

Elektronové dělo pro svařování v přístrojové technice

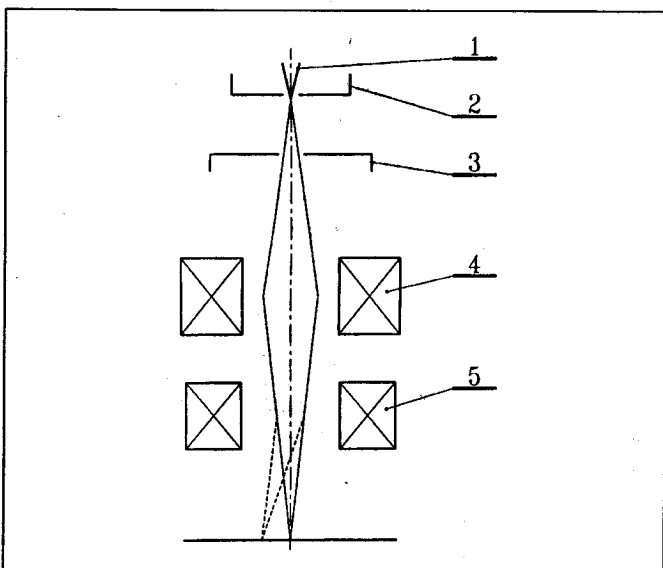
Článek popisuje nové elektronové dělo pracující s urychlujícím napětím 50 kV o výkonu do několika kW určené především pro svařování dílů v přístrojové technice. Stručně je popsána jeho funkce, konstrukční uspořádání a některé zkušenosti s provozem děla.

1. ÚVOD

Fyzikální princip svařování elektronovým svazkem spočívá v přeměně kinetické energie urychlených elektronů v teplo při jejich interakci s pevnou látkou. Podle množství energie dodané za čas na určitou plochu (plošná hustota výkonu) může mít elektronový svazek různé účinky, od pouhého tepelného ovlivnění přes natažení až do odpaření materiálu. Ohřev svazkem elektronů má některé zvláštnosti, které se s výhodou uplatňují při svařování kovových materiálů. Při dopadu na povrch pevné látky i elektrony s vysokou energií (např. 100 keV) proniknou jen do malé hloubky (řádu 10^{-2} mm) pod povrch. Máme-li dostatečnou plošnou hustotu výkonu svazku (10^3 až 10^5 W/cm²), dochází k velmi rychlému zvýšení teploty ve velmi malém objemu materiálu, který se v místě dopadu nejen taví, ale přechází do plynného skupenství. Další elektrony pak pronikají oblastí vyplněnou parami kovu do větší hloubky, kde se proces opakuje. Rychlost pronikání elektronového svazku pod povrch může být mnohonásobně větší než rychlost šíření tepla vedením. Výsledkem je úzká natažená oblast a typický nožovitý tvar průvaru. Uvedené zvláštnosti ohřevu svazkem elektronů dovolují svařovat kovové materiály bez ohledu na jejich tavnou teplotu ve velmi širokém rozsahu tlouštěk s minimální deformací a velkou rychlostí svařování [1].

2. PRINCIP ČINNOSTI

Elektronové dělo je základní částí každé elektronové svářečky a představuje zdroj řízeného elektronového svazku. Základní schéma je na obr. 1. Jako zdroje elektronů se používá termoemisní katoda (1 obr. 1). Pro malé výkony (do několika kW) bývá katoda přímo žhavená z wolframového nebo tantalového drátu, případně pásku. Pro větší výkony se používá katoda plošná z wolframu nebo tantalu žhavená elektrony z pomocné katody, nebo katoda kompaktní (nejčastěji z materiálu LaB_6) žhavená sálavým teplem. Katoda je umístěna na vysokonapěťovém izolátoru a je na ni přiveden záporný pól urychlovacího napětí. Obvykle se používá napětí

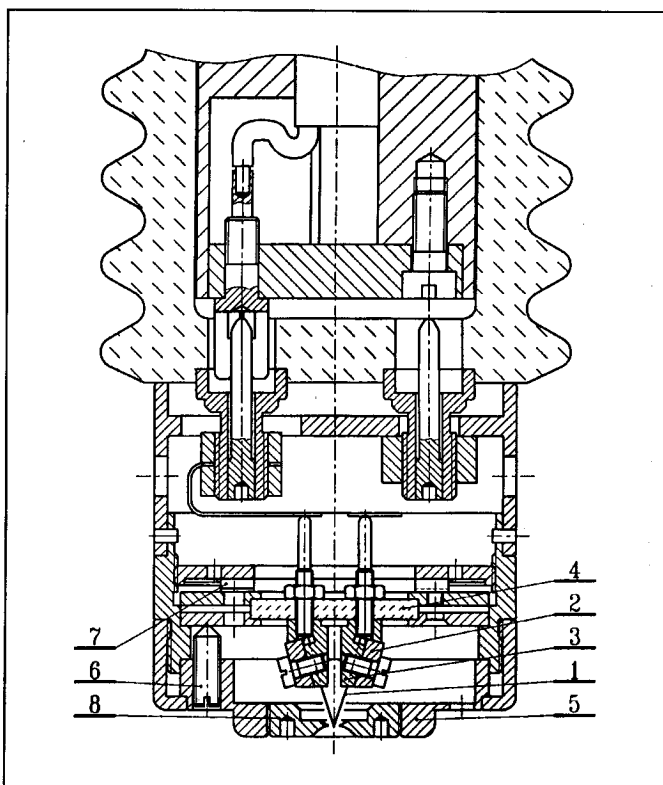


Obr. 1 Základní schéma elektronového děla: 1...katoda, 2...řídící elektroda, 3...anoda, 4...magnetická čočka, 5...vychylovací cívky

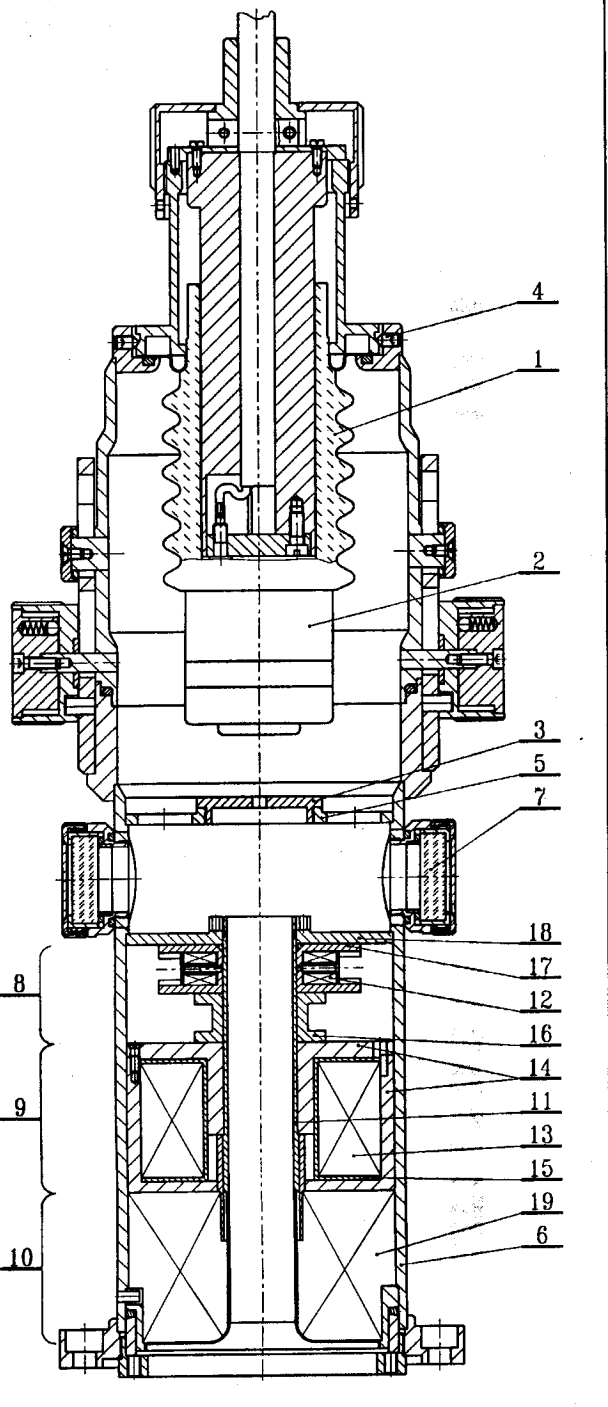
30 až 150 kV. Řídící elektroda (2 obr. 1), umístěná rovněž na vysokonapěťovém izolátoru, má záporné předpětí vůči katodě a změnou tohoto předpětí se řídí proud elektronového svazku. Anoda (3 obr. 1) je na zemním potenciálu, má tvar válcové elektrody s otvorem uprostřed a spolu s řídící elektrodou a katodou tvoří elektrostatickou čočku. Změnou proudu v magnetické čočce (4 obr. 1) můžeme elektronový svazek zaostřit ve vakuové komoře v libovolné vzdálenosti od elektronového děla. Jemná regulace pak slouží ke změně plošné hustoty výkonu na svařované součásti. Vychylovací cívky (5 obr. 1) dovolují vychýlení svazku v osách X, Y a umožňují přesné nastavení svazku do místa svaru nebo i k řízení jeho polohy během svařování [2,3].

3. KONSTRUKCE ELEKTRONOVÉHO DĚLA

Navrhované elektronové dělo je určeno ke svařování dílů v přístrojové technice, a to především vakuové a kryogenní. Jde tedy převážně o kusovou nebo malosériovou výrobu malých a středně velkých součástí nejrozmanitějších tvarů z nejrůznějších materiálů. Na základě tohoto vymezení lze formulovat nejdůležitější parametry a požadavky na konstrukci. Podle našich zkušeností je pro uvedenou oblast použití (požadovaná hloubka a tvar průvaru) vhodné elektronové dělo o výkonu do 2 kW, pracující s urychlovacím napětím 50 až 60 kV, upevněné z vnějšku na vakuové pracovní komoře [4]. Konstrukční provedení je znázorněno na obr. 2 a obr. 3. Elektronové dělo má společné vakuum s pracovní



Obr. 2 Detail elektronové trysky: 1...katoda, 2...příložka, 3...měděný bloček, 4...keramická destička, 5...řídící elektroda, 6...centrovací šrouby držáku katody, 7...plochá pružina, 8...víčko řídící elektrody



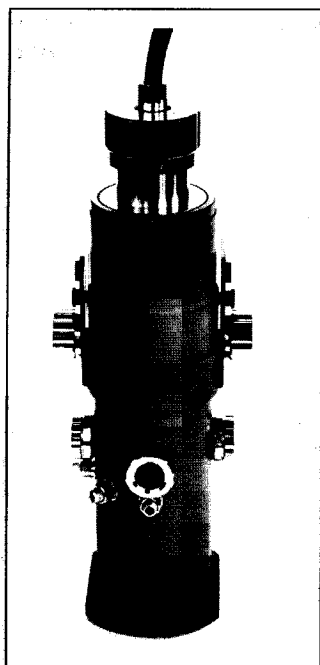
Obr. 3 Elektronové dělo: 1...vysokonapěťový izolátor, 2...soustava držáku katody s řídicí elektrodou, 3...anoda, 4...centrovací šrouby elektronové trysky, 5...přepážka nesoucí anodu, 6...plášť elektronového děla, 7...průzor, 8...centrovací systém, 9...magnetická čočka, 10...systém vychylování svazku, 11...centrální trubka, 12...centrovací cívky, 13...budící cívka magnetické čočky, 14...magnetický obvod čočky, 15...kostra budící cívky, 16...vložka, 17...těleso centrovacího systému, 18...přepážka, 19...vychylovací cívky

komorou a je konstruované tak, že už není třeba další pomocné vývěvy k čerpání prostoru katody. Tato okolnost spolu se skutečností, že není nutné vodní chlazení magnetické čočky, podstatně zjednodušuje manipulaci a umožňuje jeho snadnou montáž do různých poloh na pracovní komoře. Zdrojem elektronů je přímo žha-

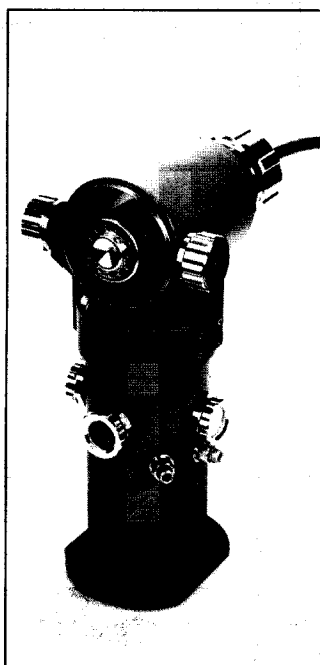
věná katoda (1 obr. 2) zhotovená z wolframového drátu o průměru 0,15 až 0,2 mm zformovaného do tvaru písmene V. Držák katody spolu s řídicí elektrodou tvoří samostatný celek, který je upevněn na vysokonapěťovém keramickém izolátoru. Pro snadnou a rychlou výměnu katody lze horní část elektronového děla s vysokonapěťovým izolátorem po zavzdušnění vyklopit a zajistit v poloze kolmé k ose děla. Držák katody spolu s řídicí elektrodou je možno vyjmout (bajonet) a nahradit druhou sestavou s předem připravenou katodou. Výměna samotné katody se provádí mimo elektronové dělo. Tvarovaný wolframový drát, ustříhnutý v přípravku na určitou délku, je šroubky přes příložky (2 obr. 2) přitlačen k měděným bločkům (3 obr. 2) upevněným na keramické destičce (4 obr. 2). Pro správnou funkci elektronového děla je velmi důležitá poloha katody vůči otvoru v řídicí elektrodě (5 obr. 2). V našem případě se centrování katody provádí nakláněním držáku katody pomocí tří šroubků (6 obr. 2) umístěných v čele řídicí elektrody proti ploché pružině (7 obr. 2) ve tvaru mezikruží. Šroubováním víčka řídicí elektrody (8 obr. 2) lze provést výškové nastavení katody. Správná výška hrotu katody je 0,1 až 0,2 mm nad ostrou hranou ve víčku. Celou elektronovou trysku, to znamená vysokonapěťový izolátor (1 obr. 3) s držákem katody, katodou a řídicí elektrodou (2 obr. 3), lze v určitých mezích posouvat v rovině kolmé k ose děla, a tak vycentrovat proti otvoru v anodě (3 obr. 3). K tomu slouží čtyři centrovací šrouby (4 obr. 3), kterými je elektronová tryska po nastavení správné polohy i upevněna. Proti elektronové trysce umístěná anoda má tvar ploché elektrody s otvorem uprostřed. Je opatřena závitem pro snadnou montáž v případě nutnosti jejího čištění. V přepážce nesoucí anodu (5 obr. 3) jsou otvory pro čerpání prostoru elektronové trysky. V prostoru pod anodou jsou v plášti elektronového děla (6 obr. 3) čtyři otvory rozmístěné po 90°. Přední otvor je opatřen průzorem z olovnatého skla (7 obr. 3) a slouží k vizuální kontrole žhavení katody. Předpokládá se jeho využití k optickému pozorování procesu svařování v ose svazku přes zrcátko umístěné uvnitř. Otvor kolmý k tomuto průzoru bude sloužit k uchycení zrcátka a nastavení jeho polohy. Další otvor je určen k zabudování světlocitlivého prvku, pomocí kterého bude automaticky řízena teplota katody podle jejího světelného záření. Zbývající otvor lze využít např. k připojení měřky vakuumetru. Elektronově optická část děla se skládá z centrovacího systému (8 obr. 3), magnetické čočky (9 obr. 3) a systému vychylování svazku (10 obr. 3). Všechny tyto prvky jsou umístěny vně vakuového prostoru. Vakuově jsou odděleny centrální trubkou (11 obr. 3), kterou prochází elektronový svazek, a kterou je zároveň čerpán prostor elektronové trysky. Centrovací systém umožňuje vychýlení svazku ve dvou na sebe kolmých směrech a slouží k nasměrování svazku do optické osy magnetické čočky. Je tvořen osmi cívkami (12 obr. 3) rozmístěnými po 45° s osami kolmými k ose svazku. Vždy dvě sousední cívky jsou zapojeny v sérii a spolu s dvojicí protilehlých cívek vytvářejí pole pro vychýlení v jedné rovině. Magnetická čočka skládající se z budící cívky (13 obr. 3) a magnetického obvodu (14 obr. 3) je navržena tak, aby bylo možné elektronový svazek zaostřit již ve vzdálenosti 30 mm od čela elektronového děla [5]. To umožňuje maximální využití prostoru pracovní komory při svařování rozměrnějších součástí. Díly magnetického obvodu zhotovené z oceli 12 040 (behanit) byly po opracování žíhány ve vakuu pro dosažení homogenních magnetických vlastností. Chlazení magnetické čočky je zajištěno použitím duralové kostry (15 obr. 3) odvádějící teplo z vinutí budící cívky a těsným zasunutím čočky do pláště. K chlazení rovněž přispívá odvod tepla z čela čočky přes vložku (16 obr. 3) a těleso centrovacího systému (17 obr. 3) do přepážky (18 obr. 3) spojené s pláštěm. Díky tomu může magnetická čočka dlouhodobě pracovat i při plném buzení bez nutnosti vodního chlazení. Pro vychylování elektronového svazku bylo použito vychylovacích cívek z televizního přijímače (19 obr. 3). Jsou umístěny v čele elektronového děla a dovolují vychýlení elektronového svazku až 35° od osy. To spolu s použitím vysoce stabilního urychlovacího napětí umožňuje svařování pod různými úhly a provádět např. rotační koutové svary i v případě,

kdy osy manipulatoru a elektronového děla jsou na sebe kolmé. Kromě statického vychylování ve dvou na sebe kolmých rovinách vychylovací systém slouží k rozmtání svazku při zobrazování svarů na principu snímání odražených elektronů [6]. Na obr. 3 je na centrální trubce mezi magnetickou čočkou a tělesem centrovacího systému nasunuta vložka (16 obr. 3). V případě použití elektronového děla na technologické operace vyžadující kruhový průřez elektronového svazku lze do tohoto prostoru místo vložky umístit další systém shodný s centrovacím systémem, u kterého je osm cívek zapojeno jako stigmátor.

Na obr. 4 je celkový pohled na elektronové dělo a na obr. 5 je elektronové dělo s odklopenou horní částí.



Obr. 4 Celkový pohled na elektronové dělo



Obr. 5 Elektronové dělo s vyklopenou horní částí

4. UVEDENÍ DO PROVOZU

Při prvním uvádění elektronového děla do činnosti je nutné dodržet určitý postup, aby nedošlo k poškození některých součástí, především k natavení anody nebo centrální trubky. Před konečnou montáží se nejvíce tepelně namáhané části děla tj. víčko řídicí elektrody a anoda odplyňují zahřátím ve vysokém vakuu na teplotu asi 800 °C. Elektronová tryska se pomocí přípravku mechanicky vycentruje vůči anodě a v této poloze upevní. Po připojení elektronového děla na pracovní komoru, vyčerpání a prověření vakuové těsnosti je vhodné nejprve částečně vyžhavit katodu na dobu asi 10 min. Urychlovací napětí pak zvyšujeme postupně, vždy s prodlevou několika desítek sekund. Po dosažení pracovní hodnoty urychlovacího napětí se při nulovém předpětí na řídicí elektrodě zvýší žhavení katody tak, aby proud ve svazku byl 1 až 2 mA. Tento proud vytvoří viditelnou stopu na terči, který nejčastěji tvoří silná měděná deska umístěná v pracovní komoře. Dochází-li při změně proudu v magnetické čočce k posunu stopy do strany, je třeba pomocí centrovacího systému elektronový svazek vychýlit tak, aby se stopa při přeostřování jen zmenšovala nebo zvětšovala. Nyní můžeme nastavit žhavení katody na pracovní teplotu. Při nulovém předpětí na řídicí elektrodě zvyšujeme žhavení tak dlouho, až další zvýšení již nevede ke zvýšení proudu ve svazku. Optimální pracovní režim je tedy ve stavu proudového nasycení a další zvýšení teploty katody pouze zkracuje její životnost. Dále

prověříme funkci řídicí elektrody. Při zvyšování napětí na řídicí elektrodě se zmenšuje proud ve svazku, a při maximální hodnotě musí být tento proud nulový. Jestliže proud nelze snížit na nulovou hodnotu, je třeba zavzdušnit elektronové dělo a vyšroubovaním víčka řídicí elektrody (8 obr. 2) zmenšit vysunutí katody (1 obr. 2). Zbývá vyzkoušet vychylovací systém, nejlépe tak, že elektronový svazek zaostříme a maximálním vychýlením v obou rovinách nakreslíme obdélník natavením materiálu terče. Při správné funkci systému vychylování je obdélník pravidelný a jeho strany jsou rovné. Tím je elektronové dělo připraveno ke svařování. Katoda elektronového děla pracuje většinou za velmi ztížených podmínek a její životnost bývá obvykle několik hodin. Při přepálení katody se vymění celá soustava držáku katody a řídicí elektrody s novou katodou a ve většině případů je třeba jen vycentrovat svazek pomocí centrovacího systému. Rovněž nažhavení katody zůstává stejné. Po ukončení svařování je vhodné komoru, a tedy i elektronové dělo, vždy vyčerpat alespoň rotační vývěvou.

5. ZÁVĚR

Popsané elektronové dělo pracuje na našem pracovišti více než rok jako součást funkčního vzoru stolní elektronové svářečky. Je připojeno na zdroj vysokého napětí 50 kV o výkonu 500 W a bylo rovněž zkoušeno se zdrojem 60 kV, 2 kW. V nejbližší době bude doplněno zařízením pro řízení teploty katody na principu snímání jasu. Jak ukázaly zkoušky, lze tímto způsobem prodloužit životnost katody více než dvojnásobně [7]. Rovněž se počítá se zabudováním optického systému, který umožní pozorování svaru v ose svazku.

Tato práce byla realizována za podpory Grantové agentury České republiky v rámci projektu číslo 101/96/1174.

Literatura

- [1] Meleka, A., H.: Electron-beam Welding : Principles and Practice. Published by McGRAW-HILL Publishing Company Limited for The Welding Institute. London 1971.
- [2] Turňa, M.: Speciálne metódy zvárania. Alfa vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry. Bratislava 1989.
- [3] Kuncipál, J., Pilous, V., Dunovský, J.: Nové technologie ve svařování. SNTL. Praha 1984.
- [4] Zobač, L., Dupák, J., Kachlík, J., Krejčí, Z., Ustohal, V.: Víceúčelová vakuová pec s indukčním, elektronovým a odporovým ohřevem. Slaboproudý obzor, 28, 1967, 146-152.
- [5] Lencová B. and Wisselink G.: Program package for the computation of lenses and deflectors, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A-298 (1990), 56-66.
- [6] Zobač, M.: Zobrazení svarů v elektronové svářečce. Diplomová práce, Brno 1998.
- [7] Jahoda, M.: Řízení teploty katody elektronové svářečky. Diplomová práce, Brno 1998.

Ing. Jan Dupák, CSc.; Ing. Ivan Vlček, Ústav přístrojové techniky AV ČR, Královopolská 147, 612 64, Brno,
e-mail: {dupak, iv} @isibrno.cz, http://www.isibrno.cz,
tel.: (05) 41514111, fax: (05) 41514402