

# Wytwarzanie powłok i modyfikacja powierzchni przy użyciu wiązki elektronów w spawalnictwie

Production of coatings and surface modification using electron beam in welding

## Streszczenie

Wiązka elektronów, pomimo szeroko rozpowszechnionych technologii łukowych oraz laserowych, jest nadal powszechnie stosowana w przemyśle: motoryzacyjnym, budowie maszyn, elektronicznym, elektrotechnicznym i lotniczym. Technologia umożliwia wykonywanie wysokiej jakości połączeń z wszystkich spawalnych metali konstrukcyjnych. Jest również stosowana do wytwarzania warstw i powłok poprzez napawanie i modyfikowanie powierzchni. W artykule przybliżono przykłady zastosowania wiązki elektronów uwzględniając szybkie prototypowanie, teksturyzację powierzchni, napawanie przy użyciu drutu oraz proszku, stopowanie. Podano informacje dotyczące możliwych technik jakie mogą być stosowane w trakcie w/w procesów.

**Słowa kluczowe:** wiązka elektronów, inżynieria powierzchni, modyfikowanie materiałów

## Abstract

Electron beam, despite widespread arc and laser technologies, is still widely used in industry such as: automotive, mechanical engineering, electronics, electrical and aerospace. The technology allows to produced high quality welded joints from all weldable structural metals. It is also used for the production of films and coatings by deposition and surface modification. In the paper approximated examples of the use of the electron beam given by the rapid prototyping, texturisation surface, cladding with wire and powder as well as alloying. Provides information about the possible techniques that can be used during these processes.

**Keywords:** electron beam, surface engineering, modification of materials

## Wstęp

Struktura i własności warstw powierzchniowych decydują o własnościach użytkowych wielu produktów i ich elementów, umożliwiając jednocześnie użycie możliwie tanich materiałów na rdzeń elementu (materiał podłoża), od którego wymagane będą z reguły niższe własności użytkowe. W wyniku odpowiedniego doboru materiałów elementu wraz z procesami kształtującymi jego strukturę i własności oraz rodzaju technologii warstwy powierzchniowej, zapewniającej wymagane własności użytkowe, możliwe jest również najkorzystniejsze zestawienie własności rdzenia i warstwy powierzchniowej wytworzonego elementu [1]. Możliwe najwyższe własności eksploatacyjne warstw wierzchnich, przy możliwie najwyższych efektach ekonomicznych, mogą zapewnić technologie spawalnicze w tym te wykorzystujące jako źródło ciepła wiązkę elektronów. Wśród technologii opierających się na wiązce elektronów można wyróżnić: napawanie przy użyciu drutu, napawania przy użyciu proszku, stopowanie, przetapianie, teksturyzację powierzchni i obróbkę cieplną. W pracy przedstawiono podstawy procesów spawalniczych wykorzystujących wiązkę elektronów, własności otrzymanych warstw i powłok oraz możliwe zastosowania.

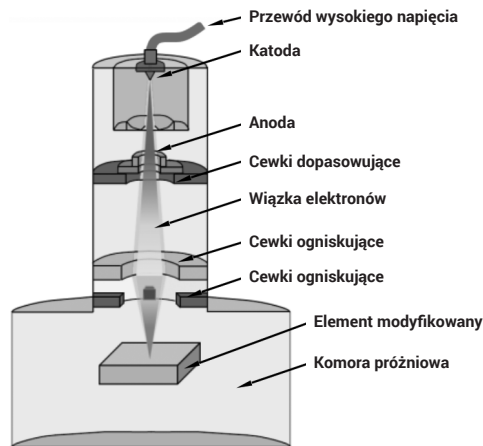
## Opis procesu

W procesie napawania, przetapiania lub stopowania modyfikowany materiał bombardowany jest wiązką elektronów o dużej gęstości energii. Prawie natychmiastowa zamiana energii kinetycznej elektronów na ciepło (nagrzewanie materiału następuje w wyniku pochłaniania energii wiązki na skutek sprężystych i niesprężystych zderzeń elektronów z siecią krystaliczną materiału) w miejscu zderzenia z powierzchnią przedmiotu obrabianego powoduje lokalne stopienie materiału i wytworzenie obszaru zmodyfikowanego po jego ponownym zakrzepnięciu. Energię kinetyczną wiązki elektronów można skoncentrować na bardzo małej powierzchni, dzięki czemu osiąga się gęstości mocy sięgające  $10^{12}$  W/m<sup>2</sup>. Tak znaczna koncentracja energii jest niemożliwa w konwencjonalnych źródłach ciepła, a nawet w laserach. Duża gęstość mocy wiązki elektronów umożliwia bardzo szybkie topienie (proces adiabatyczny), co wyróżnia technologie elektronowe spośród innych metod modyfikacji warstw wierzchnich, w których szybkość topienia jest ograniczona przez przewodnictwo cieplne [2]. Wiązka elektronów wytwarzana jest w dziale przedstawionym na rysunku 1. Elektrony emitowane przez termokatodę

Prof. dr hab. inż. Jan Pilarczyk, dr inż. Marek St. Węglowski – Instytut Spawalnictwa, Gliwice.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: marek.weglowski@is.gliwice.pl

uzyskują, między katodą i anodą w polu elektrycznym, prędkość sięgającą od 30 do 70% prędkości światła przy napięciach przyspieszających 25÷200 kV. Strumień przyspieszonych elektronów wydostaje się przez otwór w anodzie przyjmując kształt rozbieżnej wiązki elektronów. Tak uformowana wiązka jest następnie skupiana za pomocą soczewki magnetycznej w celu uzyskania odpowiedniego przestrzennego rozkładu gęstości mocy w obszarze modyfikacji materiału. Typowa wiązka elektronów ma w miejscu oddziaływania na materiał średnicę 0,5÷1,5 mm co umożliwia stopienie, a nawet odparowanie prawie wszystkich materiałów. Szczegóły dotyczące samego procesu przedstawiono we wcześniejszej pracy [3, 4].

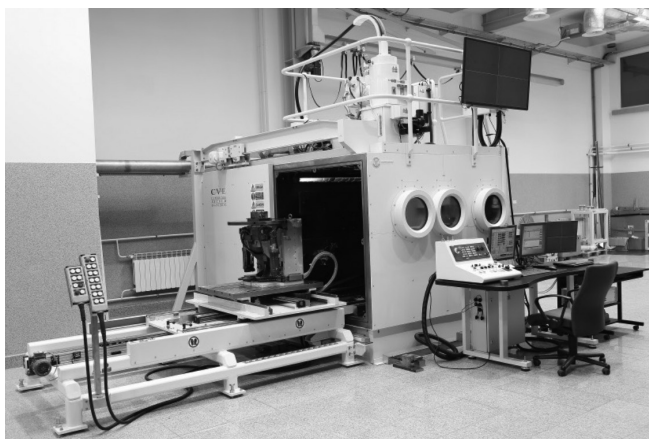


**Rys. 1.** Schemat budowy urządzenia do spawania i modyfikacji powierzchni przy użyciu wiązki elektronów [5]

**Fig. 1.** Schema of electron beam machine for welding and surface modification [5]

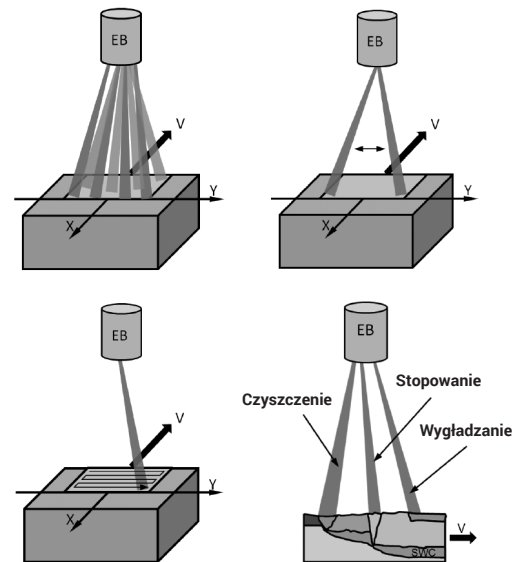
Procesy technologiczne wykorzystujące wiązkę elektronów mogą być prowadzone przy wykorzystaniu urządzeń uniwersalnych oraz specjalizowanych. Na rysunku 2 przedstawiono uniwersalne urządzenie do spawania i modyfikacji materiałów znajdujące się w Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach. Urządzenie wyposażone jest w działło o maksymalnym napięciu przyspieszającym 150kV (moc 30 kW) i komorę o objętości 4,95 m<sup>3</sup>. Urządzenie umożliwia również prowadzenie procesów technologicznych z materiałem dodatkowym w postaci drutu.

Modyfikacja powierzchni przy użyciu wiązki elektronów realizowana jest poprzez wykorzystanie systemu odchylenia wiązki elektronów. Umożliwia to przy jednym ustawieniu elementu obrabianego modyfikację większej powierzchni lub też, prowadzenie wielokrotnego procesu. Na rysunku 3 przedstawiono techniki odchylenia wiązki elektronów stosowane przy modyfikacji powierzchni.



**Rys. 2.** Widok ogólny elektronowego urządzenia do spawania i modyfikowania powierzchni w Instytucie Spawalnictwa

**Fig. 2.** View of electron beam machine for welding and surface modification at Instytut Spawalnictwa

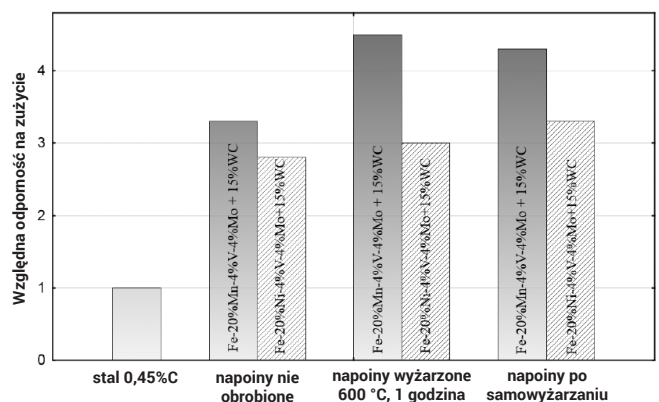


**Rys. 3.** Techniki odchylenia wiązki elektronów stosowane przy modyfikacji powierzchni, a) modyfikacja z wieloma wiązkami, b) modyfikacja poprzez skanowanie powierzchni, c) meander, d) proces wieloetapowy [6]  
**Fig. 3.** Deflection techniques of electron beam for surface modification a) multi track technique, b) scan technique, c) meander technique, d) multi process technique [6]

## Napawanie wiązką elektronów

Proces napawania przy wykorzystaniu wiązki elektronów jest unikalną technologią umożliwiającą wprowadzenie bezpośrednio do jeziorka ciekłego metalu materiału dodatkowego w postaci proszku lub drutu. Dodatkowo prowadzona jest rafinacja ciekłego metalu gdyż proces zazwyczaj prowadzony jest w próżni. Nowoczesne urządzenie zapewnia precyzyjną regulację parametrów wiązki jak np. moc wiązki lub wielkość ogniska. Jest to szczególnie ważne w celu zapewnienia minimalnego wtopienia, minimalnej objętości stopionego metalu, a z drugiej strony wykorzystania energii wiązki gęstości aż do 10<sup>12</sup> W/m<sup>2</sup>. Procesy napawania mogą być prowadzone w jednym przejściu lub też wielokrotnie, co umożliwia optymalizację składu chemicznego i własności uzyskanych warstw [7].

W pracy [8] przedstawiono wyniki badań procesu napawania przy użyciu proszku, w którym elektromagnetyczny podajnik proszku zapewniał wydajność na poziomie 40 g/min. Badania obejmowały wytwarzania warstw napawanych



**Rys. 4.** Względna odporność na zużycie ε warstw napawanych, 1 – materiał podłoża 0,45 % C stal; 2 – napoiny wykonane przy wykorzystaniu wiązki elektronów, 3 – napoiny wyżarzane w temperaturze 600 °C przez 1 h; 4 – napoiny samowyżarzane. [8]

**Fig. 4.** Relative wear resistance ε of electron beam clad coatings determined by loose particle abrasive test. 1 – reference 0.45 wt.% C steel; 2 – electron beam coatings; 3 – coatings aged at 600 °C for 1 h; and 4 – self-aged coatings [8].

na podłożu, ze stali niestopowej poprzez napawanie proszkami o ziarnistości w zakresie od 50 do 350  $\mu\text{m}$  o następującym składzie chemicznym:

- Fe-20%Mn-4%V-4%Mo + 15%WC,
- Fe-20%Ni-4%V-4%Mo + 15%WC.

Uzyskane napoiny poddano procesowi wyżarzania ( $T=500, 600$  i  $700$   $^{\circ}\text{C}$  przez 1, 2, 3, 5, i 10 h, chłodzenie w powietrzu) oraz obróbce cieplnej bezpośrednio w komorze próżniowej (samowyżarzanie poprzez napawanie). Na rysunku 4 przedstawiono wpływ poszczególnych rozwiązań technologicznych na odporność na zużycie w warunkach tarcia.

W pracy [9] przedstawiono wyniki badań procesu napawania proszkami:  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  – 50%, Ni-Cr – 50% (Ni-78,8%, Cr-19,34%, Fe-0,34%, C<0,01%, Mn<0,99%, Si-0,47%), ziarnistość  $5,5\div 88$   $\mu\text{m}$ , stali w gatunku S235JR. Jako warstwę buforową zastosowano napoinę wykonaną proszkiem Cr-17%, B-4%, Si-5%, C-0,9%, Fe<5%, Ni – reszta, ziarnistość  $53\div 63$   $\mu\text{m}$ .

Badania wykazały, że proces napawania umożliwił uzyskanie napoiny o twardości 791 HV.

Prowadzenie procesu napawania jest również możliwe przy użyciu drutu. W pracy [10] przedstawiono wyniki napawania stali austenitycznej w gatunku X6CrNiMoTi17-12-2 oraz stali duplex w gatunku X2CrNiMoN22-5-3 dwoma drutami:

- Fe-79,2%, C-0,4%, Cr-17,9%, Mo-1,2%, Si<1%, Mn-0,7%,
- Co-59,2%, C-1,8%, Cr-31%, W-8%.

Autorzy uzyskali znaczący wzrost twardości (do 550HV0,3) oraz wzrost odporności na korozję.

Ważnym podkreślenia jest fakt, iż napawanie przy użyciu wiązki elektronów jest szczególnie ważnym procesem dla materiałów reaktywnych takich jak tytan, niob, molibden. W pracy [11] przedstawiono wyniki badań napawania taśmą tytanową o grubości w zakresie od 0,1 do 0,3 mm stali austenitycznej w gatunku 304 (grubość 3,0 mm). Autorzy zwrócili uwagę na konieczność precyzyjnego doboru gęstości energii. Poprawne napoiny uzyskano przy gęstości energii w zakresie od 0,05 do 0,12  $\text{kW}/\text{mm}^2$ . Jedną z wielu zalet procesu napawania wiązką elektronów przy użyciu proszku jest możliwość precyzyjnego dozowania materiału dodatkowego i regulacja grubości otrzymanych warstw. W pracy [12] przedstawiono wyniki procesu napawania wiązką elektronów proszkami FeB+FeTi stali w gatunku S235. Wytworzone napoiny wykazały twardość 10-krotnie większą niż materiał podłoża.

Istnieje również możliwość wytwarzania napoiny poprzez przetapianie warstwy proszku uprzednio umieszczonym na powierzchni materiału podłoża (rys. 5). W pracy [13] przedstawiono wyniki przetapiania warstwy proszku WC-Co+Ni o grubości do 3 mm na podłożu ze stali w gatunku S275JR. Proces przetapiania umożliwił uzyskanie napoiny o twardości powyżej 1400HV.

Możliwe jest również napawanie wiązką elektronów przy ciśnieniu atmosferycznym. W pracy [14] przedstawiono wyniki badań procesu napawania proszkiem 40 %  $\text{B}_4\text{C}$  + 10 % Fe stali niestopowej. Analiza składu chemicznego uzyskanych

napoin wykazała obecność dwóch faz  $\text{Fe}_2\text{B}$  oraz  $\text{Fe}_3\text{B}_{0,6}\text{C}_{0,4}$ , które odpowiadają za ponad dwukrotny wzrost odporności na zużycie w warunkach tarcia.

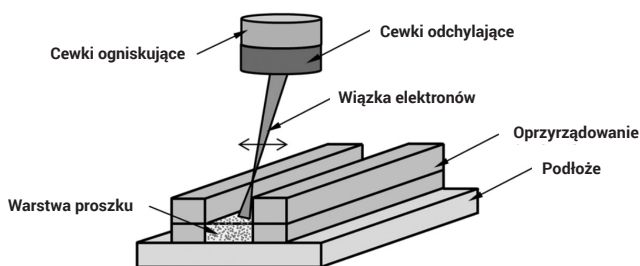
## Hartowanie

Hartowanie bezprzetopieniowe (ang. transformation hardening) jest technologią umacniania elektronowego warstwy wierzchniej i polega na krótkotrwałym (od ok. 1 ms do ok. 1 s) nagrzaniu z szybkością  $10^3\text{-}3\cdot 10^3$  K/s, warstwy powierzchniowej do temperatury wyższej od temperatury przemiany martenzytycznej, lecz niższej od temperatury topienia, zwykle przy gęstości mocy około kilku  $\text{kW}/\text{m}^2$ . W wyniku intensywnego chłodzenia z szybkością od  $10^4$  do ponad  $10^5$  K/s uzyskuje się bardzo drobnokrystaliczną mikrostrukturę o twardości o kilka stopni Rockwella wyższą od twardości uzyskiwanej metodami konwencjonalnymi (realizowanymi przy nagrzewaniu indukcyjnym, płomieniowym lub plazmowym), przebiegającymi znacznie wolniej, bo z szybkością co najwyżej dochodzącą do 1000K/s. Chropowatość powierzchni po hartowaniu wiązką elektronową jest taka jak przed hartowaniem, gdyż nie następuje przetapianie materiału obrabianego. Najczęściej stosowane jest hartowanie jednowarstwowe, a proces znacząco wpływa na poprawę własności tribologicznych stali konstrukcyjnych i narzędziowych. Grubość warstwy zahartowanej wynosi od kilku mikrometrów do kilku milimetrów. Wiązka elektronową można hartować: stale konstrukcyjne niestopowe i stopowe, łożyskowe, narzędziowe, żeliwa szare i białe. Obok większej twardości niż przy hartowaniu konwencjonalnym wiązka elektronowa umożliwia precyzyjne nagrzewanie wybranych miejsc obrabianej części nawet o bardzo małych wymiarach, przy utrzymaniu wąskich tolerancji grubości warstwy zahartowanej i przy mniejszych naprężeniach hartowniczych, pozwalających na hartowanie części obrobionych na gotowo bez zmiany wymiarów [7].

Przetapianie przetopieniowe powoduje natomiast pogorszenie chropowatości powierzchni w stosunku do powierzchni wyjściowej, zwłaszcza przy intensywnym przetapianiu. Umożliwia natomiast uzyskanie lepszych niż przy hartowaniu bezprzetopieniowym właściwości eksploatacyjnych, zwłaszcza tribologicznych. Główną tego przyczyną jest wzrost twardości o kilkanaście do kilkudziesięciu procent oraz korzystny rozkład naprężeń własnych. Wydajność procesu szacuje się na około  $150$   $\text{cm}^2/\text{min}$  [7].

## Stopowanie

Stopowanie polega na przetopieniowym nasyceniu warstw wierzchnich składnikami stopowymi całkowicie lub częściowo rozpuszczalnym w materiale podłoża. Jest realizowane przy większych niż hartowanie gęstościach mocy i dłuższych czasach nagrzewania. W wyniku stopowania pogarsza się chropowatość powierzchni w stosunku do powierzchni wyjściowej, natomiast znacznie poprawiają się właściwości tribologiczne. Poprzez zastosowanie odpowiednich składników stopowych można znacznie poprawić odporność korozyjną. Stopowanie może być realizowane poprzez przetopienie naniesionej w dowolny sposób (np.: elektrolitycznie lub natryskiwanie cieplne) na podłożu powłoki lub iniekcyjne wprowadzanie do roztopionego jeziora materiału podłoża cząstek stałych materiału stopującego [7]. Procesy stopowania i przetapiania mogą być prowadzone w jednym przejściu lub też wielokrotnie co umożliwia optymalizację składu chemicznego i własności uzyskanych warstw. Wielokrotne oddziaływanie pola temperatury na modyfikowany materiał umożliwia ponadto



Rys. 5. Schemat wytwarzania napoiny poprzez przetapianie warstwy proszku [13]

Fig. 5. Schema of producing of cladding layers based on remelting of powder layer [13]

wytwarzanie materiałów gradientowych o ściśle określonym gradientie własności. Szczególnie atrakcyjne z punktu widzenia prowadzenia procesu modyfikacji w próżni jest modyfikowanie powierzchni materiałów reaktywnych takich jak tytan i jego stopy. W przypadku modyfikacji stopów tytanu należy zwrócić jednak uwagę na porowatość obszarów zmodyfikowanych, która prowadzi do pogorszenia jakości i obniżenia własności użytkowych nowoutworzonych obszarów.

Dobór optymalnych warunków technologicznych procesów przetapiania wiązką elektronów tytanu i jego stopów umożliwia uzyskanie zmodyfikowanych obszarów pozbawionych porowatości. Badania prowadzone do chwili obecnej wykazały, że nawet w trakcie procesu spawania stopów tytanu w próżni porowatość może wystąpić. Skłonność do porowatości związana jest z rozpuszczalnością wodoru w tytanie, która jest funkcją temperatury. Należy podkreślić, iż wpływ na porowatość ma ilość ciepła wprowadzona do obszaru modyfikowanego i jest bezpośrednio związana z prędkością przetapiania lub stopowania. Parametry procesu mają wpływ na zarodkowanie, wzrost oraz proces odgazowania ciekłego metalu. Ograniczona porowatość przy małych prędkościach przetapiania jest spowodowana wystarczająco długim czasem niezbędnym do odgazowania, podczas gdy przy dużych prędkościach występuje ograniczony czas na zarodkowanie pęcherzyków gazu i odgazowanie modyfikowanego obszaru [15,16].

Przetapianie stopu tytanu (Ti-45Al-2Nb-2Mn-1B) przy użyciu wiązki elektronów z prędkością 16 mm/s, umożliwiło wzrost mikrostruktury dendrytycznej tj. dendryty  $\alpha_2$  (Ti<sub>3</sub>Al) rozproszone w osnowie Widmantättena z płytkami  $\gamma$  (TiAl) [17].

Proces stopowania przy użyciu wiązki elektronów umożliwia znaczący wzrost odporności na zużycie w warunkach tarcia. W pracy [18] wykazano, że wprowadzenie w warstwie wierzchniej czystego tytanu proszku Al<sub>8</sub>Si<sub>20</sub>BN i przetopienie warstwy wiązką elektronów spowodowało znaczący wzrost odporności na zużycie w warunkach tarcia. Należy podkreślić, że odporność na korozję (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) warstwy zmodyfikowanej nie uległa obniżeniu w porównaniu do czystego tytanu.

Należy również zwrócić uwagę na fakt, iż możliwe jest prowadzenie procesu modyfikacji stopów tytanu przy użyciu wiązki elektronów przy ciśnieniu atmosferycznym. Badania takie są możliwe przy użyciu wiązki elektronów o energii 1,4 MeV, wytwarzanej np. w akceleratorze cząstek o mocy 100kW.

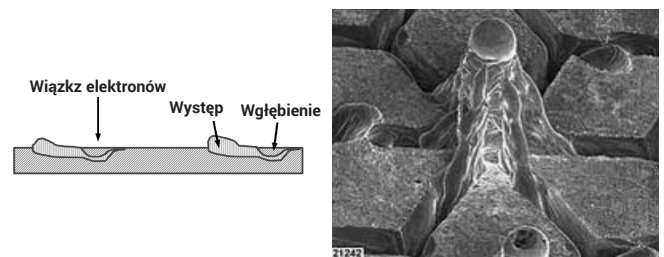
Autorzy w pracy [19] stopując czysty tytan proszkiem Ti-Ta uzyskali warstwy o grubości 2-2,5 mm o zawartości tantalu w zakresie 3,9-22,4%. Mikrostruktura składała się z faz  $\alpha(\alpha')$ + $\beta$ . Przy zawartości Ta 22,4% wytrzymałość na rozciąganie wynosiła 735 MPa, a odporność na korozję w środowisku wrzącego kwasu azotowego była znacznie wyższa niż czystego Ti (utrata masy 190 razy mniejsza). Warunki technologiczne, prędkość nagrzewania i stygnięcia, przy jakich wytworzony został nowy materiał, znacznie się różnią od stanu równowagi. Z tego powodu mikrostruktura charakteryzuje się wysoką dyspersyjnością składników, niejednorodnością składu chemicznego i powstawaniem fazy  $\beta$  Ti przy niższej zawartości tantalu.

W pracy [20] przedstawiono wyniki badań procesu stopowania stopu tytanu Ti-6Al-4V proszkiem TiC, SiC oraz Ti-C+SiC. Przeprowadzone badania wykazały, że możliwe jest wytworzenie na powierzchni stopu tytanu materiału kompozytowego o twardości powyżej 700 HV<sub>0,5</sub> (twardość materiału podłoża wynosiła 320HV<sub>0,5</sub>). Natomiast wprowadzając proszek TiN [21] uzyskano twardość 937HV<sub>0,5</sub>.

Możliwe jest również zwiększenie twardości czystego tytanu poprzez wprowadzenie proszku TiC. Warstwa powierzchniowa uzyskała większą odporność na zużycie w warunkach tarcia o ok. 60% i charakteryzowała się twardością 500HV<sub>0,1</sub> (tytan 180HV<sub>0,1</sub>) [22].

Prowadzone są również badania procesu stopowania stali. W pracy przedstawiono wyniki badań dla stali w gatunku 10NiCr180 stopowanej proszkiem NiCr [23]. Proces stopowania umożliwił uzyskanie warstwy o twardości 1300 HV (materiał podłoża 220HV).

Jednym z ciekawszych zastosowań wiązki elektronów w inżynierii powierzchni jest teksturyzacja powierzchni. Proces polega na wytworzeniu na powierzchni charakterystycznych mikro-wypukłości (rys. 6) i jest wykorzystywany m.in. w medycynie do polepszenia biokompatybilności, a w przemyśle budowy maszyn np. w celu łączenia metali z tworzywami sztucznymi.



**Rys. 6.** Przykłady zastosowania wiązki elektronów do teksturyzacji powierzchni, a) schemat procesu, b) przykład pojedynczego występu, [24]  
**Fig. 6.** Examples of the electron beam use for surface texturisation, a) process scheme, b) single protrusion, [24]

Biorąc pod uwagę, że urządzenia do modyfikacji i spawania wiązką elektronów mogą być wyposażone w systemy prowadzenia materiału dodatkowego w postaci drutu lub proszku, istnieje możliwość prowadzenia procesów szybkiego prototypowania z wykorzystaniem wiązki elektronów. Proces ten jest wykorzystywany do produkcji pojedynczych elementów, prototypów lub modeli, jak również krótkich serii, których nie opłaca się wytwarzać innymi technologiami, np. poprzez odlewanie lub kucie. Cechą istotną procesu jest możliwość szybkiego prototypowania przy użyciu proszku [25], którego poszczególne frakcje poddawane są strumieniowi elektronów i w ten sposób istnieje możliwość wyprodukowania elementu o zadanym kształcie. Precyzyjny sposób sterowania, szeroka gama materiałów oraz fakt, iż proces jest prowadzony w próżni, zapobiega utlenianiu i nawodorowywaniu topionego materiału. Technologię tę wykorzystuje się m.in. do produkcji elementów endoprotez lub łopatek wirników w turbinach.

## Podsumowanie

Biorąc pod uwagę stale rosnące wymagania wobec materiałów, elementów i narzędzi w zakresie trwałości, poprawy własności użytkowych, obniżenia kosztów produkcji inżynieria powierzchni będzie w najbliższych latach prężnie rozwijającą się dziedziną nauki i techniki. Wśród wielu stosowanych technologii spawalniczych są te wykorzystujące jako źródło energii wiązkę skoncentrowanych elektronów. Wysoka gęstość energii, precyzyjne prowadzenie procesu, atmosfera ochronna w postaci próżni powoduje, że proces ten w wielu przypadkach będzie jedynym rozwiązaniem jakie będzie mogło być zastosowane lub też, który zapewni najwyższe oczekiwane własności użytkowe modyfikowanych powierzchni. W przypadku braku możliwości prowadzenia procesów w próżni można zastosować urządzenia

z częściową próżnią lub bezpróżniowe. Opisując jedynie wybrane potencjalne możliwości wykorzystania wiązki elektronów w inżynierii powierzchni warto podkreślić, iż nowoczesne urządzenia, nawet o napięciu 150 kV, nie wymagają specjalnych dodatkowych, zewnętrznych osłon zabezpieczających przed promieniowaniem rentgenowskim i są całkowicie bezpieczne. Urządzenia te spełniają najostrejsze wymagania w zakresie bezpiecznej eksploatacji.

## Literatura

- [1] L.A., Dobrzański, A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, „Obróbka powierzchni materiałów inżynierskich”, 2011, tom 5, Open Access Library.
- [2] H. Szymański, K. Friedel, W. Słótko, „Urządzenia elektronowiązkowe” WNT, Warszawa 1990.
- [3] M.St. Węglowski, S. Błacha, S. Dworak, „Spawanie wiązką elektronów – charakterystyka metody” Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, vol.58 (3), s. 25-32, 2014.
- [4] M.St. Węglowski, S. Błacha, S. Dworak, „Spawanie wiązką elektronów – urządzenia i wyposażenie” Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, vol.58(4), s. 46-52, 2014.
- [5] Technical Scheets. Electron Beam Welding. Materiały techniczne EWF, 2007.
- [6] R. Franke, I. Haase, i inni, “Friction and wear behaviour of electron beam surface treated aluminium alloys AlSi10Mg(Cu) and AlSi35” Wear, vol.269, s. 921–929, 2010.
- [7] P. Adamiec, J. Dziubiński, „Wytwarzanie i właściwości warstw powierzchniowych elementów maszyn transportowych” Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2005.
- [8] S.F. Gnyusov, S. Tarasov, “Structural phase states and heat aging of composite electron-beam clad coatings” Surface & Coatings Technology, vol.232, s. 775–783, 2013.
- [9] J. Morimoto, N. Abe, i inni. “Formation of a Cr3C2/Ni-Cr alloy layer by an electron beam cladding method and evaluation of the layer properties” Vacuum, vol. 62, s. 203-210, 2001.
- [10] A. Jung, R. Zenker, “Elektronenstrahl-Randschichtbehandlung für die Herstellung verschleißbeständiger Auftragschichten auf nichtrostenden Stählen” Mat.-wiss. u. Werkstofftech, vol.45(6), s. 486-495, 2014.
- [11] M. Tomie, N. Abe, i inni, “Electron beam cladding of titanium on stainless steel plate” Transactions of JWRI, vol.19(1), s. 51-55, 1990.
- [12] N.K. Galchenko, K.A. Kolesnikova, i inni, “Structure and Properties of Boride Coatings Synthesized from Thermo-reactive Powders during Electron-beam Surfacing” Advanced Materials Research, vol.880, s. 265-271, 2014.
- [13] N. Abe, J. Morimoto, i inni, “Formation of WC-Co layers by an electron beam cladding method and evaluation of the layer properties” Vacuum, vol.59, s. 373-380, 2000.
- [14] D.S. Krivezhenko, L.S. Laptev, i inni, “Electron-Beam Cladding of Boron Carbide on Low-alloyed Steel at the Air Atmosphere” Applied Mechanics and Materials, vol.698, s. 369-373, 2015.
- [15] T. Mohandas, D. Banerjee, i inni, “Fusion Zone Microstructure and Porosity in Electron Beam Welds of an  $\alpha+\beta$  Titanium Alloy” Metallurgical and Materials Transactions A, vol.30A, s. 789-798, 1990.
- [16] J. Huang, N. Warnken, “Hydrogen Transport and Rationalization of Porosity Formation during Welding of Titanium Alloys” Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 43A, s. 582-591, 2012.
- [17] A.R. Rastkar, B. Shokri, “Surface transformation of Ti-45Al-2Nb-2Mn-1B titanium aluminide by electron beam melting” Surface and Coatings Technology, vol.204, s. 1817-1822, 2010.
- [18] D. Utu, G. Marginean, i inni, “Improvement of the wear resistance of titanium alloyed with boron nitride by electron beam irradiation” Surface and Coatings Technology, vol. 201, s. 6387-6391, 2007.
- [19] M.G. Golkovskia, I.A. Bataev, i inni, “Atmospheric electron-beam surface alloying of titanium with tantalum” Materials Science and Engineering: A, vol.578, s. 310–317, 2013.
- [20] J.Ch. Oh, S. Lee, “Correlation of microstructure with hardness and fracture properties of (TiC,SiC)/Ti-6Al-4V surface composites fabricated by high-energy electron-beam irradiation” Surface and Coatings Technology, vol.179, s. 340-348, 2004.
- [21] E. Yun, K. Lee, i inni, “Correlation of microstructure with high-temperature hardness of (TiC,TiN)/Ti-6Al-4V surface composites fabricated by high-energy electron-beam irradiation” Surface and Coatings Technology, vol.191, s. 83-89, 2005.
- [22] O.G. Lenivtseva, D.V. Lazurenko, i inni, “The Structure and Wear Resistance of the Surface Layers Obtained by the Atmospheric Electron Beam Cladding of TiC on Titanium Substrates” Applied Mechanics and Materials, vol.682, s. 14-20, 2014.
- [23] D. Neagu, “Alloying with electron beam of some surfaces on pieces made by non-strengthen materials” Nonconventional Technologies Review, 10, s. 31-35, 2010.
- [24] Materiały informacyjne firmy Cambridge Vacuum Engineering, 2013.
- [25] C.N. Ribton, “High productivity electron beam additive manufacturing” International Electron Beam Welding Conference, Aachen, 2012.