

Technologie elektroerozivního drátového řezání (WEDM) - zásadní technologická operace v mnoha výrobních odvětvích



Autor: Ing. Kateřina Mouralová, Ph.D.

Co je elektroeroze

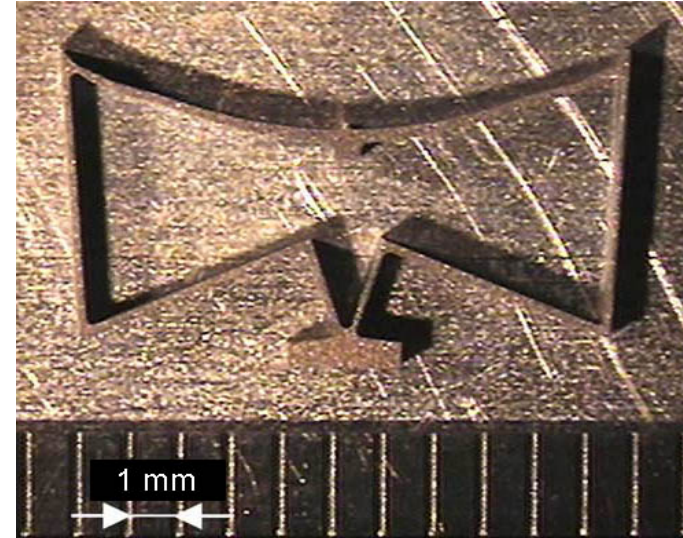
Elektroeroze je fyzikální pochod úběru materiálu, který probíhá na dvou elektrodách současně při ponoření do pracovního média. Tímto médiem je vždy kapalné dielektrikum s vysokým elektrickým odporem. Výboj vzniká v místě nejsilnějšího elektrického napětového pole. Elektrické pole tak uvádí do pohybu kladné a záporné ionty, které se neustále zrychlují a nabývají značné rychlosti. Tento jev vede k vytvoření ionizovaného vodivého kanálu. V tomto stádiu začíná mezi elektrodami protékat elektrický proud a mezi elektrodami vzniká elektrický výboj, který následně vyvolává řadu dalších srážek částic. Vzniká tak plasmové pásmo, kde čas trvání jednotlivého impulsu je asi 10^{-4} až 10^{-6} s.

Co je elektroeroze

Koncentrace energie v místě výboje dosahuje hodnot až $10^7 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2}$. Toto způsobuje tavení a odpaření nemalého množství materiálu na elektrodách. Zároveň v důsledku velmi vysokých teplot dochází k odpařování dielektrika, následně vzniká plynová bublina, jejíž tlak dosahuje rovněž vysokých hodnot. V okamžiku přerušení proudu vyvolá pokles teploty implozi (zhroucení do sebe) této bubliny. Do uzavřeného prostoru proniká dielektrikum a značné dynamické síly vymrští roztavený materiál z kráteru. V důsledku chladícího účinku dielektrika pak tento materiál tuhne a je odváděn proudem dielektrika ve formě drobných kuliček. Krátká doba trvání jednotlivých výbojů způsobuje jejich malou energii (10^{-5} až 10^{-7} J), čemuž odpovídá menší úběr materiálu jedním výbojem, vznik menších kráterů a tím i lepší jakost povrchu.

Co je elektroeroze

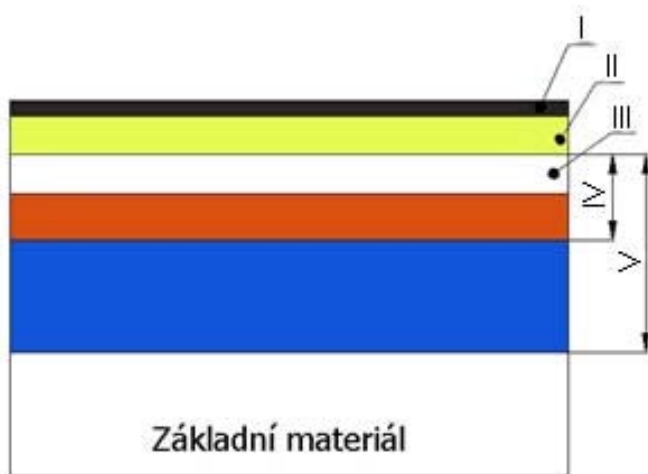
Při elektroerozivním obrábění se nevyskytují klasické řezné síly, což umožňuje obrábět vodivé materiály bez ohledu na jejich tvrdost, houževnatost nebo mechanické vlastnosti. Obrobky je proto možné obrábět na konečné rozměry až po tepelném zpracování. Tímto lze předcházet rozměrovým a objemovým změnám součásti. Elektroerozí lze obrábět širokou škálu materiálů od nástrojů povlakovaných PCD, přes keramiku, kompozitní materiály, křemík, až po měkké slitiny hliníku používané v leteckém průmyslu. Elektroerozivní obrábění umožňuje obrábět měkké materiály bez jakékoliv jejich deformace, protože na obrobek nepůsobí žádné mechanické zatížení. Lze obrábět součásti, které jsou jinými technologiemi náročně obrobitelné nebo je jejich upnutí problematické. Jedná se především o obrobky velmi malých rozměrů s malými vnitřními rádiusy.



Součást obrobená mikro WEDM technologií.
Převzato z: MILLER, Scott F., Enhui SHI, Chen-C. KAO, Albert J. SHIH a Jun QU. Investigation of Wire Electrical Discharge Machining of Thin Cross-Sections and Compliant Mechanisms. *Manufacturing Engineering and Materials Handling Engineering*. 2004.

Povrchová a podpovrchová vrstva po elektroerozi

Obrobená plocha je ovlivněna lokálním vlivem vysokých teplot, které způsobují metalurgické změny v povrchu obrobku, jako jsou trhliny a vypálené kavity. Následné ochlazení pak způsobuje vznik zbytkových napětí, která snižují mez únavy a usnadňují rozrušování povrchu při vzájemné interakci dvou povrchů. To může mít společně s tahovým napětím povrchu v konečné fázi negativní vliv na požadované vlastnosti a životnost výrobku. V případě funkčního požadavku by se měla takto ovlivněná vrstva ještě mechanicky obrobit dokončovacími operacemi např. broušením.



- I - mikrovrstva nasycená částicemi dielektrika, chemická sloučenina vytvořená difúzí,
- II - vrstva obsahující materiál nástrojové elektrody (difúzí nástroje),
- III - vrstva silně nasycená uhlíkem, znovu ztuhlá tavenina, má strukturu charakteru martenzitu,
- IV - pásmo termického ovlivnění, jedná o zakalený a popuštěný výchozí materiál,
- V - pásmo plastické deformace vyvolané tlakovými rázy impulzu.

Povrchová a podpovrchová vrstva po elektroerozi

Rozměry kráteru vzniklého při erozi $\varnothing d_i$ a hloubka h jsou ovlivněny velikostí přivedené energie a délkou výboje. Tyto rozměry mají zásadní vliv na R_a obrobeneé plochy a přesnost rozměrů.

Množství odebraného materiálu určuje vztah:

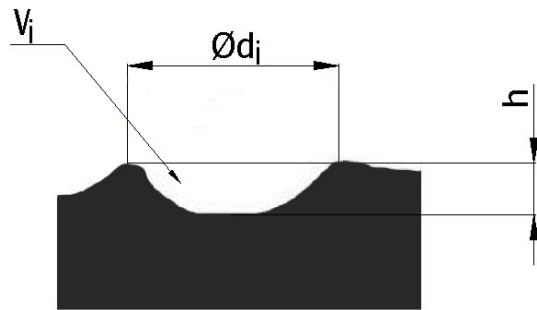
$$V_i = K \cdot W_i$$

kde:

V_i [mm^3]-množství odebraného materiálu,

K [$\text{mm}^3 \text{J}^{-1}$]-součinitel úměrnosti,

W_i [J]-energie výboje.



Energii výboje určuje vztah:

$$W_i = \int_0^t u(t) \cdot i(t) \cdot dt$$

kde:

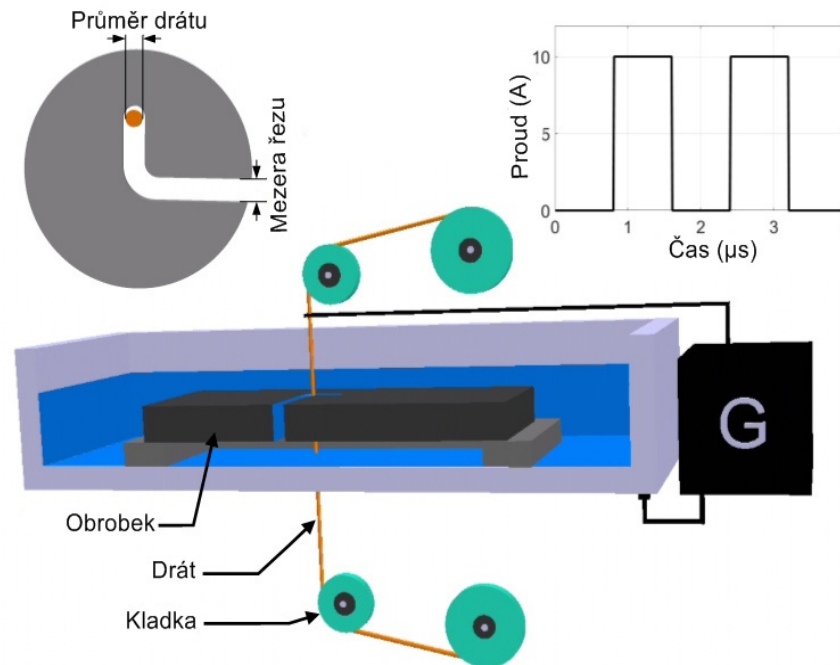
u [V]-napětí,

i [A]-proud,

t [μs]-délka trvání výboje.

Princip WEDM

Nástrojovou elektrodu tvoří tenký drát, který se pro vyloučení opotřebení neustále odvíjí. Elektrickými výboji, vznikajícími mezi drátovou elektrodou a obrobkem se vytváří pracovní mezera a tím i příslušný řez. Elektrická energie je do místa řezu přivedena nástrojovou elektrodou, která je obvykle protékajícím proudem vysoce zatěžována. Pro přesný řez je žádoucí, aby elektroda vstupovala do místa řezu řádně napnutá a vyrovnaná jelikož každá nerovnost na jejím povrchu se odrazí na kvalitě řezu, přesnosti výrobku a stabilitě procesu. Důležité je také neustálé proudění dielektrika do oblasti řezu, kvůli dostatečnému chlazení obráběcí soustavy a vyplavování elektroerozivních zplodin z místa řezu.



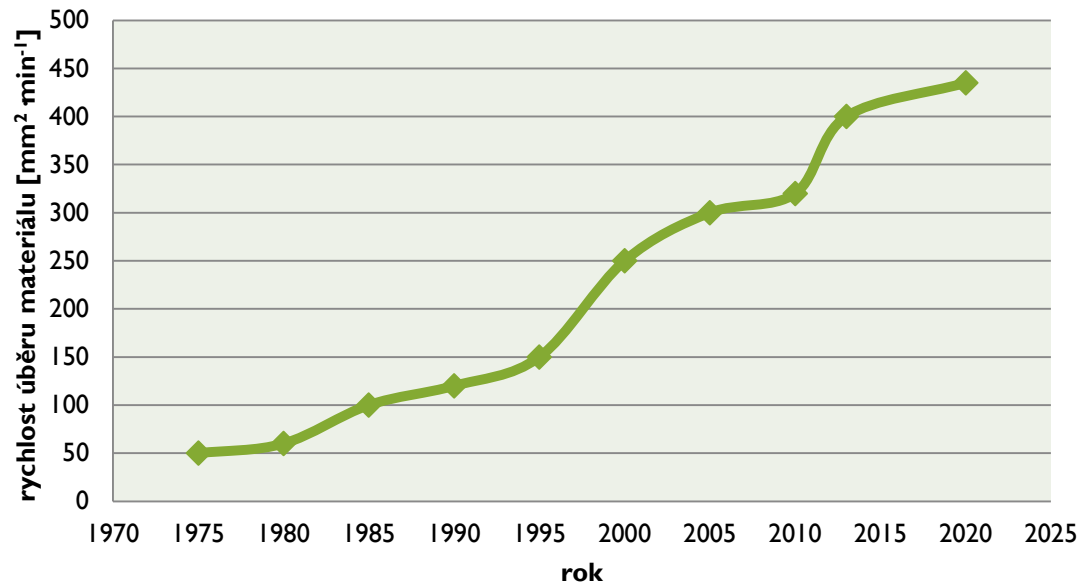
WEDM stroje

Elektroerozivní stroje před 40 lety vypadaly odlišně než stroje v roce 2020. Byly to otevřené konstrukce téměř bez krytování s plným přístupem obsluhy k pracovnímu prostoru. Díky aktivitě bezpečnostních orgánů dostaly stroje kryt hned z několika důvodů. Jedním důvodem je ochrana proti nebezpečnému dotyku, takže pracovní prostor drátu je úplně zakryt. Druhým důvodem je elektromagnetická kompatibilita a ochrana proti rušení. Porovnání rušení při otevření a zavření krytů dává jasně najevo, že toto krytování je zpravidla velmi účinné a pro obsluhu mnohem bezpečnější.



Rychlost úběru materiálu pomocí WEDM

Rychlost úběru materiálu elektroerozivních drátových strojů se od roku 1975 téměř lineárně zvyšovala. Rychlost úběru je brána pro materiál o výšce 50 mm, kdy není kladen požadavek na výsledné Ra obrobeného povrchu.



Převzato z: <http://www.fanucrobomachine.eu>

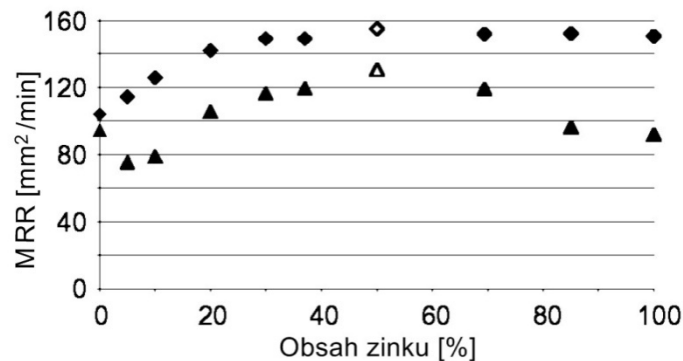
Nástrojové elektrody pro WEDM

- Nástrojové elektrody pro WEDM musí mít velmi vysokou elektrickou vodivost, dostatečnou pevnost v tahu a také vynikající rozměrovou přesnost. Kromě toho je nezbytná i nízká teplota tání, která napomáhá ke snížení času potřebného pro ionizaci dielektrika. Vzhledem ke své vynikající elektrické vodivosti $6,07 \cdot 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ se měď stala prvním materiálem používaným pro výrobu WEDM elektrod, nicméně díky své nízké pevnosti v tahu $200 \text{ až } 250 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ způsobovala velmi problematickou nestabilitu obráběcího procesu. Z toho důvodu se od roku 1970 staly mosazné (Cu 63 %, Zn 37 %) elektrody těmi nejpoužívanějšími. Bylo to díky kombinaci jejich nízkých cen, dobré elektrické vodivosti a vysoké pevnosti v tahu $900 \text{ až } 1000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$. Následným výzkumem byly vyvinuty dráty povlakované například zinkem, mosazí, stříbrem nebo mědí.

Nástrojové elektrody pro WEDM

V současnosti jsou pro obrábění hliníku a málo vodivých materiálů, jako je grafit a keramika používány především povlakované dráty. Tyto elektrody mají jádro z mědi a jsou povlakovány mosazí nebo jsou povlakovány zinkem a mosazí. Pro obrábění titanu a hliníku jsou naopak vhodné elektrody s mosazným jádrem a povlakem zinku a mosazi. Pro obrábění nástrojů povlakovaných PCD je vhodné, aby byl použit drát z mosazi s povlakem zinku.

Kruth ve své studii posoudil vliv obsahu zinku v povlaku drátu na rychlost úběru materiálu, přičemž z obrázku níže je zřejmé, že nárůst MRR je pouze do obsahu 50 % Zn.



Drát	Tloušťka vzorku	
	32.7 mm	150 mm
CuZn _x	◆	▲
Zn povlak na CuZn ₃₇	◆	▲
CuZn ₅₀ povlak na CuZn ₃₇	◇	△

Účinek obsahu zinku v povlaku na max. MRR (drát: $\varnothing 0,25$ mm, obráběný materiál: DIN X210CrW12)

Převzato z: KRUTH, J.-P., et al. Composite wires with high tensile core for wire EDM. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2004, 53.1: 171-174.

Nástrojové elektrody pro WEDM

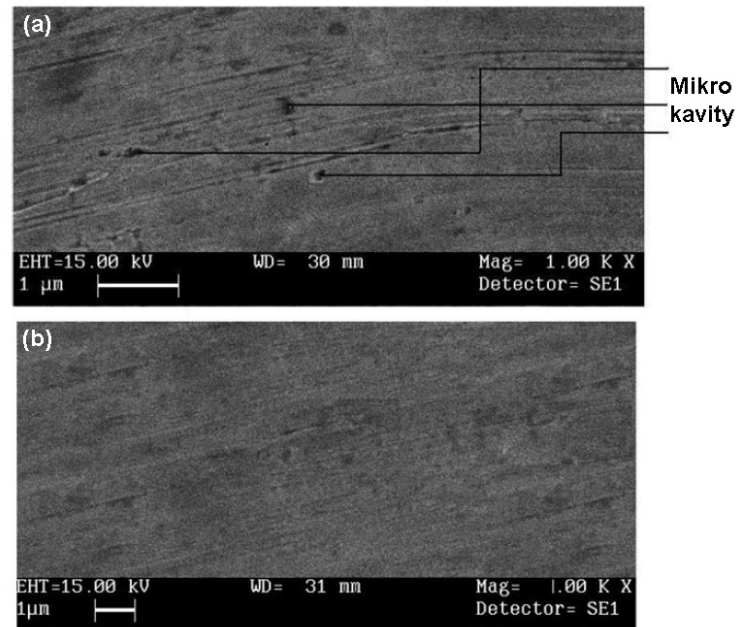
Pro mikroobrábění jsou používány dráty, které mají ocelové jádro s povlakem mědi, mosazi a stříbra. Tyto dráty jsou dodávány od průměru 0,02 mm do 0,1 mm a jejich pevnost v tahu je 2000 N·mm².



Převzato z: http://www.bedra.com/produkte/erodierdraht/index_ger.html

Nástrojové elektrody pro WEDM

Kapoor ve své studii zkoumal účinky hluboké kryogenní ($-184\text{ }^{\circ}\text{C}$) úpravy mosazné drátové elektrody. V důsledku této úpravy byly odstraněny drobné kavity na jejím povrchu, což je znázorněno na obrázku níže. Dále byl autorem zkoumán vliv na elektrickou vodivost drátu a jeho rychlost úběru materiálu při obrábění, přičemž v obou případech bylo zaznamenáno zlepšení.

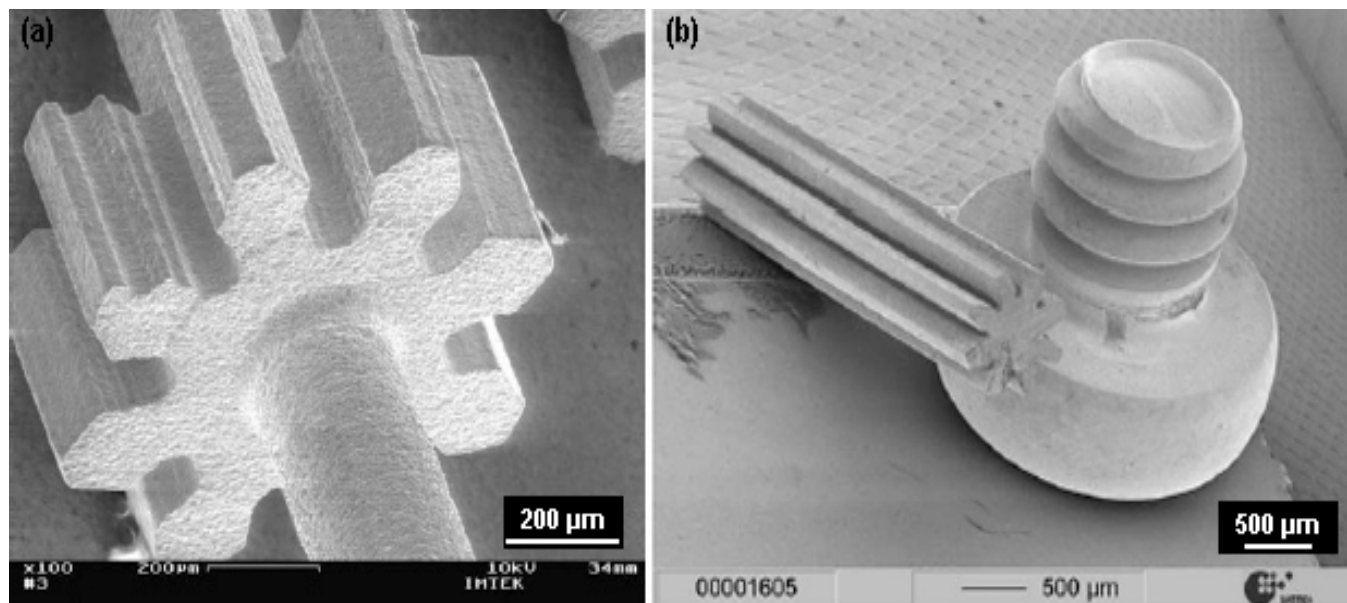


SEM snímek povrchu drátové elektrody (a) před kryogenní úpravou, (b) po kryogenní úpravě.

Převzato z: KAPOOR, Jatinder; SINGH, Sehijpal; KHAMBA, Jaimal Singh. Effect of cryogenic treated brass wire electrode on material removal rate in wire electrical discharge machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2012, 226.11: 2750-2758.

Nástrojové elektrody pro WEDM

Schoth se ve své studii zabýval výrobou mikro komponentů z kovů, keramiky a kompozitních materiálů s využitím elektroerozivního drátového řezání. Pro řezání použil wolframový drát o průměru 0,02 a 0,03 mm, přičemž takto vyrobené díly jsou znázorněny na obrázku níže.

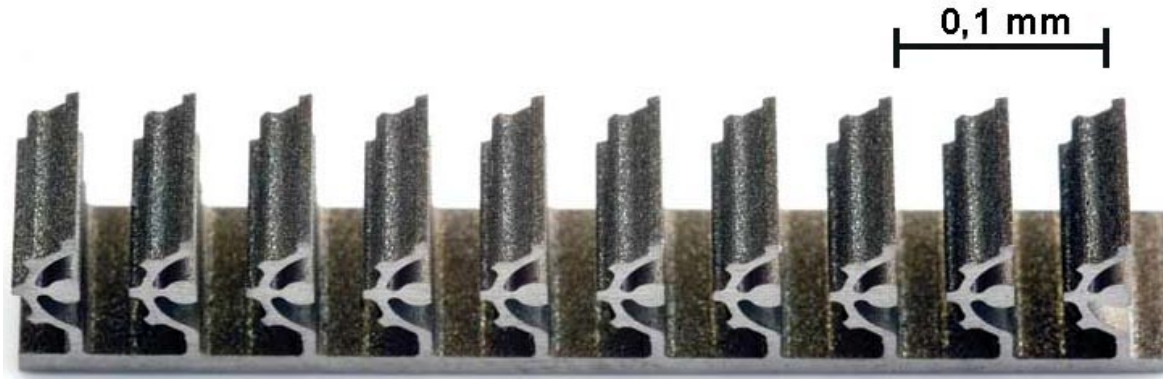


SEM snímek dílu vyrobeného pomocí WEDM obrobeneho wolframovým drátem (a) ozubené kolo s integrovanou hřídelí, (b) ocelové ozubené kolo (šroub nebyl vyroben technologií WEDM)

Převzato z: SCHOTH, A.; FÖRSTER, R.; MENZ, W. Micro wire EDM for high aspect ratio 3D microstructuring of ceramics and metals. *Microsystem technologies*, 2005, 11.4-5: 250-253.

Mikro-WEDM

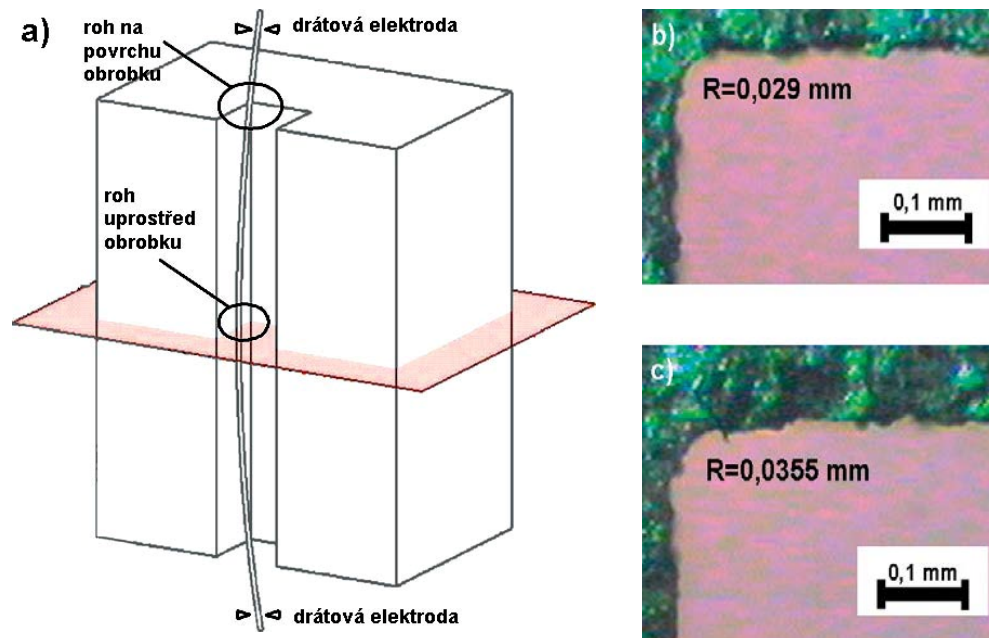
Rozdíl mezi makro- a mikro-WEDM představuje rozdíl ve velikost dílu, který je obráběn. Pokročilý výzkum však nalézá rozdíly také ve velikosti použitého nástroje, způsobu výroby, generátoru impulzů, pohybu v jednotlivých osách, mechanismu řízení mezery řezu a také způsobu přívodu dielektrické kapaliny. Obvykle jsou za mikro-obrobky pro WEDM považovány obrobky menší než 1 mm.



Převzato z: <http://www.xlprecisiontechnologies.co.uk/services>

Mikro-WEDM

Řízení napnutí drátu je pro mikro WEDM klíčové a je stanoveno na základě termo-mechanické analýzy, která vyhodnocuje teplotu v místě řezu a napnutí drátu při obrábění. Optimální nastavení napnutí drátu přispívá ke zlepšení přesnosti obrábění (zejména v rozích) a k méně častému přetrhávání drátové elektrody.

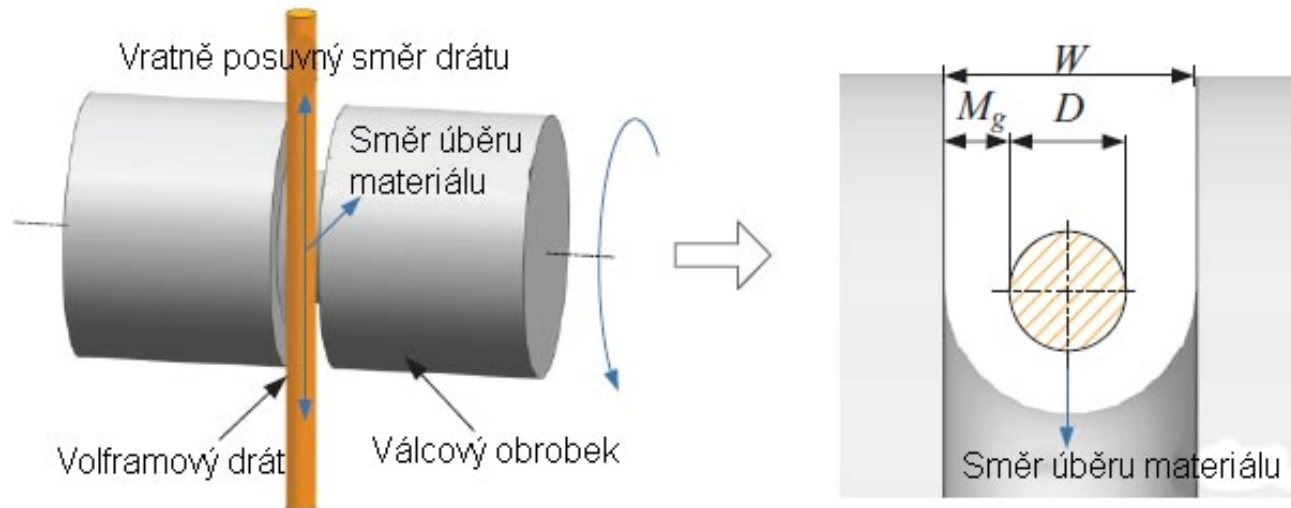


Prohnutí drátu a) model obrobku, b) rádius v rohu na povrchu obrobku, c) rádius v rohu uprostřed obrobku.

Převzato z: HAN, Fuzhu, Gang CHENG, Zhijing FENG a Soichiro ISAGO. Thermo-mechanical analysis and optimal tension control of micro wire electrode. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2008, vol. 48, 7-8, s. 922-931. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2007.10.024.

Válcové mikro-WEDM

Některé mikro-válcové díly, není možné pomocí mikro-WEDM obrábět, protože jejich geometrie to jednoduše neumožňuje. Z toho důvodu byla vynalezena modifikace mikro-WEDM, která využívá vratně posuvný pohyb drátu jako nástroje pro obrábění složitých válcových součástí, přičemž princip této technologie je znázorněn na obrázku níže.

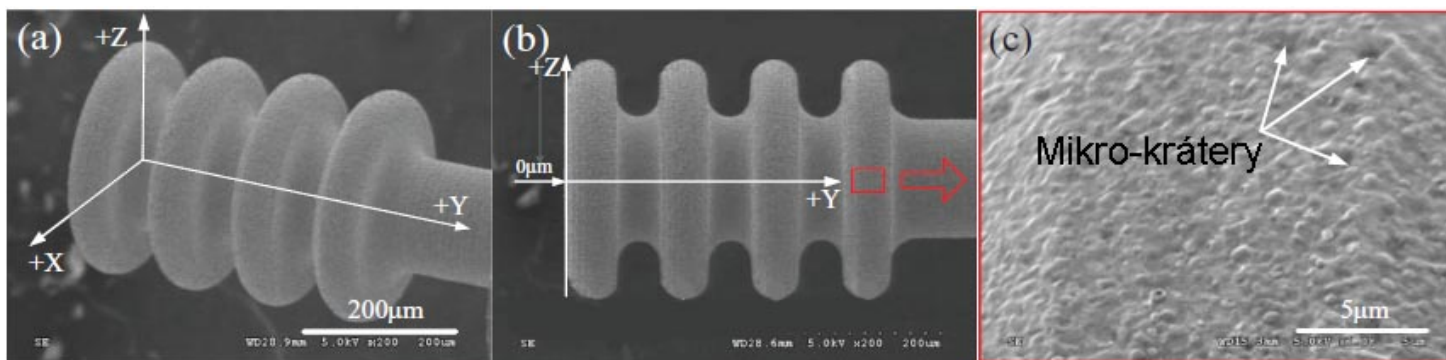


Princip válcového mikro-WEDM, kde W je šířka vyrobené drážky, M_g je mezera řezu a D je průměr drátu.

Převzato z: WANG, Yukui, et al. Fabrication of micro-rotating structure by micro reciprocated wire-EDM. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2016, 26.11: 115014.

Válcové mikro-WEDM

Wang ve své studii pojednává o výrobě mikro-válcových dílů s využitím mikroprocesorů z elektroerozivní drátové rezačky. Pro velmi přesné obrábění bylo nutné zajistit konstantní napětí drátu a vyrobit jednotku pro potlačení vibrací drátové elektrody. V průběhu experimentu byl zkoumán vliv nastavení parametrů obrábění na šířku vyrobené drážky. Mikro-válcová součást byla nakonec úspěšně obrobena s vysokou přesností geometrických tvarů i rozměrů, což je patrné z obrázku níže. Chyby obrábění v axiálním i radiálním směru byly menší než $1,4 \mu\text{m}$ a $2,3 \mu\text{m}$.

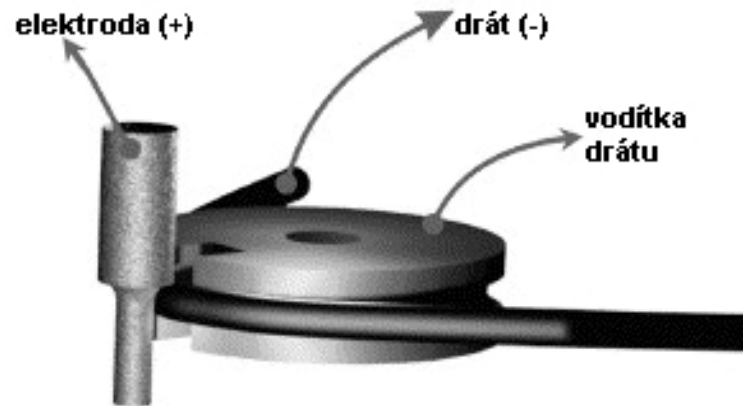


SEM snímky válcové součásti (a) izometrický pohled, (b) čelní pohled, (c) zvětšený pohled.

Převzato z: WANG, Yukui, et al. Fabrication of micro-rotating structure by micro reciprocated wire-EDM. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2016, 26.11: 115014.

Mikro-elektroerozivní drátové broušení – WEDG

Další variantou mikro-WEDM je mikro-elektroerozivní drátové broušení (WEDG), které se používá pro výrobu mikro-elektrod. Princip WEDG technologie je znázorněn na obrázku níže, přičemž erodovací výboje probíhají mezi neustále odvíjejícím se drátem a elektrodou, které jsou od sebe odděleny dielektrickou kapalinou. Drátová elektroda se ve vodítkách pohybuje konstantní rychlostí, obvykle o velikosti $5-10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.



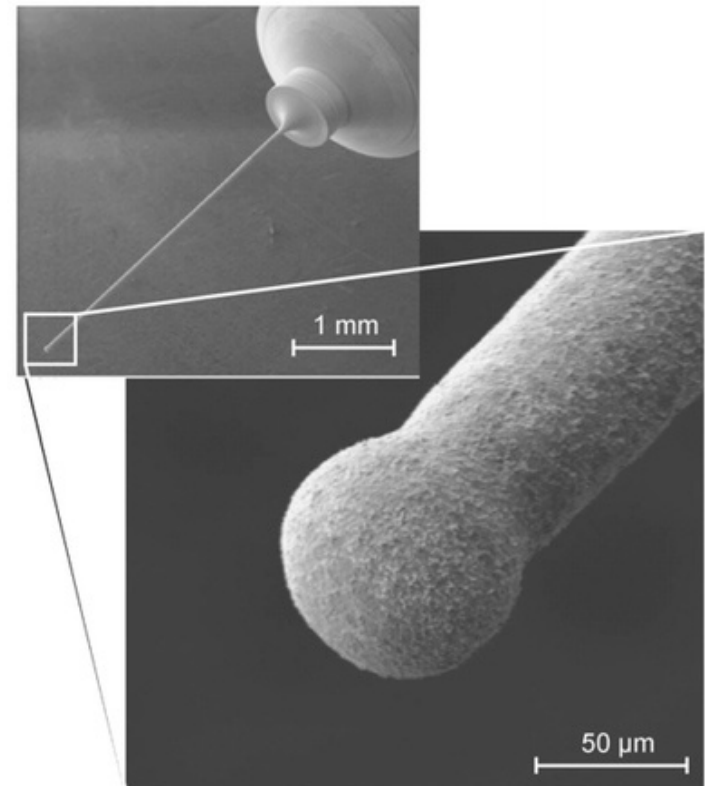
Princip technologie WEDG.

Převzato z: CHERN, Gwo-Lianq, et al. Study on burr formation in micro-machining using micro-tools fabricated by micro-EDM. *Precision Engineering*, 2007, 31.2: 122-129.

Mikro-elektroerozivní drátové broušení – WEDG

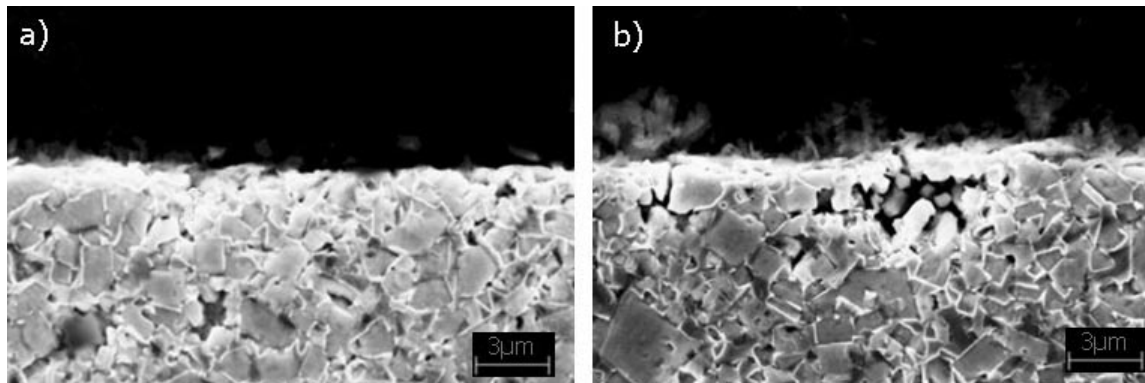
Na vývoji této technologie pracovalo několik vědců, mezi kterými byl i Chern a Uhlmann. Ukázka takto vyrobené součásti je zobrazena na obrázku níže. Jedná se o sondu dotykového senzoru, která je součástí souřadnicového měřicího stroje. Z obrázku je dobře patrné, že byl vyroben symetrický rotační tvar součásti velmi miniaturních rozměrů v řádu mikrometrů.

Mikro-sonda vyrobená pomocí technologie WEDG.
Převzato z: UHLMANN, Eckart; PILTZ, Sascha;
OBERSCHMIDT, Dirk. Machining of micro rotational parts by wire electrical discharge grinding. *Production Engineering*, 2008, 2.3: 227.



Obrábění slinutých karbidů, PCD a CBN pomocí WEDM

Hlavním problémem obrábění slinutých karbidů pomocí WEDM je korodování nebo spálení kobaltového pojiva materiálu v místě řezu. To je obvykle způsobeno velmi vysokou teplotou při erodování a také použitím dielektrické vodní lázně. V důsledku toho vznikají na obrobeném povrchu dutiny, které oslabují integritu materiálu a zkracují životnost takto obrobeného nástroje ze slinutého karbidu. Stejný problém vzniká i při obrábění PCD a CBN materiálů, jejichž pojivo obsahuje kobalt.

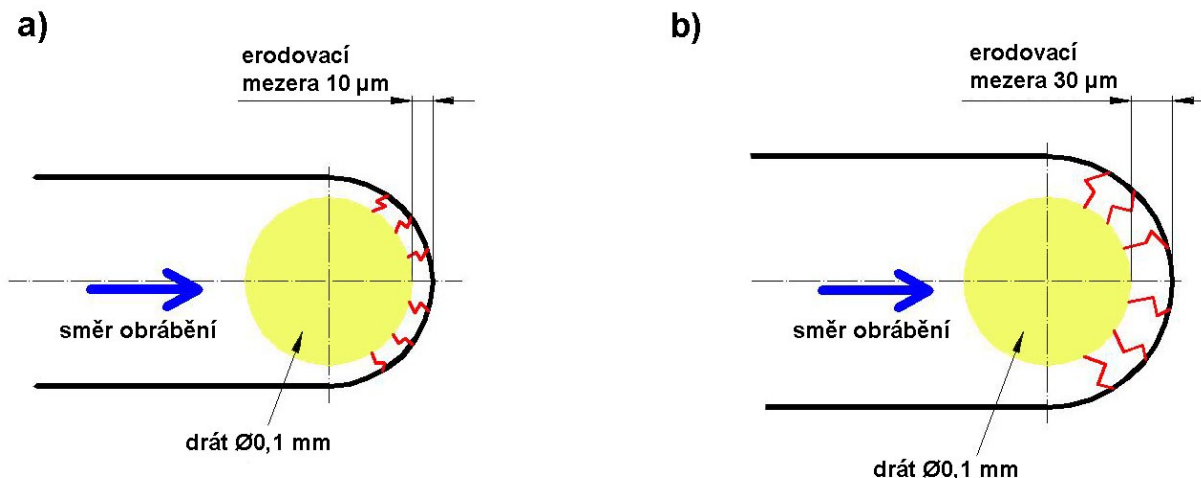


a) obrobek z olejové lázně, b) obrobek z vodní lázně.

Převzato z: LAFORGE, Gilles. Elektroerozivní obrábění v olejové lázni. [online]. [cit. 2018-09-20]. Dostupné z: http://www.gfac.com/fileadmin/user_upload/salesco_czechia/PDF/2012/cz_EDM%20machining%20in%20oil%20offers%20great%20advantages.pdf.

Obrábění slinutých karbidů, PCD a CBN pomocí WEDM

Korodování a spálení kobaltového pojiva lze výrazně omezit použitím dielektrické olejové lázně. Erodivací mezera se při použití olejové lázně výrazně zmenší, protože olej má vyšší elektrický odpor než voda. Zmenšení vzdálenosti mezi drátem a obrobkem umožňuje snížení erodovacího napětí, čímž klesne teplota, které je materiál obrobku při obrábění vystaven. Dále lze dosáhnout menšího rádius při obrábění vnitřních tvarů a tím se přesnost obrábění zvyšuje. K nevýhodám oleje patří zejména vysoká viskozita (při 20°C je viskozita 6,5 mm² · s⁻¹), která snižuje jeho schopnost chlazení. Tím pádem zůstává velká část tepla z erodovacího procesu v drátu, který je tak častěji přerušen přepálením.



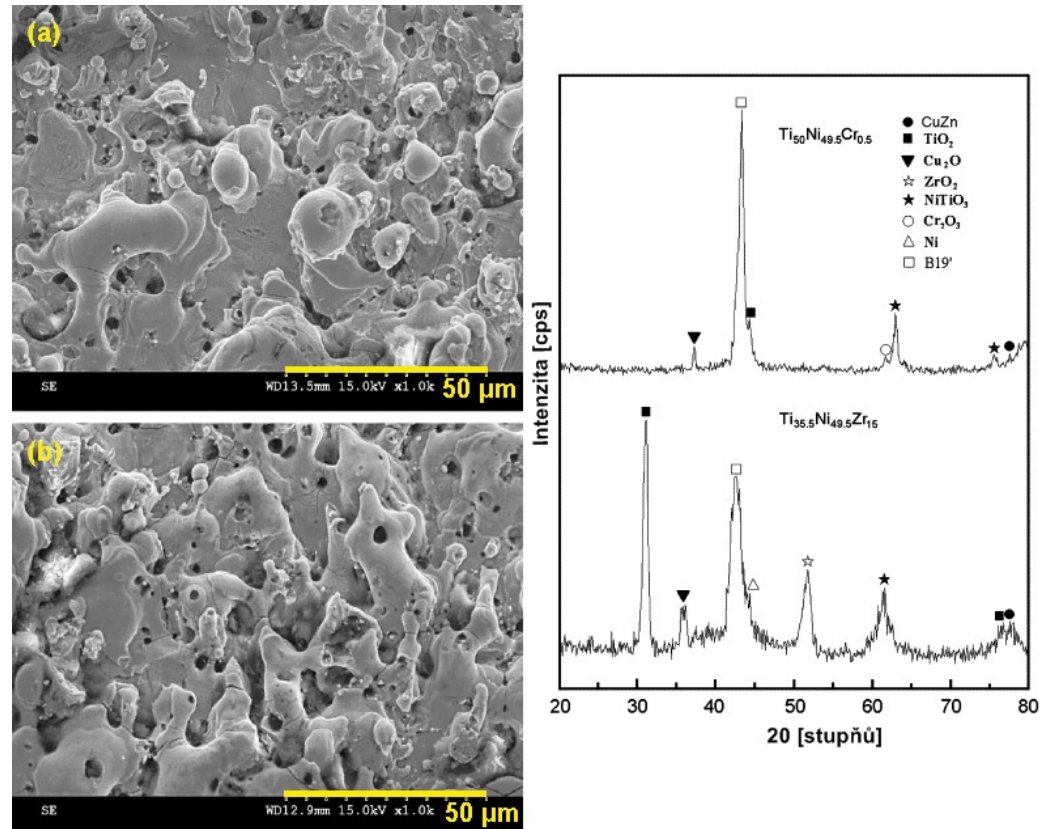
a) obrábění v olejové lázni, b) obrábění ve vodní lázni. Převzato z: MAKINO. [online]. [cit. 2018-09-05]. Dostupné z: <http://www.makino.com>.

Obrábění materiálů s tvarovou pamětí pomocí WEDM

V posledních letech se materiály jako titan-niklové slitiny s tvarovou pamětí a další SMA běžně používají v lékařských a dalších průmyslových odvětvích. Materiály s tvarovou pamětí mají unikátní vlastnosti, jako jsou superplasticita, efekt tvarové paměti, vysoká odolnost proti opotřebení, vysoká odolnost proti korozi, výborná tažnost, vysoká specifická pevnost, dobrá únavová odolnost a vysoká biologická kompatibilita.

Hsieh ve své studii zkoumal charakteristiky WEDM obrábění tříložkové slitiny s tvarovou pamětí TiNiX. Experimentální výsledky ukázaly, že maximální rychlost řezání bez přetržení drátové elektrody u materiálů $Ti_{35.5}Ni_{49.5}Zr_{15}$ a $Ti_{50}Ni_{49.5}Cr_{0.5}$ vykazuje opačný poměr teploty tavení slitiny a tepelné vodivosti. Jakost povrchu (R_a) obrobené slitiny TiNiX se zvyšovala s rostoucí délkou trvání impulzu, což je patrné z morfologie znázorněné na obrázku dále. Slitiny TiNiX po elektroerozivním drátovém řezání stále vykazují dobrou tvarovou paměť, nicméně dochází k mírnému odbourání obnovy tvaru v důsledku přítomnosti přilepku.

Obrábění materiálů s tvarovou pamětí pomocí WEDM



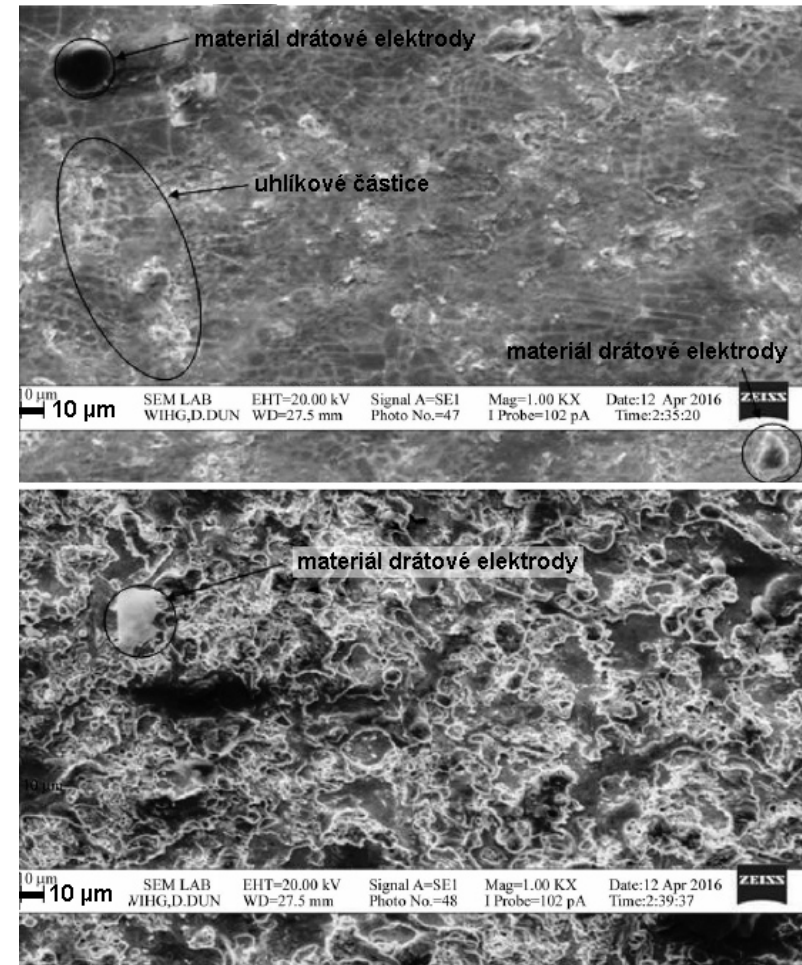
SEM snímky povrchu obrobeného pomocí WEDM a následná rentgenová difrakce (XRD) pro slitiny (a) $Ti_{35.5}Ni_{49.5}Zr_{15}$ a (b) $Ti_{50}Ni_{49.5}Cr_{0.5}$.

Převzato z: HSIEH, S. F., et al. The machining characteristics and shape recovery ability of Ti–Ni–X (X= Zr, Cr) ternary shape memory alloys using the wire electro-discharge machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, 49.6: 509-514.

Obrábění super slitin pomocí WEDM

Super slitiny byly speciálně vyvinuty pro práci za vysokých teplot. Na rozdíl od běžných slitin, které ztrácejí své mechanické vlastnosti při těchto teplotách, jsou super slitiny odolné vůči poklesu mechanických vlastností i creepu.

Obráběním super slitiny Udimet-L605, která se používá hlavně v leteckém průmyslu, se zabýval především Nain. Věnoval se především optimalizaci nastavení parametrů obrábění pomocí plánovaného experimentu dle Taguchiho, provedl optimalizaci hejnem částic a použil lineární a nelineární regresi.



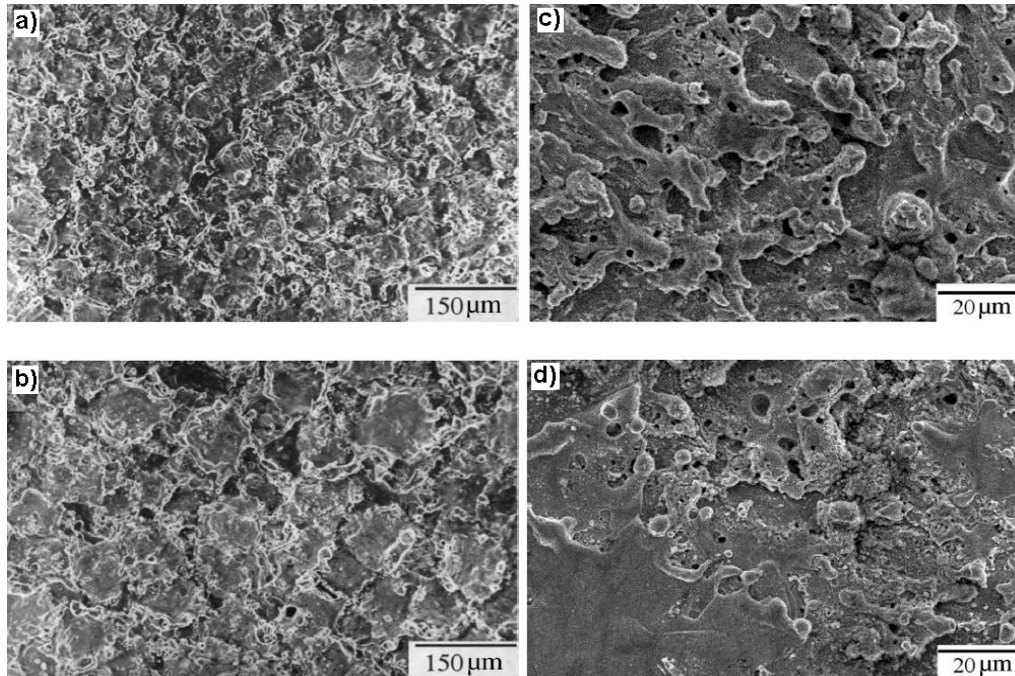
SEM snímky WEDM obroběných povrchů z materiálu Udimet-L605.

Převzato z: NAIN, Somvir Singh; GARG, Dixit; KUMAR, Sanjeev. Evaluation and analysis of cutting speed, wire wear ratio, and dimensional deviation of wire electric discharge machining of super alloy Udimet-L605 using support vector machine and grey relational analysis. *Advances in Manufacturing*, 2018, 6.2: 225-246.

Obrábění pokročilých keramických materiálů pomocí WEDM

WEDM obrábění se také vyvinulo jako jedna z nejslibnějších alternativ pro obrábění moderních keramických materiálů.

Kung ve své studii hodnotil rychlost úběru materiálu a jakost povrchu keramického materiálu na bázi oxidu hlinitého ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$) s tím, že byl zjištěn výrazný vliv parametru Pulse on time na MRR a parametru Discharge current na jakost obrobeného povrchu. Toto zjištění bylo znázorněno v podobě morfologií povrchů (pro Discharge current 5 a 7 A a Pulse on time 1 μs a 5 μs) jednotlivých vzorků na obrázku níže.

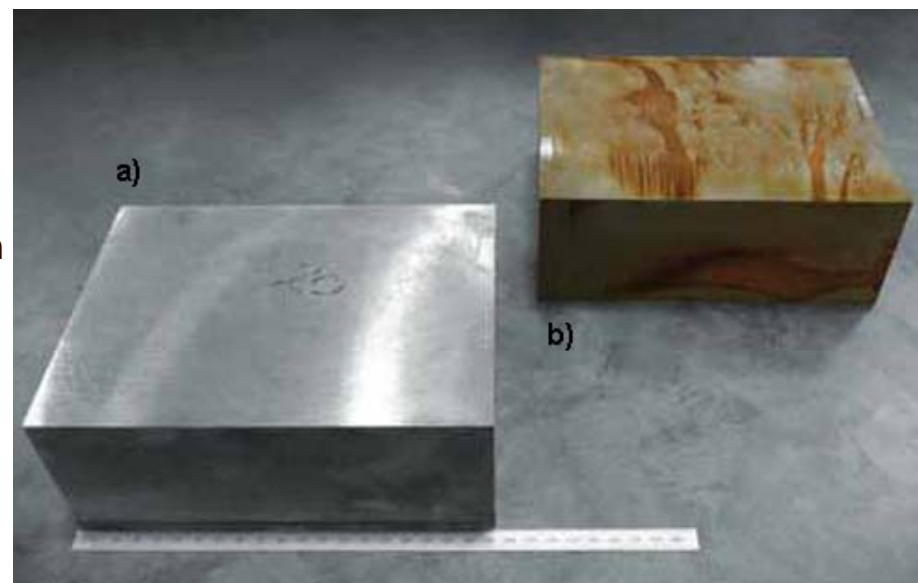


SEM snímek morfologie a) a b) vliv parametru Discharge current (3 A a 7 A), c) a d) vliv parametru Pulse on time (1 μs a 5 μs).

Převzato z: KUNG, Kuang-Yuan; CHIANG, Ko-Ta. Modeling and analysis of machinability evaluation in the wire electrical discharge machining (WEDM) process of aluminum oxide-based ceramic. *Materials and Manufacturing Processes*, 2008, 23.3: 241-250.

Moderní technologie úplného odstranění koroze obrobků

Při elektroerozivním obrábění ve vodní lázni vzniká jako následek elektrochemického procesu oxid železitý, který způsobuje korozi obrobeného materiálu. Při tomto elektrochemickém procesu anoda uvolňuje elektrony a katoda je přijímá. V pracovní nádrži přitom obrobek představuje střídavě jak anodu tak i katodu. Obrobek zapojený jako anoda, uvolňuje volné elektrony dokud neskončí výboj. Tyto elektrony se následně začnou smíchávat s atomy kyslíku v dielektrické kapalině a jsou zpět přitahovány k obrobku, nyní již jako ionty oxidu železitého.

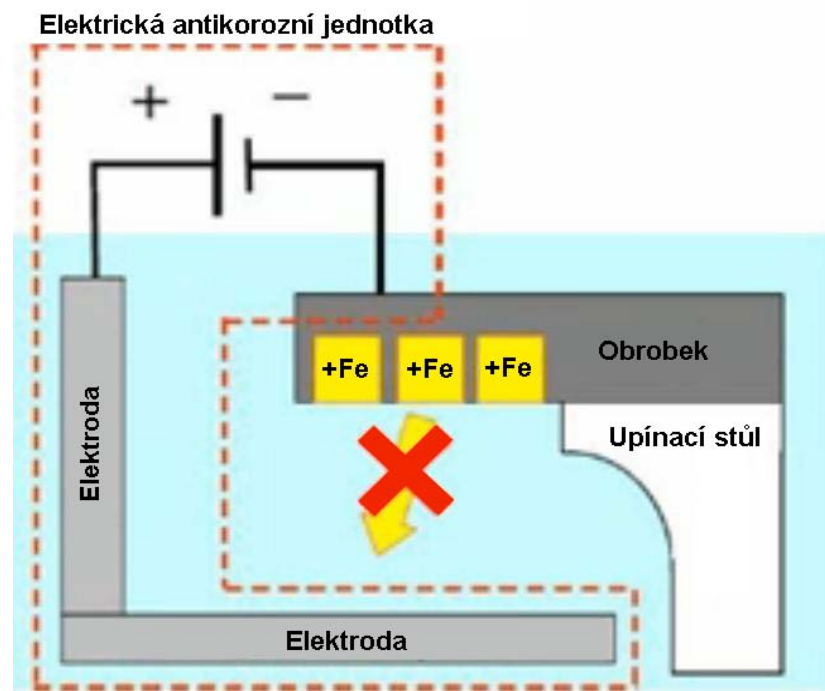


a) obrábění v olejové lázni, b) obrábění ve vodní lázni.

Převzato z: MAKINO. [online]. [cit. 2018-09-05]. Dostupné z: <http://www.makino.com>.

Moderní technologie úplného odstranění koroze obrobků

Použitím střídavého generátoru stroje lze korozi eliminovat, nikoliv však zcela odstranit. Pro úplné odstranění koroze je možné použít elektrickou antikorozní jednotku, která je připojena na obrobek a na elektrody (jsou připevněny na vnitřní stěně nádrže s dielektrickou kapalinou). Antikorozní jednotka vytvoří v obrobku záporný potenciál a kladně nabité ionty železa neodcházejí do dielektrické lázně.



a) obrábění v olejové lázni, b) obrábění ve vodní lázni.

Převzato z: MAKINO. [online]. [cit. 2018-09-05]. Dostupné z: <http://www.makino.com>.



Děkuji za Vaši pozornost