Spawanie wiązką elektronów - 50 lat doświadczeń Instytutu Spawalnictwa

Jerzy Dworak

Wiązka elektronów jako spawalnicze źródło ciepła jest znana i stosowana w przemyśle już od wielu lat. Skoncentrowaną wiązkę elektronów użyto po raz pierwszy do spawania w komorze próżniowej w latach 50. ubiegłego wieku w Niemczech i we Francji. J. A. Stohr z francuskiej Komisji Energii Atomowej publicznie przedstawił proces spawania elektronowego w dniu 23 listopada 1957 r. Niemiecki fizyk Karl-Heinz Steigerwald prowadził pierwsze eksperymenty za pomocą zbudowanej w 1952 r. spawarki elektronowej. W 1958 r., spawając stop cyrkonu o grubości 5 mm, odkrył tzw. efekt głębokiego wtopienia [1,2].

W Instytucie Spawalnictwa pierwszą pracę badawczą dotyczącą spawania elektronowego, której autorami byli Józef Czech i Jacek Pieter, wykonano w 1964 r. Było to studium w zakresie technologii i urządzeń [3]. W Instytucie, jako jednostce odpowiedzialnej za rozwój spawalnictwa w Polsce, planowano już w latach sześćdziesiątych podjęcie prac nad skonstruowaniem spawarki elektronowej i uruchomieniem produkcji jednostkowej tych urządzeń w Zakładzie Doświadczalnym Instytutu Spawalnictwa, a następnie ich zastosowaniem przemysłowym łącznie z opracowaną technologią spawania. Zamierzenia te nie zostały jednak urzeczywistnione ze względu na włączenie spawania elektronowego do zakresu tematycznego Przemysłowego Instytutu Elektroniki. Zaplanowana wówczas współpraca między krajowymi ośrodkami badawczymi miała polegać na wykonywaniu urządzeń przez Przemysłowy Instytut Elektroniki, a później przez wydzielony Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Elektroniki Próżniowej (OBREP). Urządzenia te miano opracowywać na podstawie wyników badań technologicznych i założeń technicznych dostarczanych przez Instytut Spawalnictwa.

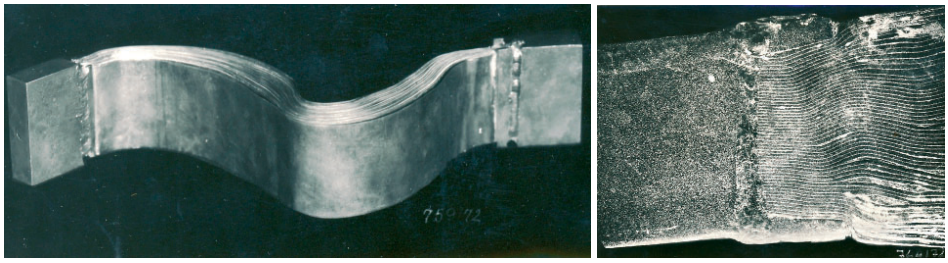
Jedną z opracowanych i wykonanych wówczas w ramach współpracy trzech instytutów: Przemysłowego Instytutu Elektroniki, Instytutu Lotnictwa i Instytutu Spawalnictwa, dwóch prototypowych spawarek elektronowych zainstalowano w Instytucie Spawalnictwa w 1970 r. w laboratorium fizycznych metod spawania.

Spawarka elektronowa EUS-25/6 była urządzeniem niskonapięciowym. Zasilacz wysokiego napięcia umożliwiał uzyskanie napięcia do 25 kV o regulacji ciągłej. Maksymalna moc wiązki elektronów wynosiła 2 kW dla katody o średnicy 1 mm i 6 kW dla katody o średnicy 2 mm. Układ ogniskowania wiązki elektronów zapewniał regulację położenia ogniska wiązki w zakresie 30÷210 mm od wyjścia z działa elektronowego. Spawarka była wyposażona w próżniową komorę roboczą w kształcie walca o średnicy 600 mm i długości 800 mm. Czas uzyskania próżni odpowiedniej dla procesu spawania (10^{-3} tora) uzyskiwano w ciągu 15 min. Standardowe wyposażenie urządzenia stanowił stolik krzyżowy oraz obrotnik o poziomej osi obrotu umieszczone w komorze roboczej. System napędowy zapewniał uzyskanie prędkości ruchu liniowego w zakresie 20,7÷201 cm/min [4].

Rys. 1. Spawarka elektronowa EUS-25/6, (6 kW, 25 kV) wykonana w Przemysłowym Instytucie Elektroniki, zainstalowana w Instytucie Spawalnictwa w 1970 r.

Instalacja tego urządzenia umożliwiła rozpoczęcie technologicznych prac badawczych i współpracę w dziedzinie spawania elektronowego z innymi jednostkami badawczymi zarówno w kraju, jak i za granicą.

W ramach pracy badawczej Ac-51/I pt.: „Technologia spawania elektronowego cz. I" (1972 r.) opracowano np. technologię spawania miedzianych szyn elastycznych i miedzianych komutatorów (rys. 2, 3) [5].

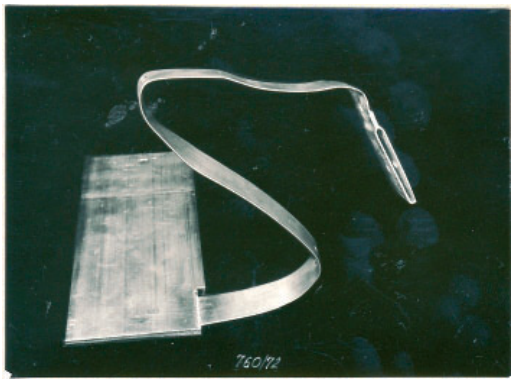


Rys. 2. Miedziana szyna elastyczna z przyspawanymi pełnoprzekrojowymi końcówkami zaciskowymi [5]

Przeprowadzone badania i próby technologiczne wykazały przydatność metody do wykonywania złączy doczołowych jedno i różnoimiennych.

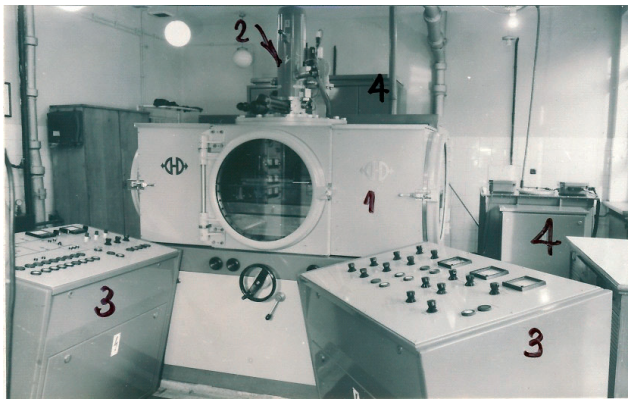
Badania i próby technologiczne spawania elektronowego prowadzone za pomocą urządzenia EUS-25/6 ujawniły szereg jego niedostatków, szczególnie w postaci niewystarczającej stabilności podstawowych parametrów procesu spawania, a także uciążliwej obsługi niektórych podzespołów mechanicznych. Spawarka ta mogła być wykorzystywana jako urządzenie laboratoryjne, nie nadawała się jednak do zastosowań przemysłowych.

Mgr inż. Jerzy Dworak - Instytut Spawalnictwa, Zakład Technologii Spawalniczych

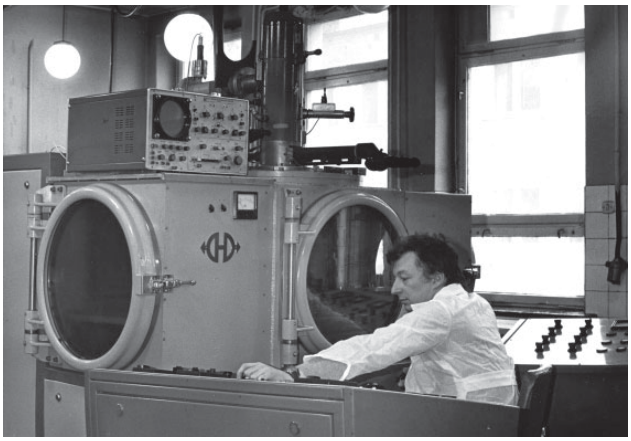


Rys. 3. Miedziany wycinek komutatora o grubości 8 mm z przyspawaną elektronowo chorągiewką o grubości 1 mm [5]

Podjęto zatem decyzję o zakupie bardziej zaawansowanej konstrukcyjnie spawarki elektronowej. W 1973 r. uruchomiono w Instytucie Spawalnictwa spawarkę elektronową ES-30/5 wyprodukowaną w NRD (rys. 4, 5).



Rys. 4. Spawarka elektronowa ES-30/5 (30 kV, 5 kW) prod. NRD 1) próżniowa komora robocza, 2) działo elektronowe, 3) pulpit sterujący, 4) zasilacze



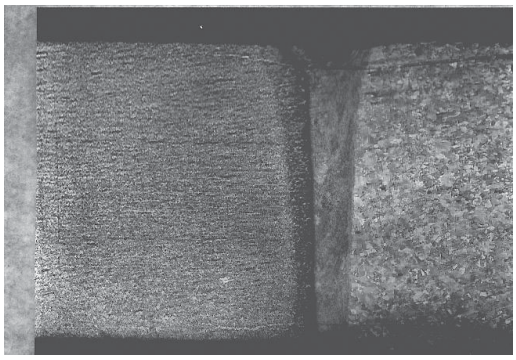
Rys. 5. Spawarka elektronowa ES-30/5 w czasie pracy, obsługiwana przez mgr inż. Jana Warsza (1973 r.)

Badaniom przydatności tego urządzenia do wykonywania różnorodnych zadań technologicznych poświęcona była praca badawcza Ac-51/II pt.: „Technologia spawania elektronowego część II. Charakterystyka spawarki elektronowej ES-30/5" (1973 r.) [6].

Spawarka elektronowa ES-30/5 charakteryzowała się podobnymi parametrami jak spawarka krajowa. Wysoka stabilność parametrów działa elektronowego jak również parametrów ruchu manipulatorów umożliwiała jednak, ze względu na wysoką powtarzalność procesu, osiągnięcie wyższej jakości połączeń spawanych. Spawarka ta była w 1973 r. w kraju jedynym wzorcem konstrukcyjnym tego rodzaju produkcyjnych urządzeń. Bazując na tej spawarce, wykonano w Instytucie Spawalnictwa w latach 70. i 80. wiele prac naukowo-badawczych i usługowych.

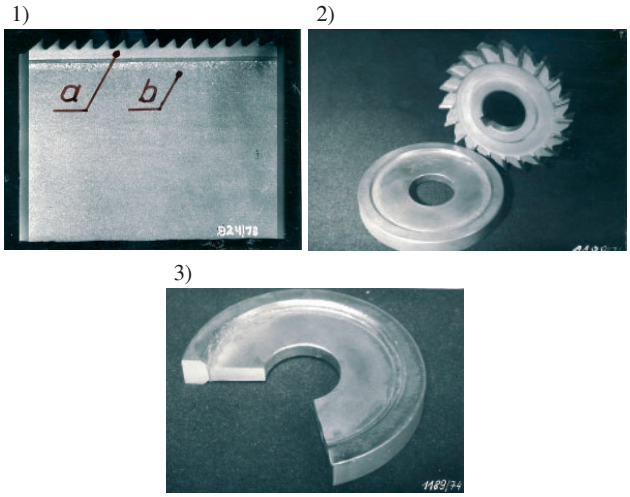
W latach 70. prace te obejmowały m.in. następującą tematykę:

- Spawanie elektronowe miedziano-stalowych działek komutatorów (praca badawcza Ac-55, 1973 r.), rys. 6 [7].



Rys. 6. Makrostruktura połączenia stali z miedzią (blachy o grubości 3 mm) [7]

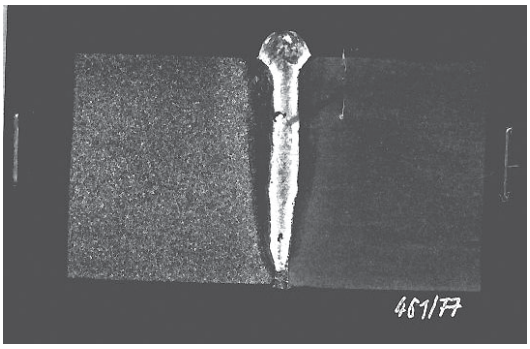
- Spawanie elektronowe stali szybkotnących ze stalami węglowymi w produkcji narzędzi tnących (praca badawcza Ac-56, 1974 r.), rys. 7 [8].



Rys. 7. Przykładowe złącza stali szybkotnących ze stalami węglowymi; 1) brzeszczot piły ręcznej a) stal szybkotnąca, b) stal węglowa, 2) półfabrykat i gotowy frez, 3) przekrój bimetalowego półfabrykatu freza tarczowego [8]

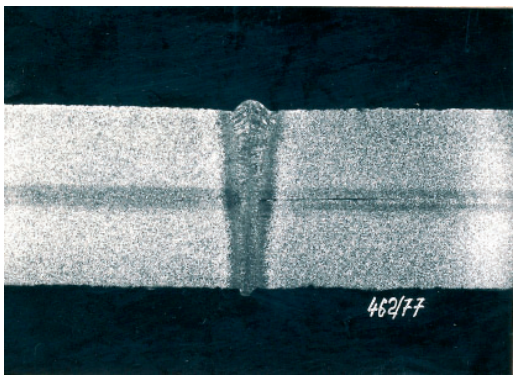
- Technologia spawania elektronowego części zaworów wylotowych i wirnika sprężarki. Cz. I. Technologia spawania części zaworów wylotowych (praca badawcza Ac-65/I, 1976 r.), rys. 8 [9].
- Zbadanie możliwości modyfikowania spoin materiałem dodatkowym w procesie elektronowego spawania stali żarowytrzymałej i szybkotnącej (praca badawcza Ac-69, 1977 r.), rys. 9 [10].

Rys. 8. Makrostruktura spawanego elektronowo grzybka zaworu wylotowego; parametry procesu: U=75 kV, I=35 mA; zastosowano dodatkowe oscylacje wiązki elektronów [9]



Rys. 9. Makrostruktura złącza spawanego elektronowo ze stali SW18 i 45 z wkładką niklową (w spoinie widoczne pęknięcia, pow. 5x) [10]

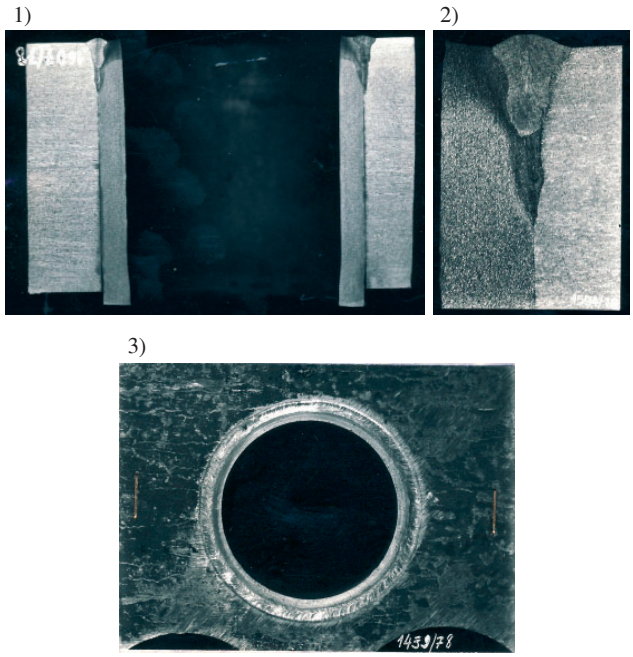
- Spawanie elektronowe zbiorników ciekłego chloru (praca badawcza Ac-76, 1977 r.), rys. 10 [11].



Rys. 10. Makrostruktura złącza spawanego elektronowo ze stali 18G2A; parametry procesu U=30 kV, I=140 mA (widoczne rozwarstwienie blachy) [11]

- Technologiczne warunki spawania elektronowego rur w dnach sitowych (1979 r), rys. 11 [12].

W latach 70. Instytut Spawalnictwa uczestniczył w pracach Spawalniczego Centrum Koordynacyjnego RWPG. W ramach tych prac jedną z narad dotyczącą spawania elektronowego zorganizowano w Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach w dniach 9÷12.10.1973 r. Uczestnicy tej narady reprezentowali: Instytut Technologii Budowy Maszyn w Budapeszcie, Wyższą Szkołę Techniczną w Karl-Marx-Stadt, Centrum Spawalnictwa i Badań Zmęczeniowych w Timisoarze, Centralny Naukowo-Badawczy Instytut Budowy Maszyn w Moskwie, Instytut Elektrospawania im. E.O. Patona w Kijowie i Instytut Spawalniczy w Sofii [13].



Rys. 11. Makrostruktura modelowego złącza rury w dnie sitowym spawanego elektronowo; stale K18, H26N4 (1 i 2) oraz widok lica poprawnej spoiny (3) [12]

Referat dotyczący spawania elektronowego pt.: „Spawanie elektronowe giętkich przewodów elektrycznych do zgrzewarek" autorstwa mgr. inż. J. Czecha i mgr. inż. J. Warsza został przedstawiony na kolokwium IV Komisji MIS „Specjalne procesy spawalnicze" w ramach dorocznego kongresu Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa, który obradował w dniach 16÷22.09.1973 r. w Düsseldorfie [13].

Na naradzie w Halle (16÷22.11.1975 r.) wspólna delegacja Instytutu Spawalnictwa, Instytutu Lotnictwa, Instytutu Technologii Elektronowej Politechniki Wrocławskiej oraz Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Elektroniki Próżniowej w Warszawie przedstawiła opracowania dotyczące spawania elektronowego wirników sprężarek turbinowych oraz spawania stali szybkotnącej z węglową [13].

W końcu lat 70. zarówno współpraca między ośrodkami krajowymi, jak i postęp w dziedzinie urządzeń elektronowiązkowych uległy pewnemu zahamowaniu, a następnie zupełnemu przerwaniu ze względu na zmiany organizacyjne zespołu zajmującego się dotychczas budową spawarek oraz pieców elektronowych (zmieniono zakres tematyczny prac Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Elektroniki Próżniowej). Czyniono wówczas starania, aby w latach 1981÷1985 powstał odrębny problem węzłowy dla spawalnictwa i w ramach tego problemu można było prowadzić m.in. prace nad rozwojem tzw. fizycznych metod spawania - szczególnie spawania elektronowego.

Nie widząc możliwości rozwoju spawania elektronowego ze względu na brak krajowych urządzeń, Instytut Spawalnictwa rozpoczął we własnym zakresie prace nad konstrukcją prototypu produkcyjnej spawarki elektronowej. Zajął się również przygotowaniem kadr i bazy technicznej dla przewidywanej w przyszłości realizacji zamówień krajowych na kompleksowe wprowadzanie urządzeń i technologii spawania elektronowego do przemysłu.

W ramach Zakładu Spawania Metali Nieżelaznych, kierowanego przez doc. dr. inż. Stanisława Brysia, utworzono w 1980 r. Pracownię Spawania Elektronowego, której kierownikiem został mgr inż. Jan Warsz.

W pracowni tej prowadzono zarówno prace technologiczne, jak i konstrukcyjne dotyczące spawania elektronowego. Opracowano koncepcje oraz założenia techniczne wykonanych później trzech spawarek elektronowych, prowadzono również badania nad konstrukcją własnego działa elektronowego.

W zakresie konstrukcji napędów oraz systemów sterowania spawarek elektronowych Pracownia Spawania Elektronowego ściśle współpracowała z Zakładem Elektrotechniki Spawalniczej kierowanym przez mgr inż. Tadeusza Zarembę.

Prace nad konstrukcją spawarek elektronowych podjęto w Instytucie Spawalnictwa w ramach problemu węzłowego PW 05.15 realizowanego w latach 1981÷1985. Opracowano wówczas i wykonano dwie spawarki: uniwersalną, doświadczalną, wielkokomorową spawarkę, oznaczoną jako SE 01-10/60 i spawarkę specjalizowaną, oznaczoną jako SE 10-7.5/60.

Punktem wyjścia do podjęcia tych zadań była wykonana w okresie 1979÷1980 praca badawcza Fc-40 pt.: „Badania modelowe i opracowanie założeń technicznych dla zespołów do budowy specjalistycznych spawarek elektronowych" [14].

Na podstawie przeprowadzonych badań określono podstawowe założenia techniczne i opracowano konstrukcję uniwersalnej, doświadczalnej spawarki elektronowej, którą uruchomiono w Instytucie Spawalnictwa. Spawarkę tę (SE 01-10/60) wykonano wyłącznie w oparciu o podzespoły produkcji krajowej.

Próżniową komorę roboczą spawarki o objętości 1,5 m^3 wykonano w Zakładzie Aparatury Próżniowej w Bolesławcu, generator wiązki elektronowej o mocy 10 kW i napięciu 60 kV z regulacją mocy za pomocą przetwornicy maszynowej 50 Hz wykonano w Instytucie Techniki Elektronowej Politechniki Wrocławskiej, konstrukcję zespołu manipulatorów (obrotniki o poziomej i pionowej osi obrotu oraz stolik krzyżowy) wraz z układem zasilania opracowano i wykonano w Zakładzie Doświadczalnym Instytutu Spawalnictwa. Próżnię w komorze roboczej zapewniały zespoły pomp próżniowych produkowane w Zakładach Techniki Próżniowej TEPRO w Koszalinie (rys. 12).

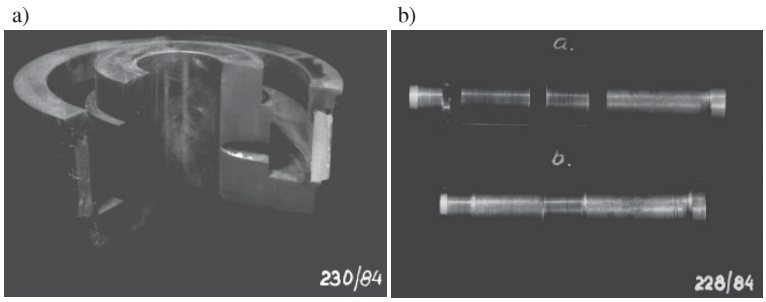
Rys. 12. Uniwersalna doświadczalna spawarka elektronowa opracowana i zainstalowana w Instytucie Spawalnictwa

Spawarka ta umożliwiała wykonanie spoin obwodowych na elementach o maksymalnych gabarytach:
- ϕ 500 mm, h = 450 mm (spoina prostopadła do osi obrotu elementu spawanego) oraz
- ϕ 300 mm, h = 300 mm (spoina równoległa do osi obrotu elementu spawanego),

a także spoin liniowych o długości do 650 mm przy maksymalnej wysokości i szerokości elementu spawanego odpowiednio 540 mm i 400 mm.

Drugą spawarką opracowaną w Instytucie Spawalnictwa w ramach problemu węzłowego PW 05.15 była specjalizowana spawarka taktowa SE 10-7.5/60 wykonana dla Fabryki Aparatów Elektrycznych FANINA w Przemyślu.

Instalację tego urządzenia poprzedziło wykonanie pracy badawczej pt.: „Technologia spawania elektronowego elementów sprzęgieł elektromagnetycznych typu VEP oraz tulejek elektromagnesów" (rys. 13), do produkcji których zostało ono zaprojektowane [16].



Rys. 13. Korpus sprzęgła elektromagnetycznego (a) oraz tulejki elektromagnesów (b) spawane elektronowo [16]

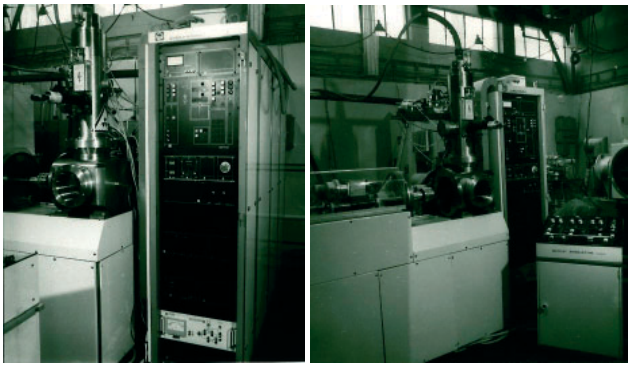
Spawarka (rys. 14) została zaprojektowana i wykonana w oparciu o podzespoły produkcji krajowej oraz firmy Leybold Heraeus. Firma ta dostarczyła kompletny generator wiązki elektronowej EBW 0/7,5-60, natomiast zespół komory roboczej wraz ze specjalistycznym manipulatorem został opracowany i wykonany w Zakładzie Doświadczalnym Instytutu Spawalnictwa. Komputerowy system sterowania manipulatorem został opracowany i wykonany w Zakładzie Elektronicznych Układów Sterowania Instytutu Spawalnictwa.

Spawarka została skonstruowana do spawania tulei elektromagnetycznych zaworów hydraulicznych oraz korpusów sprzęgieł elektromagnetycznych. Elementy te były mocowane w specjalnych przyrządach montażowych w taki sposób, że ich oś obrotu była usytuowana prostopadle do osi wiązki elektronów. W komorze roboczej o niewielkiej objętości był umieszczony sterowany systemem mikrokomputerowym manipulator umożliwiający jednoczesne spawanie czterech tulejek do zaworów elektromagnetycznych lub jednego korpusu sprzęgła elektromagnetycznego. Manipulator mógł wykonywać trzy ruchy: liniowy, taktowy i roboczy. Ruch liniowy służył do ustawienia miejsca spawania w osi wiązki elektronowej, taktowy powodował obrót manipulatora i ustawienie kolejnej tulejki zaworu elektromagnetycznego w pozycji spawania, a roboczy był ruchem obrotowym, w czasie które-

go były wykonywane kolejne spoiny tulejki. Podczas spawania korpusu sprzęgła elektromagnetycznego ruchem roboczym stawał się ruch taktowy, ponieważ korpus sprzęgła był mocowany na centralnym wałku manipulatora.

Dane techniczne spawarki SE 10-7.5/60:

- moc - 7,5 kW,
- napięcie przyspieszające - 60 kV,
- maksymalny prąd spawania - 125 mA,
- objętość komory roboczej - 18 dm^3,
- próżnia w komorze roboczej - 10^{-4} hPa,
- czas odpompowania komory roboczej - 2 min,
- zakres ruchu liniowego - 0÷98 mm,
- dokładność pozycjonowania w ruchu liniowym - 0,005 mm,
- zakres prędkości w ruchu taktowym - 0÷37 obr/min,
- zakres prędkości w ruchu roboczym - 0÷46 obr/min,
- cykl pracy automatyczny, półautomatyczny lub ręczny.



Rys. 14. Specjalizowana spawarka elektronowa SE 10-7.5/60 opracowana w Instytucie Spawalnictwa, zainstalowana w Fabryce Aparatów Elektrycznych FANINA w Przemyślu [16]

Spawarka SE 10-7.5/60 była eksploatowana w Fabryce Aparatów Elektrycznych FANINA w Przemyślu do roku 2007. Przekonstruowane uchwyty ustalająco-mocujące pozwalały na wykorzystanie jej do spawania również innych elementów o symetrii obrotowej niż pierwotnie przewidywane.

Tematyka dotycząca technologii spawania elektronowego była w latach 80. przedmiotem wystąpień przedstawicieli Instytutu na konferencjach krajowych i zagranicznych.

Na międzynarodowej imprezie promocyjnej „Interwelding '84", obejmującej sympozjum naukowe oraz targi sprzętu spawalniczego, która odbywała się w dniach 10÷13.10.1984 r. w pomieszczeniach Ośrodka Postępu Technicznego w Katowicach doc. dr hab. inż. Jan Pilarczyk przedstawił referat pt.: „Rola Instytutu Spawalnictwa w rozwoju spawania elektronowego w kraju" [13].

Ożyło również tempo współpracy placówek badawczych objętych Spawalniczym Centrum Koordynacyjnym RWPG. W naradzie ekspertów w ramach tematu 31 - „Opracowanie zespołu zasilającego z przetwarzaczem częstotliwości dla spawarek elektronowych", która miała miejsce w Sarajewie w dniach 10÷15.06.1985 r., uczestniczył dr inż. Edward Dobaj [13].

W roku 1986 za wybitne osiągnięcia w nauce i technice kilku zespołom badawczym Instytutu zostały przyznane nagrody Ministra Hutnictwa i Przemysłu Maszynowego. Nagrody I stopnia przyznano zespołowi mgr. inż. J. Warsza, mgr. inż. T. Zaremby i mgr. inż. B. Łeśko za „Opracowanie i wdrożenie do produkcji wyspecjalizowanej spawarki elektronowej".

Doświadczenia Instytutu Spawalnictwa w zakresie konstrukcji spawarek elektronowych, a także technologii spawania elementów o symetrii obrotowej i niewielkich gabarytach przedstawiano na konferencjach krajowych i zagranicznych.

Referat tablicowy o spawarce elektronowej zmontowanej w Instytucie dla Zakładów „Fanina" został przedstawiony w Warnie na konferencji w dniach 31.05÷4.06.88 r. poświęconej technologii spawania elektronowego [20].

Na XXXII Krajowej Naukowo-Technicznej Konferencji Spawalniczej w dniach 8÷9.11.1990 r. w Częstochowie ze strony Instytutu Spawalnictwa został przedstawiony m.in. referat pt. „Spawanie elektronowe na spawarkach skonstruowanych w Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach" [21].

Biorąc pod uwagę z jednej strony niezadowalający poziom spawalnictwa krajowego w latach 80. a z drugiej - fundamentalną rolę jaką nowoczesne spawalnictwo odgrywa w rozwoju gospodarczym kraju oraz realizując nową politykę badań i wdrażania ich wyników do przemysłu, Instytut Spawalnictwa podjął koordynację Centralnego Programu Badawczo-Rozwojowego (CPBR) pt.: „Techniki Spawalnicze" realizowanego w latach 1986÷1990 [22].

Jednym z celów tego programu było uruchomienie produkcji spawarek elektronowych średnionapięciowych, a w tym opracowanie mikrokomputerowych systemów sterowania i kontroli tych urządzeń.

W ramach celu nr 8 tego programu opracowano dokumentację techniczną i wykonano prototyp spawarki elektronowej taktowej. Była to trzecia spawarka elektronowa opracowana w Instytucie Spawalnictwa (rys. 15).

Rys. 15. Specjalizowana taktowa spawarka elektronowa SE 20-10/60 opracowana w Instytucie Spawalnictwa

Spawarka została zaprojektowana jako wysokowydajna, specjalizowana spawarka elektronowa do spawania produkcyjnego niewielkich, określonego kształtu elementów maszyn i urządzeń. Spawarka (oznaczona symbolem SE 20-10/60) była przeznaczona do spawania elementów typu tarcza oraz tarcza + wałek, których oś obrotu zajmowała w czasie spawania położenie równoległe do osi wiązki elektronowej. Spawarka różniła się od poprzednio opracowanych nie tylko komorą i manipulatorem, ale także innymi podzespołami, które zostały zmodernizowane lub opracowane od nowa.

W spawarce zastosowano nowe działo elektronowe KE-15/80B opracowane i wykonane przez Instytut Technologii Elektronowej Politechniki Wrocławskiej. Moc tego działa wynosiła 15 kW przy napięciu przyspieszającym 80 kV, co pozwalało uzyskać maksymalny prąd spawania 190 mA. Zespół zasilaczy wyrzutni elektronów został opracowany i wykonany wspólnie przez Zakład Elektronicznych Układów Sterowania Instytutu Spawalnictwa i Zakłady Wytwórcze Sprzętu Sieciowego BELOS. Dwa zestawy pomp próżniowych do wytwarzania próżni w dziale elektronowym i komorze roboczej dostarczyły Zakłady Techniki Próżniowej TEPRO z Koszalina.

Zespołem określającym zakres zastosowania spawarki była komora robocza z manipulatorem opracowana przez Pracownię Spawania Elektronowego i Zakład Doświadczalny Instytutu Spawalnictwa.

Spawarka SE 20-10/60 wyposażona była w dzieloną próżniową komorę roboczą. Część górna komory roboczej zamocowana była na stałe do konstrukcji nośnej spawarki pod działem elektronowym. Była ona wyposażona w specjalny próżnioszczelny moduł pozwalający na przesuw działa w czasie pracy spawarki w celu zmiany średnicy układanych spoin kołowych. Próżniowy zawór suwakowy oddzielał niewielką objętość górnej części komory zapowietrzaną i odpompowywaną w każdym cyklu pracy spawarki. Dolna część komory roboczej w postaci trzech oddzielnych elementów usytuowana była w gniazdach trójpozycyjnego stołu obrotowego. Każdy dolny segment komory roboczej zawierał zespół ustalająco-mocujący element spawany. Centrowanie przedmiotu spawanego, jego mocowanie i przekazanie ruchu obrotowego następowało w chwili podnoszenia dolnej części komory roboczej przez siłownik pneumatyczny. Manipulator w postaci obrotowego stołu taktowego wyposażony był w trzy gniazda mieszczące dolne części komory roboczej, miał wbudowane zespoły napędowe ruchu taktowego i roboczego oraz zespół podnoszenia pneumatycznego.

System sterowania spawarki, umożliwiający sekwencyjne sterowanie i kontrolę pracy poszczególnych zespołów, a także sterowanie przebiegiem cyklu technologicznego spawania, został opracowany i wykonany w Zakładzie Elektronicznych Układów Sterowania Instytutu Spawalnictwa [23].

Dane techniczne spawarki SE 20-10/60:

- moc - 15 kW ograniczona ze względów konstrukcyjnych do 10 kW,
- napięcie przyspieszające - 80 kV, ograniczone do 60 kV,
- maksymalny prąd spawania -190 mA,
- objętość komory roboczej - 3 dm^3,
- próżnia w komorze roboczej - 10^{-2} hPa,
- czas odpompowania komory roboczej - 6 s,
- prędkość w ruchu taktowym max. - 6,6 obr/min,
- dokładność pozycjonowania w ruchu liniowym - ±0,1 mm,
- zakres prędkości w ruchu roboczym - 0÷30 obr/min,
- zakres przesuwu działa - 0÷100 mm,
- średnica spawanych elementów - 10÷180 mm,
- system sterowania - komputerowy,
- cykl pracy - automatyczny, półautomatyczny lub ręczny,
- maksymalne wymiary spawanego elementu:
  tarcza - średnica 200 mm, wysokość 50 mm,
  tarcza+wałek - długość 300 mm.

Prototyp spawarki taktowej SE 20-10/60 zbudowany w Instytucie Spawalnictwa został zainstalowany w Laboratorium Spawania Skoncentrowaną Energią Instytutu Spawalnictwa z przeznaczeniem do prowadzenia prac badawczych z zakresu spawania elektronowego, jak też prac dla przemysłu w postaci serii próbnych elementów produkcyjnych spawanych elektronowo.

Laboratorium Spawania Skoncentrowaną Energią zostało utworzone w 1991 r. w ramach Zakładu Spawania Stali i Żeliwa w miejsce Pracowni Spawania Elektronowego.

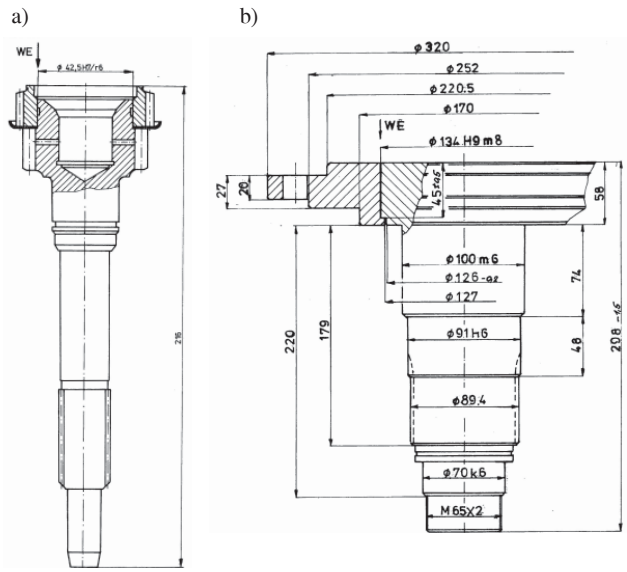
Dokumentacja techniczna prototypu taktowej spawarki elektronowej została przekazana na podstawie umowy wdrożeniowej do Zakładu Aparatury Próżniowej w Bolesławcu, gdzie miała zostać uruchomiona w 1992 roku produkcja tego typu spawarek.

Przewidywane na lata 90. prace konstrukcyjne obejmowały opracowanie wspólnie z Instytutem Technologii Elektronowej Politechniki Wrocławskiej i Zakładami BELOS w Bielsku Białej generatora wiązki elektronowej o napięciu 120 kV i mocy maksymalnej 15 kW oraz opracowanie we współpracy z Instytutem Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej Politechniki Śląskiej oraz zakładami BELOS modelu falownikowego zasilacza wysokiego napięcia do spawarek elektronowych.

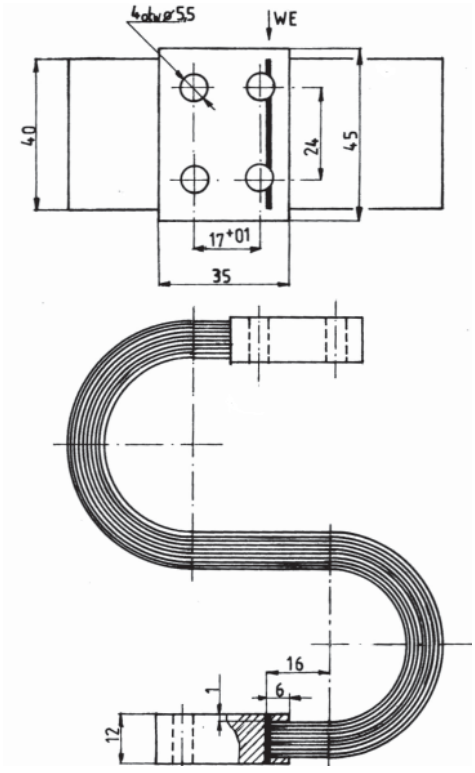
Program działalności badawczej Instytutu w obszarze technologii spawania elektronowego obejmował w latach 1985÷2000 m.in. zagadnienia [24÷31]:

- opracowanie studium spawania elektronowego grubościennych elementów konstrukcyjnych (1989 r.),
- zbadanie wpływu czynników technologicznych na jakość połączeń spawanych wykonanych wiązką elektronów na elementach ze stali do ulepszania cieplnego (praca badawcza Hd-108/I, 1991 r.),
- zbadanie spawalności wiązką elektronów stali o podwyższonej hartowności ze szczególnym uwzględnieniem stali narzędziowych oraz zbadanie wpływu konstrukcji i sposobu przygotowania złączy na jakość połączeń spawanych (praca badawcza Hd-110/III, 1992 r.),
- badania spawalności wiązką elektronów stali o podwyższonej hartowności (praca badawcza Ac-116, 1993 r.),
- badania radiograficzne połączeń spawanych wiązką elektronową i ustalenie klasyfikacji niezgodności (praca badawcza Id-108, 1996 r.),
- badania procesów spawania wysokostopowych stali nierdzewnych w osłonach gazowych i wiązkami skoncentrowanej energii (praca badawcza Ac-119, 1997 r.),
- badania i rozwój urządzeń do spawania skoncentrowanymi wiązkami energii (praca badawcza Fc-83, 1998 r.),
- optymalizacja spawania elektronowego bimetalicznych złączy ze stali o podwyższonej hartowności (Projekt badawczy nr 7TO8C057, 1998 r.),
- nowe materiały i technologie dla spawalnictwa. (Projekt badawczy zamawiany nr PBZO 26-08, 1998).

W ww. okresie wykonano również wiele prac technologicznych dla przemysłu krajowego. Opracowano technologie spawania, np.: wałków sprzęgłowych skrzyń przekładniowych samochodów osobowych (rys. 16a) [32], bimetalowych pierścieni synchronizatorów skrzyń przekładniowych samochodów ciężarowych, półosi kombajnów rolniczych (rys. 16b), elastycznych złączy prądowych zgrzewarek (rys. 17), segmentów tnących pił tarczowych i innych.



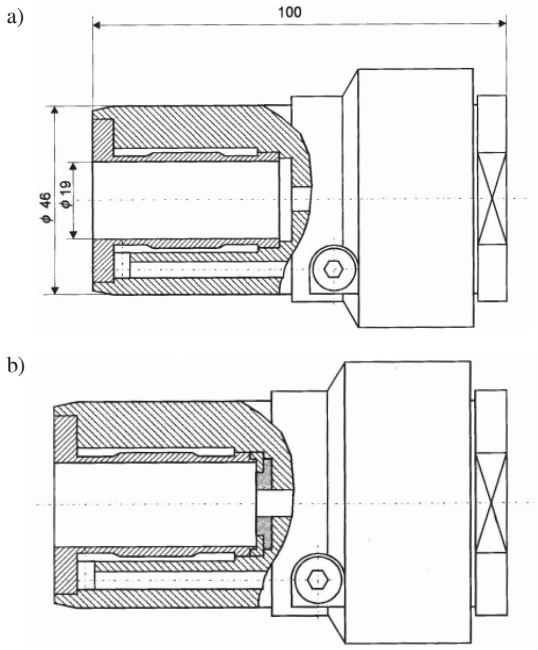
Rys. 16. Spawane elektronowo: a) wałek sprzęgłowy (mat. 18HGM), b) półoś kombajnu rolniczego (mat. St4S+36HMN)



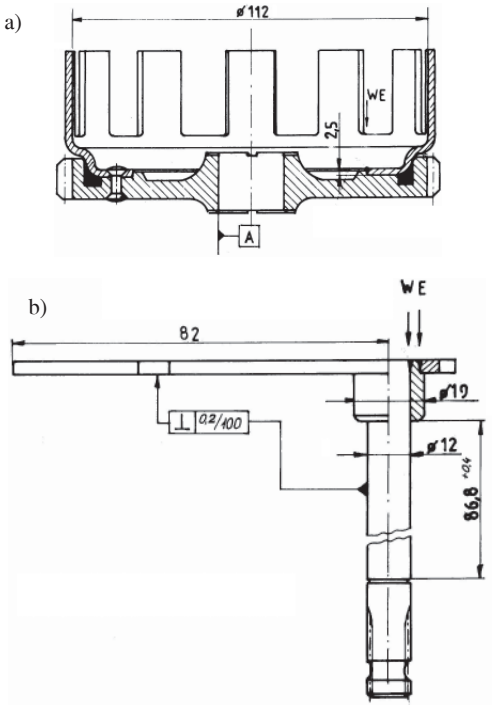
Rys. 17. Elastyczne złącze prądowe zgrzewarek (mat. M1E)

Prowadzono prace, których celem były zmiany upraszczające konstrukcję produkowanych wyrobów z uwagi na zastosowanie spawania elektronowego. Opracowano np. modyfikację konstrukcji oprawki hydraulicznej do mocowania narzędzi do obróbki drewna (rys. 18), czy też modyfikację konstrukcji elementów zespołu napędowego motocykla (rys. 19).

Wiązka elektronów stanowi narzędzie bardzo przydatne w procesie regeneracji wielu elementów maszyn i urządzeń. Umożliwia wspawanie nowo wykonanych fragmentów w miejsce usuniętych wcześniej zużytych powierzchni bez deformacji modyfikowanych elementów maszyn i urządzeń. W tym zakresie opracowano np. technologie regeneracji sprzęgieł kłowych obrabiarek AMTEC czy też tarczy mocującej szlifierki do kół zębatych (rys. 20, 21).



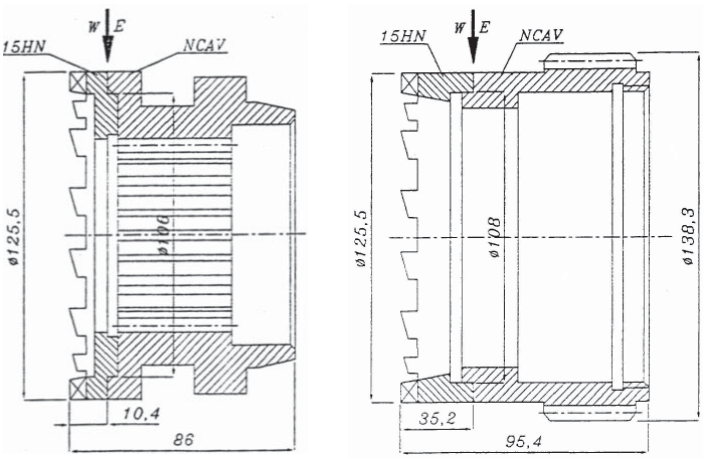
Rys. 18. Oprawka hydrauliczna o konstrukcji zmodyfikowanej przystosowanej do spawania wiązką elektronów (b)



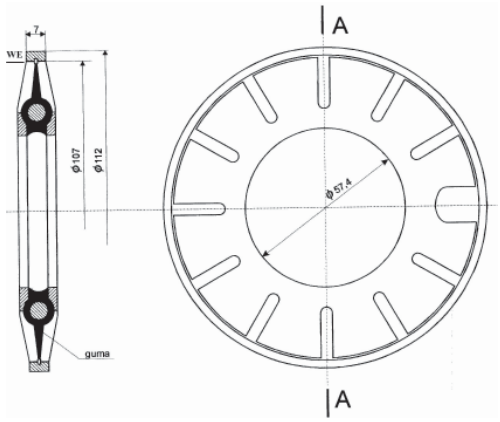
Rys. 19. Koło zębate z koszem (a) oraz wałek zmieniacza zespołu napędowego motocykla o konstrukcji przystosowanej do spawania wiązką elektronów (b)

W końcu lat 90. ubiegłego stulecia obserwowano mniejsze zainteresowanie technologią spawania elektronowego z uwagi na coraz powszechniej dostępne na rynku spawarki laserowe o wystarczająco dużej mocy - urządzenia bardziej wydajne ze względu na brak roboczej komory próżniowej i możliwość spawania w powietrzu. W Instytucie Spawalnictwa również zwrócono uwagę na tę tendencję i przystąpiono do organizacji w 1998 r. laboratorium spawania laserowego.

Technologia spawania wiązką elektronów pozostaje jednak nadal niezastąpiona w przypadku spawania elementów



Rys. 20. Sprzęgła kłowe obrabiarki AMTEC regenerowane za pomocą spawania wiązką elektronów



Rys. 21. Tarcza szlifierki do kół zębatych regenerowana za pomocą wiązki elektronów

Rys. 22. Spawarka elektronowa firmy Cambridge Vacuum Engineering zainstalowana w Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach

o dużej grubości lub wymogu dużej czystości metalurgicznej spoiny. Dlatego też obecnie zainstalowano w Instytucie Spawalnictwa spawarkę elektronową nowej generacji firmy Cambridge Vacuum Engineering (rys. 22), co umożliwi kontynuację badań w zakresie tej technologii spawania.

LITERATURA

1. http://www.steigerwald-eb.de/en/eb-technology/history-of-eb-technology.html
2. http://www.millerwelds.com/resources/articles/welding-history/
3. *Czech J., Pieter J.:* Spawanie wiązką elektronów. Sprawozdanie z pracy badawczej Ac-28, Instytut Spawalnictwa 1964, Gliwice
4. *Zaremba T., Czech J., Pawlak J., Passia H.:* Niskonapięciowe urządzenie do spawania wiązką elektronów. Sprawozdanie z pracy badawczej Ac-32, Instytut Spawalnictwa, Gliwice, 1970.
5. *Czech J., Warsz J.:* Technologia spawania elektronowego. Sprawozdanie z pracy badawczej Ac-51/I, Instytut Spawalnictwa 1972, Gliwice.
6. *Warsz J., Czech J.:* Technologia spawania elektronowego. Część II. Charakterystyka spawarki elektronowej ES-30/5. Sprawozdanie z pracy badawczej AC-51 II, Instytut Spawalnictwa, Gliwice, 1973.
7. *Czech J., Warsz J.:* Spawanie elektronowe miedziano stalowych działek komutatorów. Sprawozdanie z pracy badawczej Ac-55, Instytut Spawalnictwa, Gliwice, 1972.
8. *Warsz J.:* Spawanie elektronowe stali szybkotnących ze stalami węglowymi w produkcji narzędzi tnących. Sprawozdanie z pracy badawczej Ac-56, Instytut Spawalnictwa, Gliwice, 1974.
9. *Warsz J.:* Technologia spawania elektronowego części zaworów wylotowych i wirnika sprężarki. Cz. I Technologia spawania części zaworów wylotowych. Sprawozdanie z pracy badawczej Ac-65/I, Instytut Spawalnictwa, Gliwice, 1976.
10. *Warsz J.:* Zbadanie możliwości modyfikowania spoin materiałem dodatkowym w procesie elektronowego spawania stali żarowytrzymałej i szybkotnącej. Sprawozdanie z pracy badawczej Ac-69, Instytut Spawalnictwa, Gliwice, 1977.
11. *Warsz J.:* Spawanie elektronowe zbiorników ciekłego chloru. Sprawozdanie z pracy badawczej Ac-76, Instytut Spawalnictwa, Gliwice, 1977.
12. *Warsz J.:* Technologiczne warunki spawania elektronowego rur w dnach sitowych. Sprawozdanie z pracy badawczej Hc-46, Instytut Spawalnictwa, Gliwice, 1980.
13. *Szczeciński Z.:* Kronika Instytutu Spawalnictwa z lat 1945-1996.
14. *Warsz J., Zaremba T., Dworak J., Fabian T., Świder J.:* Badania modelowe i opracowanie założeń technicznych dla zespołów do budowy specjalistycznych spawarek elektronowych. Sprawozdanie z pracy badawczej Fc-40, Instytut Spawalnictwa, Gliwice, 1980.
15. *Pilarczyk J., Warsz J.:* Spawanie elektronowe i laserowe źródłem postępu techniczno-ekonomicznego. Przegląd Spawalnictwa, 1983, nr 9.
16. *Warsz J.:* Technologia spawania elektronowego elementów sprzęgieł elektromagnetycznych typu VEP oraz tulejek elektromagnesów. Sprawozdanie z pracy badawczej Ac-93, Instytut Spawalnictwa, Gliwice, 1984.
17. *Warsz J.:* Spawarki elektronowe Instytutu Spawalnictwa. Przegląd Spawalnictwa, 1985, nr 7-8.
18. *Łeśko M., Malczewski K., Zaremba S.:* Zespół napędowy manipulatora do spawarki elektronowej. Prace Instytutu Spawalnictwa, 1988, nr 3-4.
19. *Zaremba T., Wycisk W.:* Spawarki elektronowe. Przegląd Spawalnictwa, 1989, nr 10-12.
20. *Dworak J., Łeśko M., Malczewski K.:* Stanowisko do spawania elektronowego elementów elektrozaworów

i sprzęgieł elektromagnetycznych. Second International Conference on Electron Beam Technologies EBT, Varna, 1988.
21. *Dworak J., Łeśko M., Malczewski K.:* Spawanie elektronowe na spawarkach elektronowych skonstruowanych w Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach. XXXII Krajowa Naukowo-Techniczna Konferencja Spawalnicza, Częstochowa, 1990.
22. *Pilarczyk J.:* Badania w spawalnictwie w pięcioleciu 1986-1990. Prace Instytutu Spawalnictwa, 1987, nr 1-2.
23. *Kurpisz B., Zaremba T.:* Taktowa spawarka elektronowa. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, 1991, nr 1.
24. *Banasik M., Dworak J, Pietrzak M.:* Badania zjawisk fizycznych występujących przy spawaniu i cięciu metali promieniami laserowymi, skoncentrowaną wiązką elektronów oraz strumieniem plazmy dla uzyskania podstaw optymalizacji tych procesów. Sprawozdanie z pracy badawczej Hd-108, Instytut Spawalnictwa, Gliwice, 1991.
25. *Banasik M., Dworak J.:* Badania procesów spawania i cięcia metali przy zastosowaniu źródeł skoncentrowanej energii (laser, wiązka elektronów, plazma, strumień wody). Sprawozdanie z pracy badawczej Hd-110, Instytut Spawalnictwa, Gliwice, 1992.
26. *Banasik M., Dworak J.:* Badanie spawalności wiązką elektronów stali o podwyższonej hartowności. Sprawozdanie z pracy badawczej Ac-116, Instytut Spawalnictwa, Gliwice, 1993.
27. *Dworak J., Czuchryj J., Wnęk T.:* Badania radiograficzne połączeń spawanych wiązką elektronową i ustalenie klasyfikacji niezgodności. Sprawozdanie z pracy badawczej Id-108, Instytut Spawalnictwa, Gliwice, 1996.
28. *Słania J., Banasik M., Dworak J.:* Badanie procesów spawania wysokostopowych stali nierdzewnych w osłonach gazowych i wiązkami skoncentrowanej energii. Sprawozdanie z pracy badawczej Ac-119, Instytut Spawalnictwa, Gliwice, 1997.
29. *Dworak J.:* Badania i rozwój urządzeń do spawania skoncentrowanymi wiązkami energii. Sprawozdanie z pracy badawczej Fc-83, Instytut Spawalnictwa, Gliwice, 1998.
30. *Banasik M.:* Optymalizacja spawania elektronowego bimetalicznych złączy ze stali o podwyższonej hartowności. Projekt badawczy nr 7TO8C057, Instytut Spawalnictwa, Gliwice, 1998.
31. *Banasik M, Czwórnóg B., Brózda J.:* Nowe materiały i technologie dla spawalnictwa. Projekt badawczy zamawiany nr PBZO 26-08, Instytut Spawalnictwa, Gliwice, 1998.
32. *Warsz J., Dworak J.:* Spawanie elektronowe wałków sprzęgłowych. Sprawozdanie z pracy badawczej Ac-108, Instytut Spawalnictwa, Gliwice, 1986.
33. *Warsz J.:* Spawanie elektronowe - nowa jakość w spawalnictwie krajowym. Prace Instytutu Spawalnictwa, 1989, nr 2-3.