

# Spawanie wiązką elektronów

## Electron beam welding

### Streszczenie

Spawanie wiązką elektronów pomimo długoletniej historii i szeroko rozpowszechnionych technologii łukowych oraz laserowych jest nadal powszechnie stosowane w przemyśle. Główne zastosowanie tego wydajnego procesu spawania to przemysł motoryzacyjny, elektroniczny, elektrotechniczny, lotniczy i budowa maszyn.

Technologia umożliwia wykonywanie wysokiej jakości połączeń ze wszystkich spawalnych metali konstrukcyjnych w szerokim zakresie grubości od 0,025 do 300 mm.

W pracy przybliżono charakterystykę metody, zasady kształtowania złączy, przykłady zastosowania wiązki elektronów w przemyśle. Przedstawiono przykłady urządzeń uniwersalnych oraz specjalistycznych jakie są używane w warunkach laboratoryjnych oraz przemysłowych.

**Słowa kluczowe:** spawanie wiązką elektronów, technologia, urządzenia

### Abstract

Electron beam welding, despite long history and widespread arc and laser technology is still widely used in industry. The main application this high efficiency welding process is: automotive, electronics, electrical engineering, aerospace and mechanical engineering industry. The technology ensures high-quality welded joints from the all structural metals in a wide range of thickness from 0.025 to 300 mm.

In the paper approximated the characteristics of methods, principles of design of welded joints, examples of the application of the electron beam in the industry. The examples of universal and specialized equipment which are used in laboratory and industrial applications are also presented.

**Keywords:** electron beam welding, technology, machines

### Wstęp

Stale rozwijający się przemysł poszukuje nowych rozwiązań technologicznych, które będą zapewniały obniżenie kosztów produkcji, wprowadzenie nowego produktu na rynek lub ulepszenie istniejącego wyrobu. Jednym z takich rozwiązań jest zastosowanie spawania wiązką elektronów. Chociaż sama technologia znana jest od przeszło 60 lat w ostatnim dziesięcioleciu obserwuje się wzrost zainteresowania tak ze strony jednostek naukowych, jak i przemysłu.

Skoncentrowaną wiązkę elektronów użyto po raz pierwszy do spawania w komorze próżniowej w latach 50 ubiegłego wieku w Niemczech i Francji. J.A Stohr z francuskiej Komisji Energii Atomowej publicznie przedstawił proces spawania elektronowego w dniu 23 listopada 1957 r. Niemiecki fizyk K.H. 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].

Również w Polsce trwały intensywne prace badawcze w zakresie projektowania i wytwarzania urządzeń do spawania wiązką elektronów. Pierwsze urządzenia zostały zaprojektowane i wykonane w Przemysłowym Instytucie Elektroniki oraz Instytucie Technologii Elektronowych Politechniki Wrocławskiej. Należy nadmienić, że krajowe konstrukcje były w pełni porównywalne z konstrukcjami

czołowych światowych producentów spawarek elektronowych [2]. Również Instytut Spawalnictwa w Gliwicach włączył się w działania dotyczące wykorzystywania wiązki elektronów do łączenia materiałów konstrukcyjnych. Pierwsza praca badawcza została wykonana w roku 1964, a pierwsze urządzenie, spawarka EUS -25/6 wykonana w Przemysłowym Instytucie Elektroniki, zostało zainstalowane w roku 1970 (rys. 1) [1].



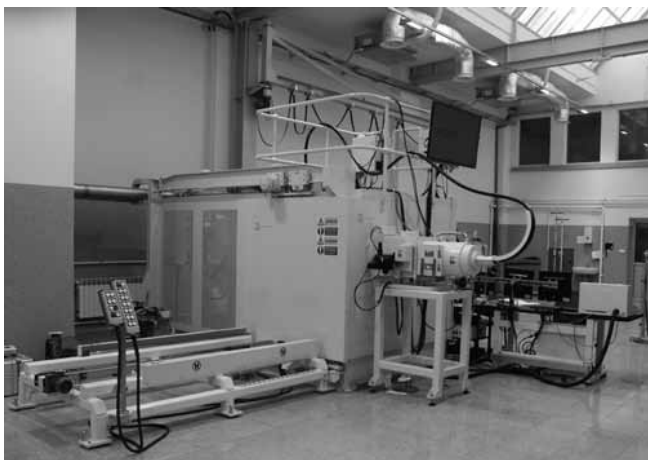
**Rys. 1.** Pierwsza spawarka elektronowa model EUS-25/6 (6 kW, 25kV) zainstalowana w Instytucie Spawalnictwa w roku 1970  
**Fig. 1.** First electron beam welding machine model EUS-25/6 (6 kW, 25 kV) installed at the Instytut Spawalnictwa in the year of 1970

Pomimo długiej historii samego procesu, spawanie przy użyciu wiązki elektronów to wciąż prędko rozwijająca się dziedzina tak od strony zastosowań przemysłowych, jak i naukowych. Do niedawna sądzono, że szybki rozwój technologii laserowej zwłaszcza laserów wykorzystujących generatory ciała stałego spowoduje, że technologie elektronowe stracą na znaczeniu. Tak się jednak nie stało, a wręcz przeciwnie: technologie jak i urządzenia są stale rozwijane, a takie światowe firmy jak np. ProBeam, PTR, Sciaky, Focus, CVE oferują szeroką gamę urządzeń, od uniwersalnych do bardzo wyspecjalizowanych.

Instytut Spawalnictwa wychodząc naprzeciw wymaganiom głównie polskiego przemysłu w roku 2014 zakupił i zainstalował nowoczesne urządzenie do spawania i modyfikowania powierzchni materiałów (rys. 2) tworząc jednocześnie laboratorium technologii elektronowych dla inżynierii materiałowej. Zamiarem Instytutu jest utworzenie, wraz z krajowymi ośrodkami akademickimi centrum naukowo-technologicznego w zakresie technologii elektronowych dla potrzeb przemysłu w tym lotniczego oraz dla prowadzenia szkoleń w zakresie stosowania technologii elektronowych w przemyśle dla studentów uczelni wyższych.

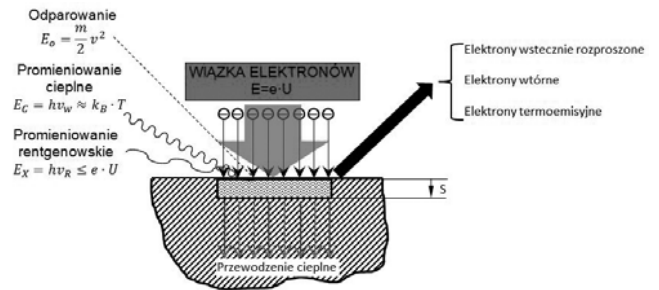
## Charakterystyka procesu spawania wiązką elektronów

Spawanie wiązką elektronów polega na tworzeniu trwałego połączenia konstrukcji metalowych przez stopienie obszaru złącza spawanego w wysokiej próżni w zakresie  $10^{-3}$  do  $10^{-6}$  mbar, w średniej lub zredukowanej próżni od 75 do 1000 mbar, lub bez próżni (przy ciśnieniu atmosferycznym), energią cieplną uzyskaną w wyniku bombardowania obszaru złącza silnie skoncentrowaną wiązką elektronów o dużej energii, nawet do  $10^{12}$  W/m<sup>2</sup> [3]. Wiązka elektronów emitowana z nietopliwej katody, żarzonej najczęściej bezpośrednio, przyspieszana jest wysokim napięciem w zakresie od 10 do 200 kV do prędkości ponad 100 km/s. Bombardowanie obszaru złącza spawanego silnie zogniskowaną wiązką elektronów, o średnicy ogniska rzędu 0,1-0,8 mm, powoduje zamianę energii kinetycznej elektronów na energię cieplną, absorbowaną i stapiającą spawany obszar złącza konstrukcji [3]. Na rysunku 3 przedstawiono schemat oddziaływania wiązki elektronów z powierzchnią materiału.



**Rys. 2.** Urządzenie elektronowe model XW150:30/756 do spawania i modyfikowania powierzchni zainstalowane w Instytucie Spawalnictwa w roku 2014, (30 kW, 150 kV), wyprodukowane przez Cambridge Vacuum Engineering (CVE)

**Fig. 2.** Electron beam welding machine model XW150:30/756 for welding and surface modification installed at the Instytut Spawalnictwa in the year of 2014, (30 kW, 150 kV), produced by the Cambridge Vacuum Engineering (CVE)



**Rys. 3.** Schemat oddziaływania wiązki elektronów z powierzchnią materiału

**Fig. 3.** Schema of interaction between electron beam and surface of the welded material

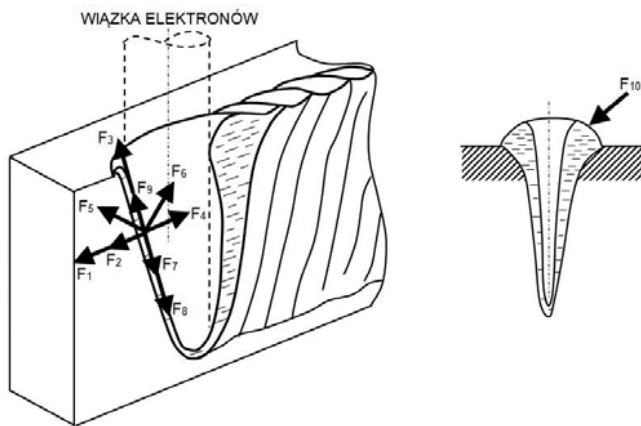
Elektrony, padając na materiał, oddziałują z elektronami materiału i powodują emisję m.in.:

- elektronów wstecznie rozproszonych (odbitych),
- elektronów wtórnych,
- elektronów Augera,
- promieniowania rentgenowskiego,
- promienia fluorescencyjnego,
- promieniowania cieplnego.

Każdy z rodzajów promieniowania jest emitowany z innej głębokości materiału i z różnej jego objętości, przy czym zawsze ze wzrostem energii wiązki pierwotnej elektronów (czyli ze wzrostem napięcia przyspieszającego) rośnie głębokość i objętość obszaru emisji. Równocześnie z napięciem rośnie średnica tego obszaru, która jest większa od średnicy wiązki. Dodatkowo na głębokość wnikania elektronów wpływa liczba atomowa składników spawanego materiału. Z najmniejszej głębokości emitowane są elektrony Augera – są one emitowane przez przypowierzchniową warstwę o grubości kilku atomów, czyli około 1 nm. Są to elektrony wtórne o charakterystycznej energii zależnej od rodzaju atomów rozpraszających. Sygnał z tego promieniowania wykorzystywany jest w mikroskopach elektronowych do badania składu chemicznego cienkiej warstwy. Z większej głębokości (5-50 nm) jest emitowane promieniowanie elektronów wtórnych. Są to elektrony wybijane z orbit atomowych przez elektrony pierwotne. Z jeszcze większej głębokości są emitowane elektrony odbite. Są to elektrony pierwotne ulegające wstępnemu odbiciu, a intensywność ich emisji zależy głównie od liczby atomowej atomów występujących w materiale. Emisja fotonów, czyli fluorescencja, w zakresie widzialnym zachodzi gdy elektrony wtórne rekombinują z dziurami powstałymi w niektórych materiałach w wyniku rozpraszania. Kolejnym efektem oddziaływania elektronów z materią jest emisja promieniowania rentgenowskiego – hamowania (ciągłego) i charakterystycznego. Widmo ciągłe powstaje w wyniku hamowania padających elektronów w polu elektrostatycznym jąder atomowych. Natomiast charakterystyczne promieniowanie rentgenowskie powstaje w wyniku emisji energii na skutek przeskoków elektronu z wyższej orbity na wolne miejsce na niższej orbicie po elektronie wybitym przez elektron z wiązki pierwotnej. Długość fali i energia tego promieniowania zależą od liczby atomowej Z pierwiastka i nie zależą od fizycznego i chemicznego stanu materiału. Na podstawie analizy długości fali lub energii i intensywności tego promieniowania można określić ilościowo i jakościowo skład chemiczny materiału (w mikroskopach elektronowych) [4]. Elektrony pierwotne wzbudzają ponadto oscylacje sieci krystalicznej, której końcowym efektem jest emisja promieniowania cieplnego z powierzchni materiału.

Po osiągnięciu w miejscu koncentracji wiązki elektronów gęstości mocy rzędu  $10^{10}$  W/m<sup>2</sup> ilość doprowadzanej energii jest tak duża, że odprowadzenie wytworzonego ciepła nie jest możliwe ani przez przewodność cieplną materiału, ani przez konwekcję, ani przez promieniowanie cieplne.

Metal w punkcie oddziaływania wiązki nie tylko się topi, ale zaczyna parować. Tworzy się wówczas, wypełniony parami i otoczony płaszczem stopionego metalu, wąski kanał – kapilara, przez który wiązka elektronów wnika w głębsze warstwy materiału [5].



**Rys. 4.** Siły utrzymujące kanał w równowadze,  $F_1$  – odrzut par materiału,  $F_2$  – ciśnienie par w kanale,  $F_3$  – siła tarcia między strumieniem par a warstwą ciekłą,  $F_4$  – napięcie powierzchniowe,  $F_5$  – siła elektromagnetyczna,  $F_6$  – siła termokapilarna (wskutek różnicy temperatur między tylną i przednią ścianką kanału),  $F_7$  – ciśnienie elektronów,  $F_8$  – ciśnienie hydrostatyczne,  $F_9$  – siła termokapilarna (wskutek gradientu temperatury na przedniej ściance),  $F_{10}$  – napięcie powierzchniowe, [6]

**Fig. 4.** Forces which maintain the cavity in equilibrium:  $F_1$  – force due to evaporated metal atoms,  $F_2$  – force due to vapor pressure in cavity,  $F_3$  – friction between stream of vapor and liquid film,  $F_4$  – surface tension,  $F_5$  – electromagnetic force,  $F_6$  – thermocapillary force due to difference between temperature of front and back walls of cavity,  $F_7$  – force due to electron pressure,  $F_8$  – force due to hydrostatic pressure,  $F_9$  – thermocapillary force due to temperature gradient of front wall,  $F_{10}$  – surface tension [6]

Układ sił utrzymujący kanał w równowadze przedstawiono na rysunku 5. Kapilara (kanał gazodynamiczny) tworzy się przede wszystkim w wyniku oddziaływania ciśnienia par metali i ich sił odrzutu. Mniejszy udział ma bezpośrednie odparowanie metalu (ok. 2% objętości kapilary) oraz ciśnienie wiązki elektronów, według pomiarów [7] wiązka elektronów o napięciu przyspieszającym 30 kV i natężeniu prądu 150 mA oddziałuje na stal niestopową z siłą 1G. Siła elektromagnetyczna przy najczęściej stosowanych zakresach prądu wiązki jest wielkością nieistotną [8]. Przy odpowiednio dobranej prędkości spawania utworzona kapilara przyjmuje w czasie przemieszczania się w spawanym materiale „dynamiczną stabilność”. Na przedniej ściance kapilary następuje ciągłe topienie materiału, a w tylnej jej części – krzepnięcie. Płaszcz ciekłego metalu otaczający kapilarę ma nierównomierną grubość. Jest bardzo cienki od strony strefy topienia i szerszy w strefie krzepnięcia spoiny, a od strony powierzchni oddziaływania wiązki, między punktem padania wiązki a strefą krzepnięcia, przybiera niekiedy kształt rozszerzającej się łuski. W ciekłym płaszczu kapilary występuje transport materiału. Przemieszczanie metalu z przedniej ścianki na tylną jest spowodowane [9] intensywnym parowaniem metalu na przedniej ściance, wspomagającym przenoszenie metalu do strefy krzepnięcia oraz działania siły termokapilarnej [8]. Siła termokapilarna pojawia się w wyniku różnic sił napięcia powierzchniowego spowodowanych gradientem temperatury między strefą topienia i krzepnięcia. Transport ciekłego metalu w obszarze kanału odbywa się wokół wiązki (w płaszczyźnie prostopadłej do wiązki elektronów), w kierunku przeciwnym do kierunku spawania oraz w kierunku padania wiązki elektronów i przeciwnie do niego [5].

Wiązka elektronów oddziałując na materiał spawany traci w czasie ruchu w kierunku dna kapilary swą energię przy zderzeniach ze zjonizowanymi parami metalu, odpryskami ciekłego metalu płaszczu kapilary, a przede wszystkim przez oddziaływanie na powierzchnię ciekłego metalu płaszczu kapilary – głównie na jego dno oraz ścianki boczne. Wywołuje to okresową zmianę ciśnienia par w kanale i kanał może być zamykany pod wpływem sił napięcia powierzchniowego przez cienką, o grubości kilku mikrometrów, warstwę ciekłego metalu. Badania przeprowadzone za pomocą techniki rentgenowskiej (prześwietlenie kapilary) wykazały że kapilara może być zamykana również przez wypychany z jej dna ciekły metal. Zamykanie następuje wówczas w miejscu, w którym energia kinetyczna strumienia wypieranej cieczy maleje do zera. Dalsze, ciągłe oddziaływanie wiązki elektronów powoduje z kolei przetapianie zamykających kapilarę warstwek metalu. Proces ten może odbywać się cyklicznie z częstotliwością 150 Hz. Tym samym punkt oddziaływania wiązki na materiał spawany zmienia swe położenie. Ruch tego punktu jest ruchem drgającym o kierunku drgań zgodnym z kierunkiem padającej na materiał wiązki elektronów. Punkt ten w określonych warunkach może się przemieszczać z prędkością do 6,5 m/s, oscylacje tego punktu występują zarówno przy stacjonarnym oddziaływaniu wiązki na materiał, jak i w czasie spawania z pełnym i niepełnym przetopem [5].

## Urządzenia do spawania wiązką elektronów

Od momentu zainstalowania pierwszej spawarki elektronowej w przemyśle minęło prawie sześćdziesiąt lat, a pomimo tego w ostatnim dziesięcioleciu nastąpił dynamiczny rozwój urządzeń. Światowi producenci oferują zarówno urządzenia uniwersalne jak i specjalistyczne. O wyborze urządzenia decyduje wiele czynników, takich jak: rodzaj spawanych materiałów, wielkość, kształt i masa elementów, przewidywana wydajność procesu spawania, a także to czy proces będzie prowadzony samodzielnie czy też będzie częścią linii technologicznej. Uwzględnienie wszystkich czynników pozwala zaprojektować i wykonać urządzenie tak, aby uzyskać wymaganą jakość spawanych elementów oraz ograniczyć koszty eksploatacyjne [10].

Nowoczesne urządzenia nawet o napięciu przyspieszającym 150 kV są całkowicie bezpieczne dla użytkowników i spełniają wymagania w zakresie ochrony radiologicznej. Ponadto urządzenia są wyposażone w szereg systemów ułatwiających ich obsługę, do których można zaliczyć m.in.:

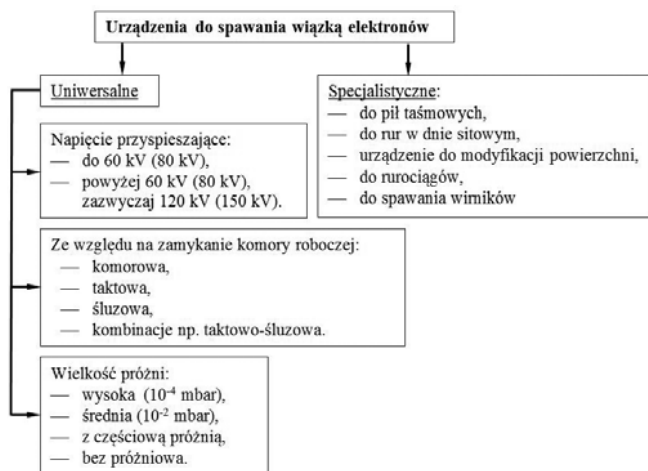
- stoły robocze, obrotniki oraz manipulatory sterowane numerycznie,
- automatyczny układ korekcji wiązki,
- układ obserwacji spawanego elementu przy użyciu kamery CCD,
- układ obserwacji spawanego elementu przy użyciu elektronów wstecznie rozproszonych,
- automatyczny układ śledzenia osi złącza,
- automatyczny układ kontroli procesu,
- automatyczny układ kontroli jakości złącza.

Ze względu na wymagania technologiczne, produkcyjne i metalurgiczne stosowane są następujące rozwiązania konstrukcji spawarek do spawania wiązką elektronów [3]:

- spawarki przeznaczone do spawania w wysokiej próżni, z działem umieszczonym wewnątrz lub na zewnątrz komory roboczej,
- spawarki z częściową próżnią lub o zredukowanym ciśnieniu (RPEB – Reduced Pressure Electron Beam Welding) z komorami lokalnymi zamocowanymi na spawanej konstrukcji,

spawarki bezpróżniowe (NVEBW – Non Vacuum Electron Beam Welding).

Podział urządzeń do spawania wiązką elektronową przedstawiono na rysunku 5. Przykład urządzenia specjalistycznego taktowego do spawania wirników przedstawiono na rysunku 6, natomiast urządzenie uniwersalne komorowe na rysunku 2.



Rys. 5. Podział urządzeń do spawania wiązką elektronową  
Fig. 5. Division of electron beam welding machines



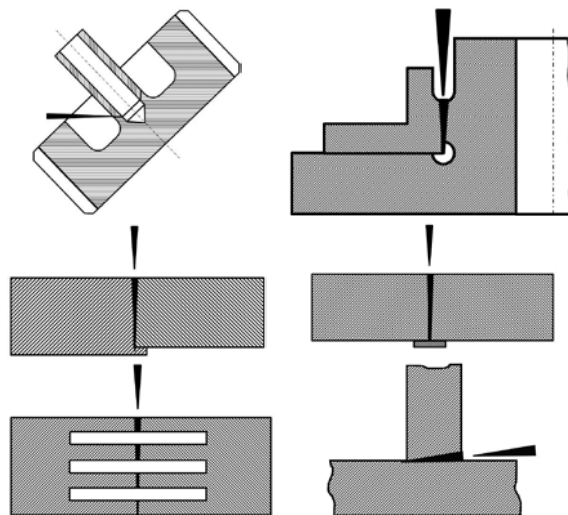
Rys. 6. Przykład specjalistycznego urządzenia do spawania wiązką elektronową elementów turbin [11]  
Fig. 6. Example of electron beam welding machine for turbocharger [11]

## Zasady kształtowania złączy spawanych wiązką elektronową

Technologia spawania wiązką elektronową, ze względu na obszar zastosowania i jakość połączeń spawanych, jest nieporównywalna z technologiami spawania łukowego, a w niektórych przypadkach również ze spawaniem wiązką laserową [12]. Odmienne są też zasady konstruowania złączy spawanych tą metodą i możliwości wykorzystania unikatowych, w niektórych przypadkach możliwości tej technologii. Należy jednak podkreślić, iż najefektywniej technologię można wykorzystać przy produkcji nowych wyrobów, w przypadku których już na etapie projektowania przewidziano tę metodę łączenia. Przy ocenie konstrukcji pod względem zastosowania spawania wiązką elektronową należy zwrócić

uwagę na położenie oraz dostęp do spoiny. Niemal każda spoina dostępna optycznie może być wykonana przy użyciu wiązki elektronów [13]. Na rysunku 7 przedstawiono przykłady rozwiązań konstrukcyjnych złączy spawanych.

W większości przypadków proces spawania wiązką elektronów realizowany jest bez materiału dodatkowego. Jednak z powodów metalurgicznych stosuje się materiał dodatkowy w postaci taśmy wprowadzonej bezpośrednio pomiędzy spawane elementy [14]. Można również prowadzić proces spawania z materiałem dodatkowym w postaci drutu lub proszku podobnie jak w technologiach laserowych. Równocześnie należy zaznaczyć, iż elementy przed spawaniem powinny być starannie wyczyszczone. Obecność powłok wytwarzanych takimi metodami jak: nawęglanie, azotowanie, chromianowanie, fosforowanie może prowadzić do porowatości oraz pęknięć w spoinie, co w konsekwencji spowoduje obniżenie wytrzymałości złącza [14].



Rys. 7. Przykłady złączy spawanych wykonywanych przy użyciu wiązki elektronów [13]  
Fig. 7. Examples of weld types produced with electron beam welding [13]

## Zastosowanie spawania wiązką elektronów

Spawanie wiązką elektronów ze względu na specyfikę procesu jest wykorzystywane, m.in. do [15,16]:

- spawania elementów o grubości aż do 300 mm w jednym przejściu,
  - spawanie elementów o małej grubości (od 0,025 mm), ale z bardzo dużymi prędkościami, np. spawanie blach aluminiowych o grubości 1 mm z prędkością 60 m/min,
  - spawanie materiałów reaktywnych lub trudnotopliwych jak np.: wolfram, beryl,
  - wykonywanie złączy z materiałów różniących się składem chemicznym, własnościami fizycznymi i mechanicznymi, jak np.: stal ze stopem aluminium.
- Spawanie wiązką elektronów stosowane jest w przemyśle:
- motoryzacyjnym,
  - lotniczym,
  - energetycznym i elektroenergetycznym,
  - budowie maszyn,
  - medycznym,
  - szynowym i kolejnictwie.

Przykładowe porównanie spawania przy użyciu wiązki elektronów z innymi procesami przedstawiono w tablicy I. Obliczenia wykonano dla elementu stalowego o grubości 150 mm.

Na rysunku 8 przedstawiono przykładowe elementy próbne wykonane przy użyciu wiązki elektronów w Instytucie Spawalnictwa.



**Rys. 8.** Przykładowe elementy spawania wiązką elektronów w Instytucie Spawalnictwa  
**Fig. 8.** Example of electron beam elements welding at Instytut Spawalnictwa

**Tablica I.** Porównanie spawania wiązką elektronów z innymi procesami spawania elementu stalowego o grubości 150 mm [17]  
**Table I.** A comparison of electron beam welding with other welding processes for a steel plate 150 mm in thickness [17]

Parametr	Proces spawania			
	Wiązka elektronów	MIG/MAG wąskoszczelinowe	Łuk kryty wąskoszczelinowe	Łuk kryty
Natężenie prądu	0,27 A	260 A	650 A	510 A
Napięcie	150 kV	30 V	30 V	28 V
Przekrój poprzeczny rowka spawalniczego	800 mm <sup>2</sup>	2100 mm <sup>2</sup>	4900 mm <sup>2</sup>	5900 mm <sup>2</sup>
Ilość ściegów	1	35	81	143
Materiał dodatkowy	0	23 kg	54 kg	66 kg
Wydajność stapiania	7,7 kg/h	5 kg/h	13 kg/h	9 kg/h
Czas spawania elementu próbnego	27 min	4 h 35 min	4 h 11 min	7 h 27 min

## Podsumowanie

Pomimo faktu, iż zjawisko głębokiej penetracji przy spawaniu wiązką elektronów zostało odkryte prawie 60 lat temu (1958 r.) sam proces spawania wciąż jest fascynujący i powszechnie stosowany w wielu gałęziach przemysłu. Unikalne własności samego procesu sprawiają, że na świecie ponad 3000 firm wykorzystuje tę technologię do produkcji masowej, mało seryjnej lub wytworzenia pojedynczych elementów. Nowym obszarem wykorzystania wiązki elektronów, które umożliwiło dopiero rozwinięcie systemów sterowania, jest modyfikacja powierzchni i szybkie prototypowanie. Ponadto należy podkreślić, iż pomimo ciągłego i szybkiego rozwoju urządzeń do spawania wiązką laserową, nadal spawanie wiązką elektronową jest niezastąpioną technologią umożliwiającą wprowadzenie na rynek nowych wyrobów lub znaczące ograniczenie kosztów wytwarzania obecnie oferowanych produktów.

## Literatura

- [1] J. Dworak, „Spawanie wiązką elektronów - 50 lat doświadczeń Instytutu Spawalnictwa” Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, vol.59(1), s. 53-62, 2015.
- [2] S. Wójcicki, „Zastosowanie termicznych oddziaływań skoncentrowanych wiązek elektronowych dużej mocy z ciałem stałym w polskim przemyśle i nauce. Polska elektronika próżniowa wczoraj i dziś”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2005.
- [3] A. Klimpel, „Podręcznik spawalnictwa”. Tom 1, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.
- [4] A. Barbacki, „Mikroskopia elektronowa”, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2007.
- [5] J. Dworak, „Spawanie stali ulepszenia cieplnego oscylującą wiązką elektronów” Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, vol.36(4), s. 54-57, 1992.
- [6] K. Friedel, „Oddziaływanie wiązki elektronowej na ciało stałe w warunkach głębokiej penetracji”, Prace naukowe Instytut Technologii Elektronowej Politechniki Wrocławskiej nr 27, seria Monografie 8, 1983.
- [7] Y. Arata, K. Terai, S. Matsuda, “Study on characteristics of weld defects and its prevention in electron beam welding (Report 3)”, Transaction of Japan Welding Research Institute, nr 1, s. 81-83, 1973.
- [8] G. Nikolajev, „Specjalnyje metody svarki”, Moskva, Maszynostrojenie, 1975.
- [9] W. Barwicz, „Wiązka elektronowa w przemyśle”, WNT, Warszawa 1989.
- [10] M.St. Węglowski, J. Dworak, S. Błacha, „Spawanie wiązką elektronów – urządzenia” Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, vol. 58(4), s. 46-52, 2014.
- [11] Materiały reklamowe CVE, 2012
- [12] M.St. Węglowski, J. Dworak, S. Błacha, „Spawanie wiązką elektronów - charakterystyka metody” Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, vol.58(3), s. 25-32, 2014.
- [13] J. Dworak, M. Pietrzak, „Podstawowe zasady kształtowania złączy spawanych wiązką elektronów – charakterystyka złączy” Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, vol.37(3), s. 27-31, 1993.
- [14] „Fundamental principles for the designing of components for electron beam welding in fine and high vacuums”. Technical Bulletin DVS 3201, 2010.
- [15] K.R. Schulze, “Electron beam welding. Schweißen und Schneiden Wissen Kompakt – compact knowledge”, 2012.
- [16] Z. Sun, R. Karppi, “The application of electron beam welding for the joining of dissimilar metals: an overview” Journal of Materials Processing Technology, vol. 59, s. 257-267, 1996.
- [17] A. Saxena, Electron beam welding. Materiały szkoleniowe.