broušení tenkých součástí citlivých na teplo

Výhody technologie ECDG

- vysoká obráběcí rychlost
- eliminace brusných otřepů
- absence poškození tenkých křehkých částí, citlivých na teplo
- dosahována vysoká kvalita povrchu

Nevýhody technologie ECG [1]

- vysoká pořizovací cena technologie

- vysoké provozní náklady
- lze obrábět pouze elektricky vodivé materiály
- problémy s filtrací a likvidací elektrolytu

2. Oblasti využití hybridních technologií

2.1 Důvody aplikace hybridních technologií

Ve všech technologických oblastech průmyslu jde vývoj neustále dopředu. Materiálové inženýrství není výjimkou. Nejen vývoj nových, ale také úpravy stávajících materiálů často znamená další vylepšování jejich vlastností. Tyto materiály se vyznačují vysokou pevností, tvrdostí, houževnatostí a dalšími podobnými vlastnostmi.

Vylepšování vlastností materiálů zároveň znamená vyšší nároky na jejich obrábění. V mnoha případech už konvenční metody obrábění svými vlastnostmi nestačí, nebo by bylo jejich využití ekonomicky nevýhodné. K obrábění těchto materiálů, jako například titanu, nerezové oceli, nimonic a podobných vysokopevnostních tepelně odolných slitin, kompozitů vyztužených vlákny, stelitů (slitin na bázi kobaltu) keramiky a dalších, nelze efektivně využívat klasické obráběcí procesy a nástroje, především kvůli jejich tvrdosti a síle, kterou jsou schopni při obrábění snášet [2].

2.2 Konkrétní využití vybraných hybridních technologií

2.2.1 Využití technologie ECG

Technologie ECG, jak je již zmíněno v odstavci 1.1.1, obecně používá pro obrábění tvrdých a křehkých materiálů a materiálů náchylných k tepelnému poškození. V praxi se metoda používá například pro obrábění obráběcích nástrojů z materiálů, jako jsou slinuté karbidy. Další možnosti uplatnění nalézá proces ECG ve výrobě nástrojů pro lékařství. Na obrázku 14 je ukázka elektrochemického broušení povrchu injekčních jehel.



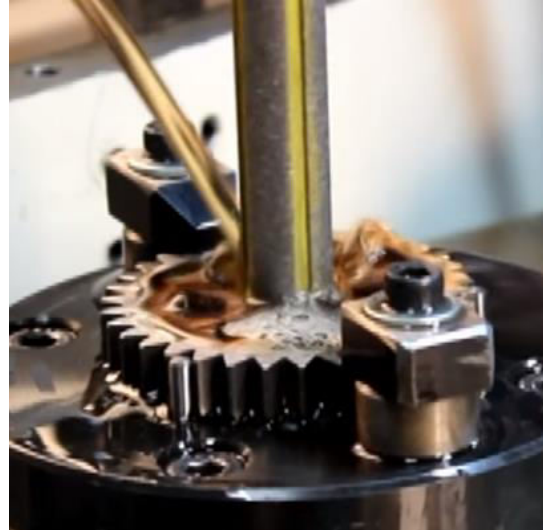
Obrázek 14 – ukázka využití technologie ECG [23]

2.2.2 Využití technologie ECH

Využití elektrocheického honování se od využití klasického honování téměř neliší. Důvod, proč se využívá ECH je jeho produktivita, která dosahuje až 6ti násobku oproti klasickému honování [27].

Honované povrchy jsou extrémně odolné proti opotřebení a odolávají vysokému zatížení. Tato technologie má své uplatnění tam, kde jsou kladeny požadavky na vysokou tvarovou a rozměrovou přesnost. Jak je uvedeno v odstavci 1.1.2, honování se využívá především pro obrábění vnitřních válcových ploch, například hydraulické a brzdové válce nebo válce spalovacích motorů [4].

Na obrázku 15 je ukázka technologie ECH při obrábění vnitřního průměru ozubeného kola.

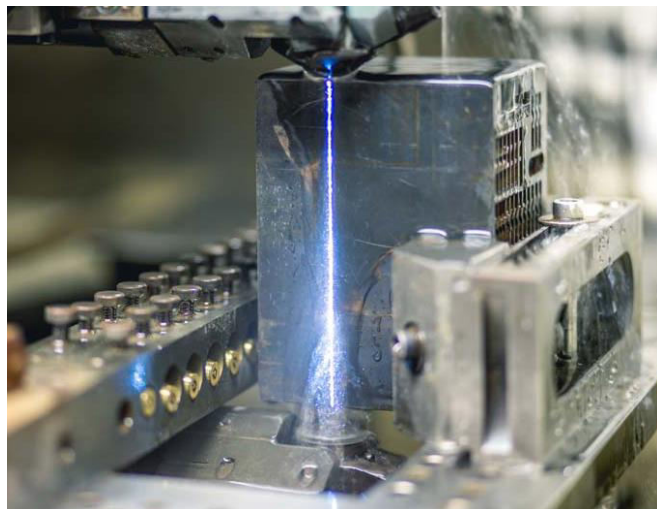


Obrázek 15 – ukázka technologie ECH [28]

2.2.3 Využití technologie EEDWM

Tato technologie nalézá uplatnění při obrábění součástí s vysokými požadavky na přesnost, s velkou geometrickou složitostí, součástí s kvalitním povrchem a s nejmenšími zaoblenými ve všech technologických odvětvích. EEDWM je využívána například k výrobě forem, matic, zdravotnické techniky nebo letecké techniky. Díky zvýšenému výskytu tvrdých a pevných materiálů ve všech oblastech strojírenství, se technologie EEDWM stále častěji integruje do sériové výroby [24].

Na obrázku 16 je zobrazeno obrábění pomocí metody EEDWM. V tomto případě není obrobek ponořen celý do lázně dielektrika, ale dielektrikum je přiváděno přímo do místa obrábění.



Obrázek 16 – ukázka technologie EEDWM [29]

3. Srovnání s ostatními výrobními metodami

Vzájemné srovnání technologií, které jsou schopny vykonávat stejný technologický proces, je velmi důležité pro finální výběr technologie podle požadavků na obrábění. Mezi nejdůležitější faktory vzájemného srovnání ekvivalentních technologií patří v první řadě cena technologie a náklady spojené s provozem. Dalšími důležitými parametry, kterými se budu v následující kapitole zabývat, jsou především dosažitelná obráběcí rychlost a výsledná kvalita povrchu. Bohužel ne pro všechny výše uvedené hybridní technologie se mi podařilo dohledat všechny potřebné údaje, proto dále uvádím pouze ty technologie, u kterých jsou tyto hodnoty známy.

3.1 ECG vs broušení

Obráběcí rychlost u elektrocheického broušení dosahuje hodnoty až $1600 \text{ mm}^3/\text{min}$, což pro stejné podmínky obrábění odpovídá až 4 x rychlosti obrábění klasickým broušením [1].

Co se týče dosahovaných drsností, tak pro doporučené parametry pro obrábění metodou ECG, dle [1], lze touto technologií dosáhnout drsnosti 0,2 až 0,3 Ra. Výslednou kvalitu povrchu je ale možné správným nastavením vstupních parametrů (rychlost brousícího kola, přivedené elektrické napětí...) ještě zlepšit [1]. Obráběním pomocí klasického broušení lze dosahovat drsností 0,1 až 0,3 Ra [25]. Výsledky jsou shrnuty v tabulce 1.

Tabulka 1 - srovnání parametrů technologie ECG a konvenčního broušení

technologie	MRR [mm^3/min]	Drsnost [Ra]
ECG	1600	0,2 – 0,3
broušení	400	0,1 – 0,3

3.2 ECH vs honování

Obráběcí rychlost u honování se nedá vyjádřit číselně v mm^3/min . Pokud ovšem porovnáme rychlosti obrábění ECH a klasického honování, při stejných podmínkách dosahuje ECH až 5x vyšší obráběcí rychlosti, než konvenční honování [1].

Zvýšená rychlost obrábění ECH je i v tomto případě na úkor kvality povrchu. Klasickým honováním lze dosahovat drsností od 0,1 do 0,2 Ra. U ECH se její hodnota pohybuje v rozmezí od 0,2 do 0,8 Ra [1, 26].

Tabulka 2 – srovnání parametrů technologie ECH a konvenčního honování

technologie	MRR [–]	Drsnost [Ra]
ECH	až 5x vyšší	0,2 – 0,8
honování	xxx	0,1 – 0,2

3.3 ECSF vs superfinišování

I v tomto případě nelze přesně stanovit obráběcí rychlosti v mm^3/min . Lze ovšem tyto metody vzájemně porovnat, jako v předchozím případě. Hofy [10] uvádí, že efektivita ECSF je i v tomto případě vyšší, než je tomu u konvenčního superfinišování. Není ovšem uveden přesný poměr.

Stejně jako v předchozích dvou případech, i zde je vyšší obráběcí rychlost doprovázena zvýšením drsnosti výsledného povrchu. U konvenčního superfinišování je možné dosáhnout drsnosti až 0,05 Ra [26]. U elektrochemického superfinišování se spodní hranice dosahovaných drsností pohybuje okolo 0,65 Ra [10].

Tabulka 3 - srovnání parametrů technologie ECSH a konvenčního superfinišování

technologie	MRR [–]	Drsnost [Ra]
ECSF	vyšší	až 0,65
superfinašování	xxx	až 0,05

3.4 USMEC vs ECM

Samotnou metodou ECM lze dosahovat relativně vysokých obráběcích rychlostí, a to až $1500 \text{ mm}^3/\text{min}$. Metoda USMEC opět umožňuje dosahovat vyšších obráběcích rychlostí, než u samotného ECM [1], ovšem její přesnou hodnotu se mi nepodařilo dohledat.

I zde hybridní technologie dosahuje vyšších drsností, než je tomu u samotného ECM. Metodou ECM se lze dostat až na hodnotu drsnosti povrchu 0,1 Ra. U technologie USMEC je minimální dosažitelná drsnost 0,4 Ra [1, 7].

Tabulka 4 - srovnání parametrů technologie USMEC a nekonvenčního ECM

technologie	MRR [mm^3/min]	Drsnost [Ra]
USMEC	vyšší	až 0,4
ECM	1500	až 0,1

3.5 AEDG vs broušení

Technologie AEDG je díky kombinaci 3 obráběcích procesů vysoce efektivní obráběcí metoda. Rychlost odebrání materiálu u této technologie dosahuje až $4000 \text{ mm}^3/\text{min}$. Jak již bylo zmíněno v odstavci 3.1, rychlost úběru materiálu u klasického broušení, pro stejné parametry obrábění, je přibližně $400 \text{ mm}^3/\text{min}$, tedy asi 10x nižší [1].

Dosahované drsnosti výsledného povrchu po broušení jsou až 0,1 Ra [25]. U technologie AEDG se mi informace o výsledné drsnosti nepodařilo dohledat.

Tabulka 5 - srovnání parametrů technologie AEDG a konvenčního broušení

technologie	MRR[mm^3/min]	drsnost[Ra]
AEDG	4000	neuvedeno
broušení	400	až 0,1

3.6 EDMUS vs EDM

Technologií EDMUS lze dosáhnout až 2x vyšší obráběcí rychlosti, než je tomu u samotného EDM. Rychlost odebrání materiálu u EDM dosahuje hodnoty až $800 \text{ mm}^3/\text{min}$, tedy obráběcí rychlost technologie EDMUS je přibližně $1600 \text{ mm}^3/\text{min}$ [1].

Technologie EDMUS je jedna z mála hybridních technologií, kde se kombinací procesů nejen zvýšila rychlost obrábění, ale také se zlepšila výsledná drsnost povrchu. Zatímco technologie EDM umožňuje dosahovat drsností 0,2 Ra, u technologie EDMUS je to 2 až 3 krát nižší hodnota, tedy přibližně 0,08 Ra [1].

Tabulka 6 – srovnání parametrů technologie EDMUS a nekonvenčního EDM

technologie	MRR[mm^3/min]	drsnost[Ra]
EDMUS	1600	0,08
EDM	800	0,2

Závěr

Hybridní technologie nejsou novinkou posledních několika let. Už podle inormačních zdrojů mé práce je vidět, že v povědomí jsou tyto technologie již několik desetiletí. Nyní ovšem tyto technologie nalezají stále častější uplatnění nejen v sériových výrobcích, ale prostě kdekoli, kde, jak bylo řečeno již v úvodu, klasické způsoby obrábění už nestačí.

Mým cílem, respektive cílem této práce, bylo roztřídit a shrnout informace o těchto technologiích. Nesnažil jsem se pouze napsat roztřídění hybridních technologií a popsat jejich technické parametry a možnosti využití. Chtěl jsem případné čtenáře této práce uvést do problematiky „od nuly“, aby i člověk, který o tomto tématu slyší poprvé, jako jsem byl i já, když jsem si téma vybíral, pochopil všechny probíhající principy, které jsou nedílnou součástí jednotlivých procesů.

Pro tuto práci jsem využil relativně hodně zdrojů a mnoho dalších jsem ani nepoužil, nicméně většina těchto zdrojů popisuje pouze zlomek z celé problematiky hybridních technologií. Kompletních informačních zdrojů, které obsahují souhrnné a rozsáhlé informace o těchto technologiích, je jen velmi málo a v českém jazyce ještě méně.

V tomto ohledu vidím největší přínos mé práce. Seskupení a zpracování informací o této problematice může být přínosem nejen jako informační a vzdělávací materiál, ale i například jako „průvodce“ při volbě obráběcí technologie pro konkrétní technologický proces.

Seznam použitých zkratek

Zkratka	anglický význam	český význam
AEDG	Abrasive electrodischarge grinding	abrazivní elektroerozivní broušení
AEDM	Abrasive electrodischarge machining	abrazivní elektroerozivní obrábění
EAP	Electrochemical asisted processes	elektrochemicky asistované procesy
EBM	Electron beam machining	obrábění elektronovým paprskem
ECB	Electrochemical buffing	elektrochemické leštění
ECD	Electrochemical dissolution	elektrochemické rozpouštění
ECDG	Electrochemical discharge grinding	elektrochemické erozivní broušení
ECG	Electrochemical grinding	elektrochemické broušení
ECH	Electrochemical honing	elektrochemické honování
ECM	Electrochemical machining	elektrochemické obrábění
ECS	Electrochemical superfinishing	elektrochemické superfinišování
EDG	Electrodischarge grinding	elektroerozivní broušení
EDM	Electrodischarge machining	elektroerozivní obrábění
EDMUS	EDM with ultrasonic assistance	ultrazvukem asistované elektroerozivní obrábění
EDWM	Electroerosion dissolution wire machining	drátové řezání s EDM
EEDM	Electroerosion dissolution machining	elektroerozivní rozpouštění
IBM	Iont beam machining	obrábění iontovým paprskem
LBM	Laser beam machining	obrábění laserovým paprskem
MRR	Material removal rate	obráběcí rychlost
PJM	Plasma beam machining	obráběním proudem plasmy
TAP	Thermal assisted processes	tepelně asistované procesy
USM	Ultrasonic machining	ultrazvukové obrábění
USMEC	Ultrasonic machining with ECM	ultrazvukem asistované elektrochemické obrábění

Zdroje:

- [1] EL-HOFY, Hassan. *Fundamentals of machining processes: conventional and nonconventional processes*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2014. ISBN 978-1-4665-7702-2.
- [2] MCGEOUGH, J. A. *Principles of electrochemical machining*. New York: Halsted Press Division, Wiley, [1974]. ISBN 0470584130.
- [3] RAJURKAR, K. P. *Research and technological developments in nontraditional machining: presented at the Winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers*. Chicago, Illinois, November 27-December 2, 1988. New York, N.Y. (345 E. 47th St., New York 10017): ASME, c1988. PED (Series), vol. 34.
- [4] R. Neugebauer, C. Hochmuth, R. Schneider *Adaptronic Form Honing – Manufacturing Methods for Compensating Cylinder Bore Distortions* [prezentace]. Berlin, 27. - 28. June 2012.
- [5] Kozak, J.; Rajurkar, P.K. *Hybrid Machining Process Evaluation and Development*. Second International Conference on Machining and measurements of Sculptured Surfaces. Krakow, 2000; 501-536.
- [6] Bhattacharyya, B.; Malapati, M.; Munda, J.; Sarkar, A. *influence of tool vibration on machining performance in electrochemical micromachining of copper*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007; 335-342.
- [7] NICOARA D.; HEDES A.; SORA I. *Ultrasonic enhancement of an electrochemical machining process*. The 5th WSEAS International Conference on Applications of Electrical Engineering. Prague, 2006; 213–218.
- [8] BACHMANN, F. *Hybride Prozesse–Neue Wege zu anspruchsvollen Produkten*. In: *Aachener Werkzeugmaschinen Kolloquium–Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik*. Aachen. 1999; 243-278.
- [9] Datta, M.; Landolt, D. *Electrochemical saw using pulsating voltage*. Journal of Applied Electrochemistry. November, 1983.; 13:795–801.
- [10] Hofy, H.A-G. EL. *Characteristics of pulsed EC-superfinishing*. Alexandria. 1990 29(1):83–100.

- [11] Ultrasonic machining process (USM); Ultimate core concepts of „ENGINEERING“. *Ultrasonic machining process (USM) [online]*; Encyclopedia of engineering. August, 2014; Dostupné z: <http://www.mechscience.com/ultrasonic-machining-process-usm-concept-of-ultrasonic-machining-process-usm/>.
- [12] HUMÁR, A. *Technologie obrábění - 3. část*. Studijní opora VUT v Brně, 2005.
- [13] *Wire EDM (Wire Electro Discharge Machining)* – engineeringclicks.com – The No.1 Mechanical Design Engineering Portal [online]. 2018; dostupné z: <https://www.engineeringclicks.com/wire-edm/>.
- [14] Rajurkar, K. P., Wei, B. Kozak, J., and Nooka, S. R., *Abrasive Electrodischarge Grinding of Advanced Materials*. International Symposium for Electromachining, Lausanne, Switzerland, 1995; pp. 863-870.
- [15] Kozak, J. *Abrasive electro-discharge grinding (AEDG) of advanced materials* Archives of Civil and Mechanical Engineering, II / 2002, pp. 83-101.
- [16] ISAKOVA, R. B.; MOROZ, I., I. *Electrochemical Discharge Machining*. Proceedings Conference On “ECHO-69”, Tula, 1969 pp.75-79.
- [17] Garn, R.; Schubert, A.; Zeidler, H. *Analysis of the effect of vibrations on the micro-EDM process at the workpiece surface*. Precision Engineering, 2011; vol. 35, no. 2, p. 364-368.
- [18] Kremer, D.; Ultrasonic machining improves EDM technology, Proceedings of the Seventh International Symposium on Electromachining (ISEM 7), Birmingham, UK, 1983, pp. 67-76.
- [19] Spirakis, J. A.; *Ceramics in a metals world*, Advanced Materials and Processes Inc. Metal Progress. 1987; (3) 48–51.
- [20] Wuthrich, R.; Fascio, V.; *Machining of non-conducting materials using electrochemical discharge phenomena*. International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2005; 45, 1095–1108.
- [21] *Journal of micromechanics and microengineering: structures, devices, and systems*. Bristol, England: IOP, 1990.
- [22] JAIN, V.K.; *Advanced machining processes*. Twentieth repr. New Delhi: Allied Publishers, 2013.

[23] *Nekonvenční metody obrábění*. MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. Říjen 2007, č. 10, s. 58. [online]. [cit. 2011-20-05]. Dostupné z <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-2-2.html>.

[24] Co je to drátové řezání (drátové EDM)? [online]; dostupné z: <http://www.dcam.de/cms/cs/content/co-je-dr%C3%A1tov%C3%A9-%C5%99ez%C3%A1n%C3%AD-dr%C3%A1tov%C3%A9-edm>.

[25] Dillinger, J.; *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Praha: Europa-Sobotáles, 2007. ISBN 978-80-86706-19-1.

[26] *Honování; ELUC* [online], dostupné z: <https://eluc.kr-lomoucky.cz/verejne/lekce/1384>.

[27] Kocman K.; Prokop, J. *Technologie obrábění. 2. vydání*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.

[28] *Honing machine and process* – YouTube. YouTube [online]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=0WDzcoeneBc&t=21s>.

[29] *How Wire EDM Works*: Missouri's Wire EDM machine shop. Absolute Wire EDM [online]. dostupné z: <http://www.absolutewireedm.com/wire-edm/works/>.