

*formowanie, połączenia,
metoda, zgrzewanie impulsowe,
technologia EMPT,*

Jacek MUCHA¹

TECHNOLOGIA SPECJALNEGO FORMOWANIA POŁĄCZEŃ Z UDZIAŁEM IMPULSU ELEKTROMAGNETYCZNEGO

W artykule przedstawiono zaawansowane prace nad wykorzystaniem siły elektrodynamicznej do różnego rodzaju procesów formowania połączeń kształtowych oraz zgrzewanych z dużymi prędkościami. Omówiono główne zastosowania tej technologii w oparciu o możliwości przemysłowej realizacji. Zwrócono uwagę na możliwość automatyzacji procesu oraz kontroli jego przebiegu. Obecnie na rynku przemysłowym technologie przeznaczone do szybkiego wytwarzania elementów czy serii prototypowych głównie opierają się na metodach przyrostowych. Elektromagnetyczne formowanie może stanowić uzupełnienie znanych już rozwiązań szybkiego prototypowania części. Omówiono trendy rozwojowe i możliwości projektowania komputerowego związane z technologią formowania impulsów elektromagnetycznych.

1. WPROWADZENIE

W zakresie specjalnych wymagań technologicznych, które są znane od dziesięcioleci, wiele problemów z tym związanych nie zostało jeszcze rozwiązanych, nawet z pomocą dzisiejszej wiedzy. Nowe materiały i rozwój zaawansowanych technologii wymagają specjalnych metod formowania m.in. formowania z dużymi prędkościami.

Duży nacisk kładzie się na zwiększenie prędkości obróbki materiału z jednoczesnym obniżeniem kosztów. Zastosowanie wysokich prędkości formowania umożliwi m.in. wytwarzanie i kształtowanie złożonych elementów z materiałów o wysokiej wytrzymałości oraz niskiej ciągliwości [1].

Wspomniana obróbka posiada obecnie kilka odmian technologicznej realizacji:

- formowanie wybuchowe,
- formowanie elektrohydrauliczne,
- formowanie elektromagnetyczne,
- formowanie przez uderzenie z dużą prędkością.

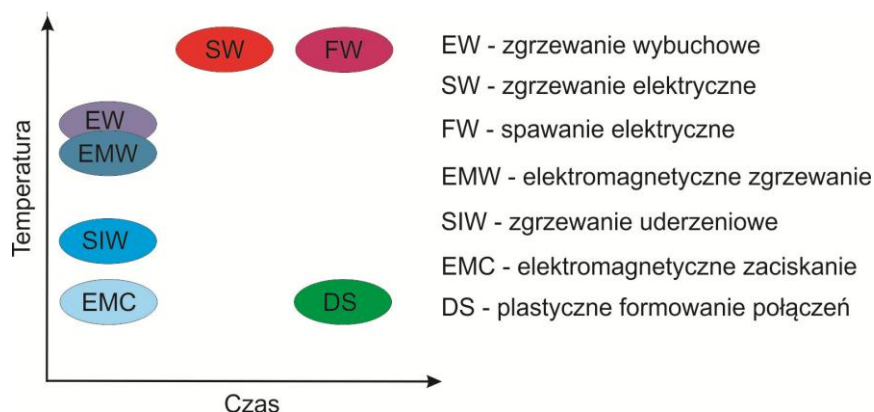
W wymienionych odmianach realizacji formowania z dużymi prędkościami, w niektórych przypadkach naciski mogą sięgać 100 000MPa [2].

¹ Katedra Konstrukcji Maszyn, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska
E-mail: j_mucha@prz.edu.pl

W ostatnim ćwierćwieczu obserwuje się wzrost zainteresowania użyciem, w procesach wytwarzania konstrukcji z blach, technologii formowania oferujących nowe możliwości realizacji zmiany formy czy łączenia kształtowanych elementów. Istota tych rozwiązań i sposoby formowania znane są od lat 50 ubiegłego stulecia [3]. Jednak w skali przemysłowej, są nadal rzadkością, nie znalazły jeszcze powszechnego zastosowania.

Technologia impulsów elektromagnetycznych należy do grupy metod obróbki z dużymi prędkościami. Wykorzystanie dużych prędkości do plastycznego formowania to ogólnoświatowa tendencja. Jej olbrzymi potencjał sprawił, że lawinowo przyciąga uwagę inżynierów i naukowców. Ma jednak podstawową wadę. Podczas wyładowania impulsu generowany jest hałas o dużym natężeniu dźwięku. Ze względu na dużą różnorodność zastosowań, najbardziej rozwijanym kierunkiem technologii impulsów elektrodynamicznych jest formowanie połączeń kształtowych podczas obróbki cienkościennych konstrukcji. Jej potencjał powoduje, że dobrze wpisuje się w ogólnoświatowe tendencje rozwoju niekonwencjonalnych technologii.

Istniejące podstawowe implementacje formowania połączenia w bardzo krótkim czasie nieznacznie podwyższają temperaturę materiału, w przeciwieństwie do klasycznych rozwiązań (rys. 1).



Rys.1. Czas formowania połączenia i temperatura oddziaływania na materiał spajany
Fig. 1. The joint forming time and temperature affecting the joined material

Zastosowanie technologii EMPT (*ElectroMagnetic Pulse Technology*) pozwala na tworzenie prostszych i bardziej ekonomicznych rozwiązań scalania elementów często o różnych właściwościach mechanicznych czy fizykochemicznych.

Rozwiązania technologii formowania z wykorzystaniem impulsów elektrodynamicznych cieszą się coraz większym zainteresowaniem branży obróbki elementów z blach. EMPT ma niepowtarzalną przewagę nad tradycyjnymi technologiami formowania stali i metali nieżelaznych.

Po pierwsze duża prędkość formowania zwiększa podatność do odkształceń metali. Pomimo wzrostu odkształcalności metali, zaletą jest zmniejszenie fałdowania się elementów blaszanych podczas kształtowania.

Po drugie skutki formowania podobne do oddziaływania dużego ciśnienia, mają wpływ na dobry stan powłok galwanicznych.

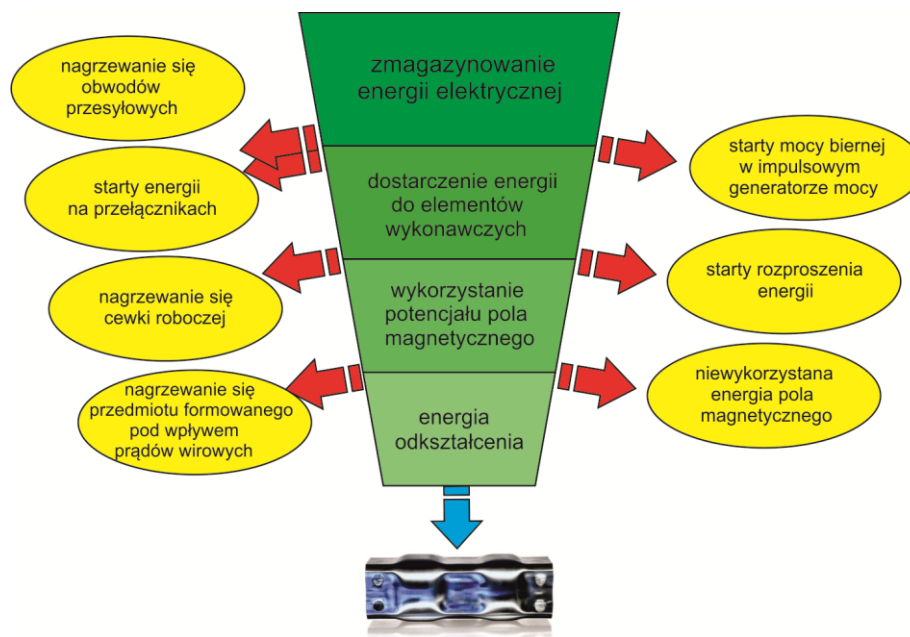
I po trzecie szczególnie istotnym z punktu widzenia dokładności kształtowo-geometrycznej jest zmniejszenie sprężynowania formowanego elementu.

Wprowadzenie na rynek nowych rozwiązań konstrukcyjnych maszyn formujących technologią EMPT jest związane z możliwością implementacji dla konkretnego rozwiązania wytwarzania wyrobu. Firmy analizując możliwość wprowadzenia nowego rozwiązania oczekują gotowych urządzeń wraz z technologią wytwarzania. Technologia EMPT nie jest jeszcze tak dobrze rozpoznana, bowiem w każdym przypadku kształtu i geometrii a zwłaszcza rodzaju materiału, wymagane są indywidualnie dobrane parametry procesu formowania. Często projektanci muszą pokonać bariery, które napotykają a nie są możliwe wprost do przewidzenia. Stąd jeszcze jest sporo do zrobienia w kierunku zwiększenia przydatności wspomnianego rozwiązania.

Główną barierą hamującą szersze wprowadzenie tej technologii do praktyki przemysłowej są trudności technologiczne związane z nakładami finansowymi i trwałością poszczególnych elementów systemu wytwórczego.

2. KONTROLA I AUTOMATYZACJA PROCESU FORMOWANIA EMPT

Zmiana kształtu wymaga dostarczenia energii. Formowanie elektromagnetyczne wymaga precyzyjnego sterowania przepływem energii w układach magazynujących i wyzwających energię. Jej przetworzeniu przez układy instalacji impulsowego generatora mocy i przesyłowi do elementów wykonawczych towarzyszą straty energetyczne. Na wytworzenie siły formującej przeznaczona jest energia pomniejszona o jej straty (rys. 2).

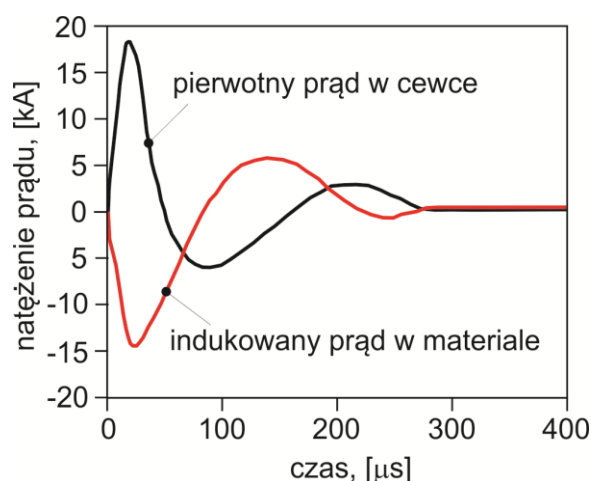


Rys. 2. Przebieg i straty energii podczas realizacji procesu EMPT

Fig. 2. The EMPT process course and energy loss

W materiale indukuje się prąd o przebiegu zbliżonym do charakterystyki wyładowania impulsu w cewce wykonawczej (rys. 3). Przebieg czasowy o niższych chwilowych wartościach indukowanego prądu w materiale jest nieznacznie przesunięty. Związane jest to ze stratami rozproszenia pewnej części energii oraz z możliwością przewodzenia pola magnetycznego przez formowany materiał. Stąd też prowadzi się intensywne prace rozwojowe, mające na celu zwiększenie efektywności energetycznej technologii EMPT.

Należy pamiętać, że formowane materiały posiadają różną inercję indukowania prądu. Nawet przy małych stratach prądowych, wtórna charakterystyka prądowa będzie nieco opóźniona.

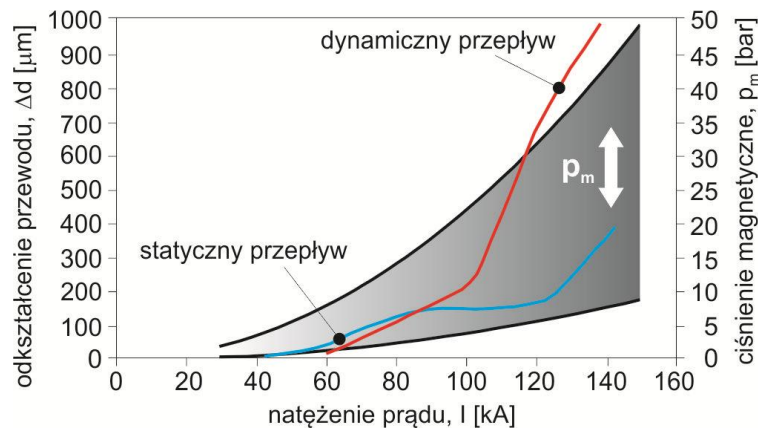


Rys. 3. Charakterystyka prądowa impulsowego wyładowania oraz indukowanego prądu
Fig. 3. The current characteristics of pulse discharge and induced current

Kontrola i automatyzacja procesu formowania umożliwia efektywniej wykorzystywać potencjał zjawiska indukcji magnetycznej. Zastosowanie profesjonalnych systemów sterowania i diagnostyki procesu formowania technologią EMPT pozwala na zwiększenie jej potencjału przemysłowego. Przepływ prądu o dużym natężeniu, bo sięgający 150kA przez bardzo krótki czas poniżej 100 μ s, może wywoływać zakłócenia elektromagnetyczne w innych częściach instalacji. Stąd też istotne jest zabezpieczenie przewodów przesyłu impulsu do elementów wykonawczych. Wykorzystuje się do tego celu przewody o dobrym ekranowaniu. Siatka w postaci oplotu zewnętrznego osłonięta płaszczem gumowym zapobiega przenoszeniu pola elektromagnetycznego na inne elementy instalacji. Od tego typu przewodów wymaga się odporności na cykliczne oddziaływanie prądu. Ekranująca siatka (oplot) w wyniku indukcji elektromagnetycznej doznaje cyklicznych odkształceń. Ważne jest by taki przewód posiadał wytrzymały ekranujący oplot oraz gumowy płaszcz amortyzujący odkształcenia elementów przewodzących prąd. W instalacjach dla technologii EMPT mają zastosowanie wysokiej jakości przewody wysoko prądowe stosowane w przesyłowej elektroenergetyce.

Przy dynamicznym przepływie energii elektrycznej następuje znaczne większe odkształcenie oplotu przewodu niż w trakcie ustabilizowanego przepływu prądu (rys. 4) [4]. Charakterystyka zmiany ciśnienia magnetycznego wewnątrz przewodu w zależności od

natężenia przepływającego impulsu prądu powinna być jak najmniej stroma. W zależności od jakości przewodu wytwarzane ciśnienie magnetyczne może mieć różny przebieg. Kwalifikacja użycia danego rodzaju przewodu dla szerszego przedziału wartości prądu powinna poprzedzona być analizą wymienionych wskaźników.

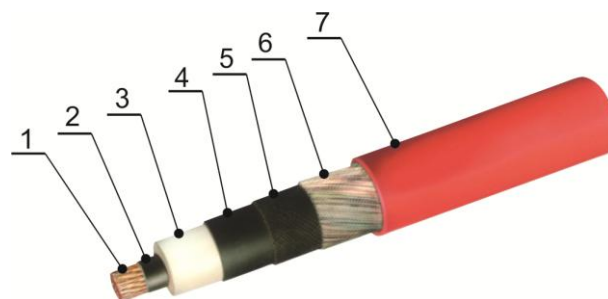


Rys. 4. Zakres odkształceń kabli wysokoprądowych przy przepływie impulsu prądu [4]
Fig. 4. The deformation range of high current cables at the current pulse [4]

Charakterystyczne elementy przewodu wysoko prądowego to (rys. 5):

- rdzeń miedziany (1),
- warstwa izolacyjna (2),
- półprzewodząca warstwa gumowa (3),
- warstwa izolacyjna (4),
- półprzewodnikowa warstwa gumowa (5),
- miedziany oplot nośno-ekranujący (6),
- płaszcz ochronny gumowy, na bazie polichloroprenu (7).

Wyspecjalizowane firmy oferują dla przemysłu elektroenergetycznego przewody o niskiej impedancji elektrycznej. W przypadku ich wykorzystania do budowy instalacji przemysłowych wymagana jest duża elastyczność układanych przewodów i mały promień gięcia.

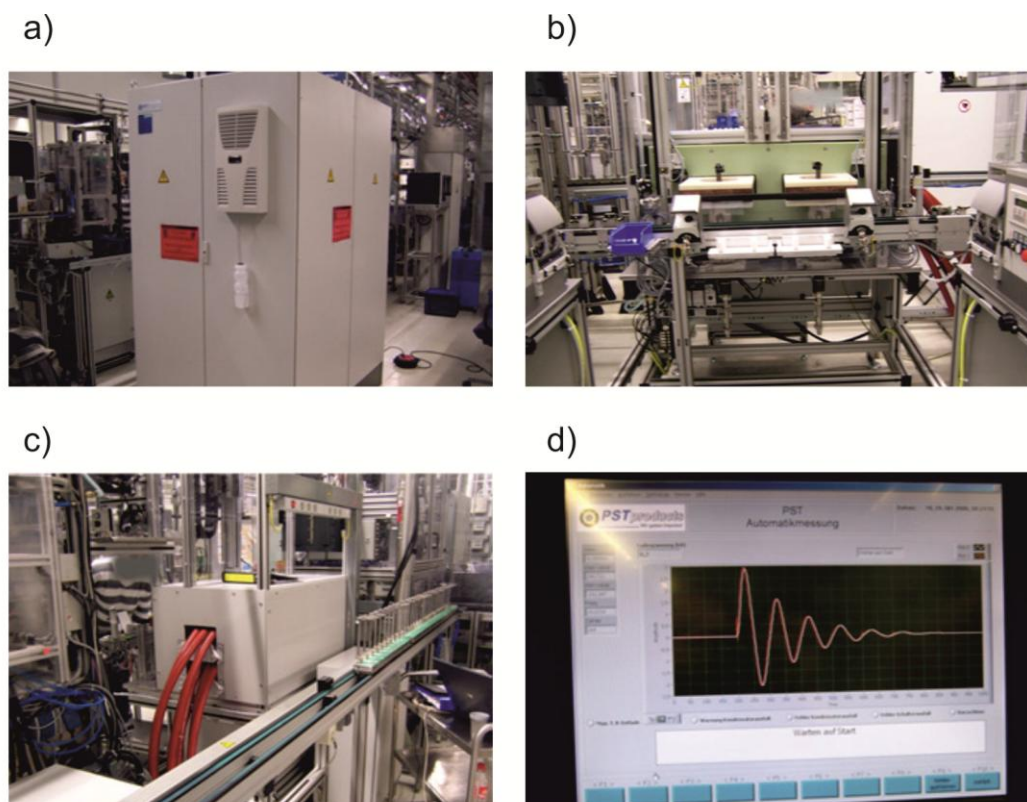


Rys. 5. Elektroenergetyczny przewód wykorzystywany do przesyłu impulsu wyładowania prądu [5]
Fig. 5. The high power cable used to transmit the pulse discharge [5]

Technologia EMPT nie wymaga skomplikowanych siłowników hydraulicznych lub ciężkich konstrukcji ramy. Dlatego jej zastosowanie może być rozszerzane o nowe obszary produkcji i może całkowicie zastąpić klasyczną technologię połączeń np. zgrzewanych. W niektórych przypadkach formowania jej wprowadzenie może znacząco zwiększyć dokładność wymiarową kształtowanych elementów.

Panująca ogólna tendencja do optymalizacji procesów produkcji wymusza wprowadzanie nowych technologii pozwalających na obniżanie kosztów i czasu produkcji. Głównym czynnikiem decydującym o opłacalności technologii EMPT, a który przesądza o zastosowaniu procesu w odniesieniu do masowej produkcji przemysłowej jest trwałość elementów generatora impulsów i cewki, powtarzalność procesu i system algorytmów sterujących. Istnieją również pewne aspekty techniczne, które są w silnym związku z wielkością systemu i tym samym z kosztami własnymi.

Rozbudowane elementy instalacji wymagają układów sterowania i kontroli całego systemu pracującego w linii wytwórczej (rys. 6a,b,c). Człony takiej instalacji są odpowiednio połączone i kontrolowane przez przystosowany do tego system sterowania i wizualizacji graficznej przebiegu istotnych parametrów (rys. 6d).



Rys. 6. Człony systemu formowania w technologii EMPT firmy PST products GmbH: a) szafa układu sterującego wraz z generatorem impulsu elektromagnetycznego, b) elementy wykonawcze formowania, c) fragment wysokoprądowych przewodów dostarczających impuls do elementów wykonawczych, d) wizualizacja na pulpicie sterującym wyładowania impulsu prądowego [6]

Fig. 6. The components of EMPT forming system made by PST products GmbH: a) the control cabinet with electromagnetic pulse generator, b) forming actuators, c) fragment of high current cables transmitting the pulse to actuators, d) visualization of current pulse on the control panel [6]

Wiodącym oferentem tej technologii jest firma *PST products GmbH* [6]. Jej rozwiązania są już dopasowane do seryjnej a wręcz masowej produkcji. Mniej zaawansowane rozwiązania oferują firmy *Magneform* [7], *Elmag Inc* [8]. Trwałość elementów obwodów wyładowania napięciowego sięga od 2 do 2,5 mln cykli dla kondensatorów zaś do 400 000 dla elektro-przełączników. Najmniejsze urządzenia wytwarzają impuls energii od 8 do 32kJ, o prądzie maksymalnym do 480kA. Sprawność działania określa się liczbą możliwych wyładowań impulsów zgromadzonej energii w czasie 1 minuty. Budowane układy posiadają możliwość akumulowania energii i jej przetworzenia do 12 cykli na minutę.

Duże systemy technologii EMPT służące do bardziej energochłonnego formowania tzn. w przypadku odkształcania grubszych bądź też większych gabarytowo elementów aplikują nawet do 160kJ na jedno wyładowanie, a natężenie prądu sięga 2400kA. Oferowane systemy formowania firmy PST są zasilane napięciem 16 lub 25kV. Daleko idące rozwiązania automatyzacji ruchów podawczych, ustawczych i odbiorczych skracają czasy transportu międzystanowiskowego. Mimo kryzysu duży potencjał technologii formowania, wykorzystującej efekt siły Lorenza, powoduje jej ciągły rozwój w kierunku całkowitego zautomatyzowania wytwarzania procesu produkcji.

Stanowiska do połączeń formowanych z udziałem technologii EMPT projektowane są pod konkretną aplikację i liczebność serii wytwórczej. Mogą to być specjalizowane rozwiązania znanej konstrukcji maszyny z wbudowaną aparaturą systemu formowania impulsem elektromagnetycznym. Oferowane są proste, ręcznie obsługiwane przez pracownika stanowiska robocze, ale i w pełni zautomatyzowane, sterowane komputerowo. Ich wielkość zależy od zapotrzebowania na energię odkształcenia wytworzoną oddziaływaniem siły pól magnetycznych. Profesjonalne, w pełni kontrolowane rozwiązania proponuje firma PST w postaci systemów linii *BlueWave* o zróżnicowanej mocy impulsu (rys. 7, rys. 8). Budowane są również stanowiska robotów, najczęściej w postaci manipulatorów przemysłowych (rys. 9).



Rys. 7. Stacjonarne urządzenie do formowania w technologii EMPT z serii *BlueWave* (PS16-10: 16kJ, 10kV) firmy *PST products GmbH* [6]

Fig. 7. The stationary EMPT forming device, *BlueWave* series (PS16-10: 16kJ, 10kV) made by *PST products GmbH* [6]



Rys. 8. System do formowania w technologii EMPT z serii *BlueWave* (PS112-16: 112kJ, 16kV) firmy PST products GmbH [6]

Fig. 8. EMPT forming system, *BlueWave* series (PS112-16: 112kJ, 16kV) made by PST products GmbH [6]



Rys. 9. Prototypowe stanowisko montażu z wykorzystaniem zgrzewania elementów nadwozia samochodowego w technologii EMPT firmy PST products GmbH [6]

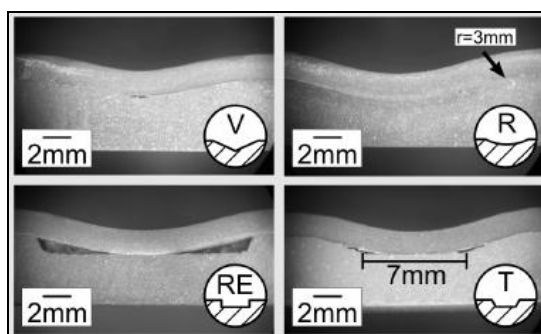
Fig. 9. The prototype assembly station, welding of car body components using EMPT by PST products GmbH [6]

Przy szeroko rozumianej wysokiej dbałości o zasady bezpieczeństwa pracy na stanowisku, w którym występują przepływy prądu o znacznym natężeniu, strefa oddziaływania pola elektromagnetycznego powinna się ograniczać do ścisłego obszaru formowanego wyrobu. Budowane urządzenia muszą spełniać restrykcyjne normy w zakresie bezpieczeństwa izolacyjności poszczególnych elementów na przebicia prądowe oraz oddziaływania pola elektromagnetycznego na pozostałe elementy i obsługę ludzką.

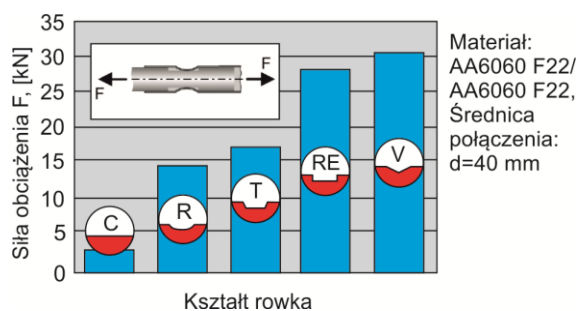
3. DOSKONALENIE FORMOWANIA POŁĄCZEŃ KSZTAŁTOWYCH

Technologia impulsów elektromagnetycznych jest dzisiaj wykorzystywana głównie w produkcji seryjnej do formowania, łączenia i cięcia profili zamkniętych [9]. W tym sektorze, silna konkurencja przesądza o wypieraniu z procesów produkcyjnych, na przykład hydroformowania czy klasycznych procesów spawania.

Zapotrzebowanie na wdrażanie koncepcji lekkich konstrukcji np. w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym stale rośnie. Zmniejszenie masy produktu może być realizowane poprzez zmniejszenie liczby elementów, łącząc część ich funkcji, jakie spełniały osobno w konstrukcji. To podejście prowadzi jednak do większej złożoności powstałych komponentów [10]. Największą zaletą formowania z użyciem technologii EMPT jest dopuszczalna duża tolerancja wymiarów elementów przeznaczonych do połączenia. W związku z tym proces przygotowania części nie wymaga bardzo dokładnej obróbki. Konieczny jest stosowny dobór cech geometrycznych łączonych elementów, tak by zachowana była ciągłość formowanego materiału w gotowym połączeniu, przy odpowiednim wypełnieniu (rys. 10) [11]. Maksymalna nośność kształtowego połączenia zależy nie tylko od właściwości mechanicznych formowanego materiału, ale także od kształtu utworzonego scalenia (rys. 11) [11].

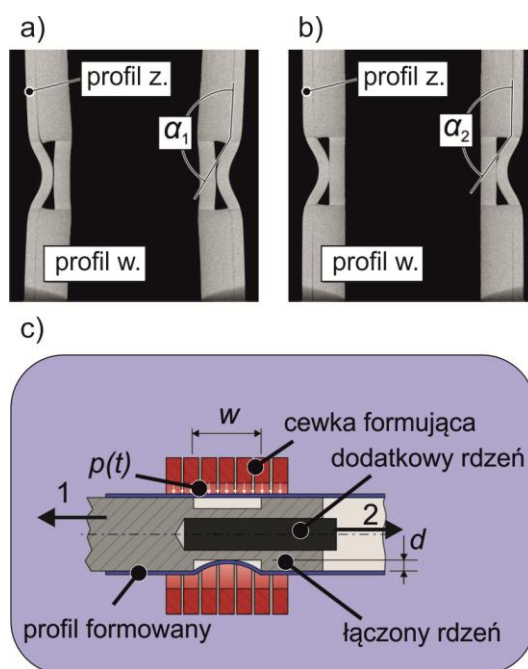


Rys. 10. Wypełnienie rowków zaciskanego materiału w połączeniu dla różnej geometrii rowka [11]
Fig. 10. Clinched material's groove filling in the joint for various groove geometry [11]



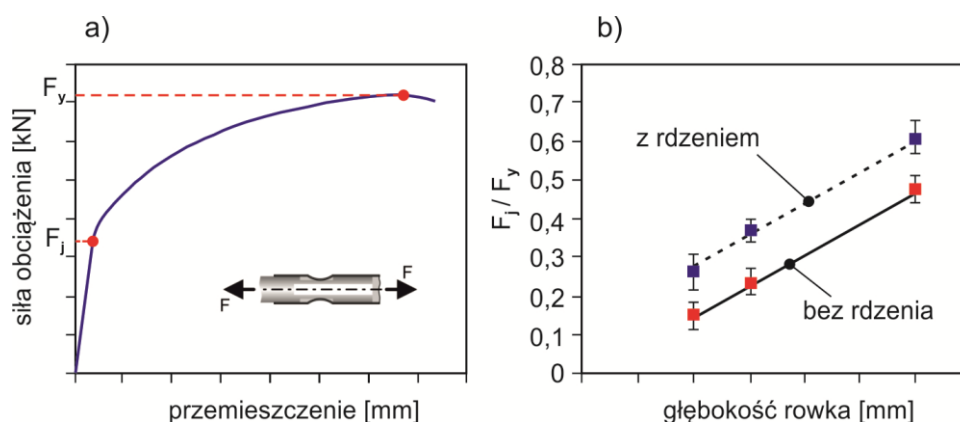
Rys. 11. Wpływ kształtu rowka na wielkość maksymalnego obciążenia niszczącego połączenie [11]
Fig. 11. The effect of groove shape on maximum joint breaking load [11]

Formowanie połączeń cienkościennych elementów często powoduje niepożądane zniekształcenie kształtu elementów łączonych. Jedną z metod zapobiegania tym zniekształceniom jest zastosowanie dodatkowego trzpienia utrzymującego kształt początkowy wewnętrznego profilu (rys. 12). Poprawia się w ten sposób również maksymalną nośność wytworzonego scalenia materiałów (rys. 13). Zastosowanie rdzenia pociąga za sobą jednak pewne modyfikacje stanowiska montażowego. Wprowadzenie i wyprowadzenie rdzenia może odbywać się w sposób automatyczny. Wymaga to zaplanowania w konstrukcji urządzenia formującego dodatkowych programowalnych ruchów CNC 1 i 2 (rys. 12c).



Rys. 12. Połączenie kształtowe formowane przez obciskanie: a) bez rdzenia, b) z rdzeniem, c) ułożenie rdzenia podczas formowania [12]

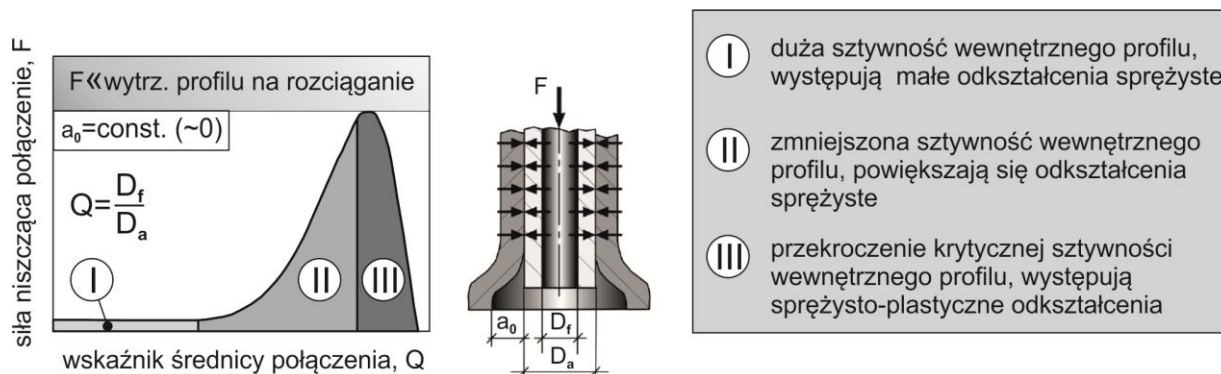
Fig. 12. Shaped joint formed by crimping: a) without core, b) with core, c) core alignment while forming [12]



Rys. 13. Nośność połączenia wykonanego z zastosowaniem dodatkowego rdzenia – (a) i bez – (b) [12]

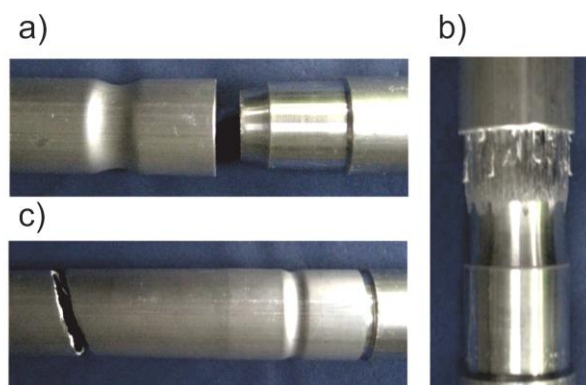
Fig. 13. The load-carrying ability of joint made with – (a) and without – (b) additional core [12]

Średnica połączenia oraz grubość ścianki wewnętrznego profilu mają wpływ na jego zniekształcenie podczas łączenia, jak również na maksymalną nośność złącza. Jest to związane ze sztywnością wewnętrznego elementu. Obserwuje się pewne specyficzne zachowanie przebiegu relacji między siłą obciążenia a wskaźnikiem grubości ścianki elementu wewnętrznego (rys. 14).



Rys. 14. Wpływ stosunku wielkości średnicy wewnętrznej do zewnętrznej na maksymalną nośność połączenia [12]
 Fig. 14. The effect of inner/outer diameter ratio to maximum joint load-carrying ability [12]

Wartość energii wyładowania impulsowego prądu w cewce przekłada się na jakość utworzonego kształtowego połączenia. W różny sposób może dojść do utraty spójności obciążonego złącza (rys. 15). Mechanizm rozdzielenia elementów zależy bowiem od wielkości dostarczonej energii wyładowania prądu.

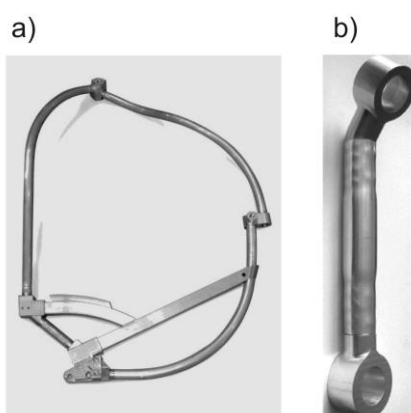


Rys. 15. Przypadki rozdzielenia kształtowego połączenia formowanego dla dwóch okrągłych profili: a) pęknięcie wewnętrznego profilu, b) ścieżenie w warstwie kontaktowej, c) pęknięcie profilu zewnętrznego [12]
 Fig. 15. The cases of shaped joint separation being formed for two round profiles: a) inner profile fracture, b) shearing in contact layer, c) outer profile fracture [12]

Dowodem racjonalności wprowadzenia technologii formowania EMPT do kształtowania i łączenia elementów różnych konstrukcji w przemyśle obróbki blach są liczne rozwiązania, które znalazły już zastosowanie w praktyce przemysłowej [6].

Przykładem mogą być połączenia elementów wytworzone na zasadzie obciskania elementów stalowych i innych metalowych na materiałach wykonanych z różnego tworzywa konstrukcyjnego [6]. Aplikacje obejmują najczęściej ekspansję lub kompresję rur do żądanych kształtów w połączeniu.

Pojawiające się implementacje EMPT w procesach wytwórczych charakteryzują się coraz to większą sprawnością obwodów roboczych, oraz wyższym stopniem zautomatyzowania [6]. Zwiększająca się świadomość firm związana z koniecznością ochrony środowiska naturalnego powoduje, że z roku na rok wdrażane są nowe niekonwencjonalne rozwiązania. Technologia EMPT jest jedną z nich. Podczas łączenia nie generuje odpadów w fazie gazowej, ciekłej czy stałej. Stosowana jest do łączenia podczas produkcji różnego rodzaju zbiorników, przewodów rurowych, szkieletowych konstrukcji z rur (rys. 16).



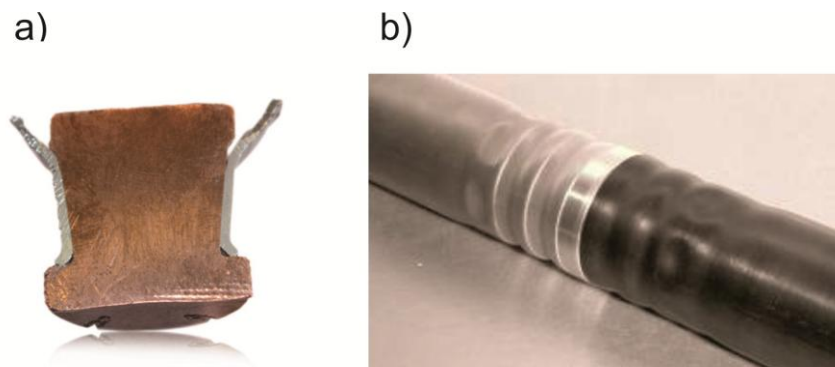
Rys. 16. Połączenie elementów rurowej konstrukcji z lekkich stopów aluminium: a) rama, b) łącznik [12]
Fig. 16. The connection of light aluminum alloy tubular components: a) frame, b) link [12]

Doskonalenie formowania impulsem elektrodynamicznym obejmuje również kierunki związane z łączeniem różnych materiałów i elementów o kształtach ze zróżnicowaną geometrią (rys. 17).



Rys. 17. Dwustronne uformowanie zamknięcia obudowy ze stopu aluminium [6]
Fig. 17. Double sided forming of casing lid made of aluminum alloy [6]

W procesach produkcyjnych często zachodzi konieczność łączenia elementów ze stopów miedzi i aluminium, obciskania elementów przewodów wykonanych ze stopów aluminium oraz gumy (rys. 18). Wymagania takie z powodzeniem spełnia technologia formowania za pomocą impulsu elektrodynamycznego.



Rys. 18. Kształtowe połączenie elementów z różnych materiałów: a) stopu aluminium i miedzi, b) stopu aluminium i gumy [6]

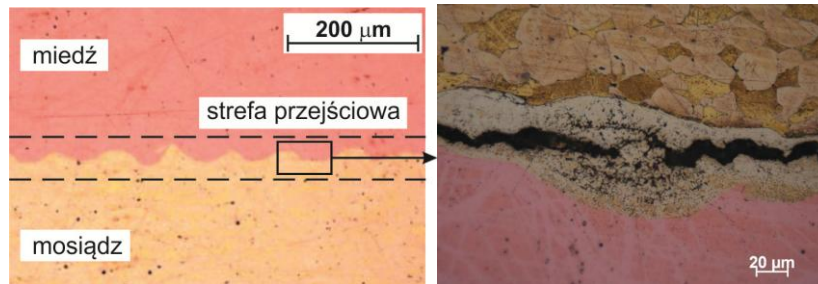
Fig. 18. The shaped joint of elements made of different materials: a) aluminum and copper alloy, b) aluminum alloy and rubber [6]

4. POTENCJAŁ ZGRZEWANIA Z UDZIAŁEM TECHNOLOGII IMPULSÓW ELEKTROMAGNETYCZNYCH

Przemysłowe wytwarzanie produktów pożądaných przez coraz bardziej wymagającego konsumenta bez zastosowania różnych technologii montażu byłoby niemożliwe. Łączenie poszczególnych elementów umożliwia stworzenie funkcjonalnej przestrzennej formy wyrobu.

Ze względu na zwiększający się nacisk na aspekty ekonomiczne i technologiczne coraz więcej firm rewiduje swoje podejście koncepcyjne do projektowania i wytwarzania połączeń wykorzystywanych w produkcji elementów z nowych materiałów. Konstruktorzy i projektanci przemysłowi są często ograniczani przez możliwości połączenia różnych materiałów ze sobą. Dlatego też powstają nowe opracowania eliminujące te niedogodności.

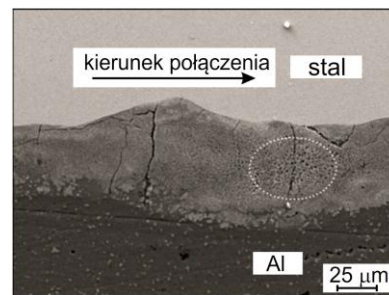
W elektromagnetycznym impulsowym zgrzewaniu bardzo wysoka energia prądu wyzwalana jest przez cewkę w krótkim czasie. Z bardzo dużą prędkością rzędu kilkuset m/s uderzają o siebie łączone materiały [13]. Bardzo szybka i wysokociśnieniowa kolizja cząsteczek łączonych materiałów tworzy ich trwałe połączenie [2]. Dynamiczne odkształcenie materiałów buduje strefę międzyfazową na granicy dwóch zgrzewanych blach z przetopem materiału (rys. 19). Wynika to z ekstremalnych odkształceń w małym obszarze sąsiadujących cząstek materiału na powierzchni kontaktu. Lokalne strefy plastycznych odkształceń materiału łączonych blach tworzą trwałe połączenie [14]. W precyzyjnie kontrolowanych warunkach możliwe jest osiągnięcie bardzo trwałego i wytrzymałego połączenia. Duży potencjał technologii EMPT sprawia, że jest ona często stosowana do dynamicznego zgrzewania ze sobą różnych materiałów.



Rys. 19. Warstwa przejściowa kontaktu łączonych materiałów otrzymana przez elektromagnetyczne zgrzewanie w technologii EMPT [15]

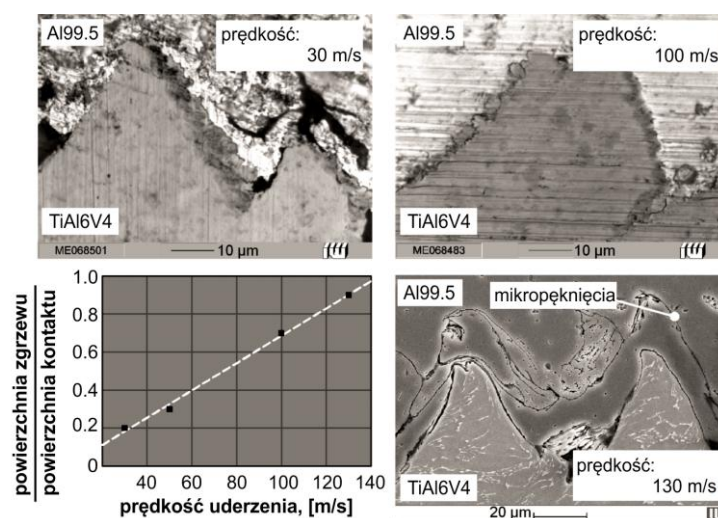
Fig. 19. The transition contact layer of materials joined by EMPT electromagnetic welding [15]

Bardzo szybkie dociśnięcie łączonych elementów z dużą siłą wymusza przypowierzchniową wymianę atomów materiału blach. Tworzy się silne wiązanie, umożliwiające przenoszenie znacznych obciążeń dla materiałów ze stopów metali oraz ich kombinacji.



Rys. 20. Pęknięcia materiału w strefie łączenia przez zgrzewanie [17]

Fig. 20. The material fracture in the welded joint zone [17]



Rys. 21. Rola prędkości uderzenia podczas zgrzewania na wiązania w strefie kontaktu połączonych materiałów [18]

Fig. 21. The role of the impact speed while welding in the joined material contact zone [18]

Decydującym parametrem określającym wytrzymałość połączenia jest prędkość uderzenia materiałów podczas zgrzewania [16]. Jednak, jeśli jest ona zbyt duża prowadzi do pojawiania się mikropęknięć materiału w strefie przejściowej (rys. 20). W każdym przypadku indywidualnie dobierane parametry prędkości formowania mogą znacznie polepszyć wiązanie w warstwie kontaktowej łączonych materiałów (rys. 21).

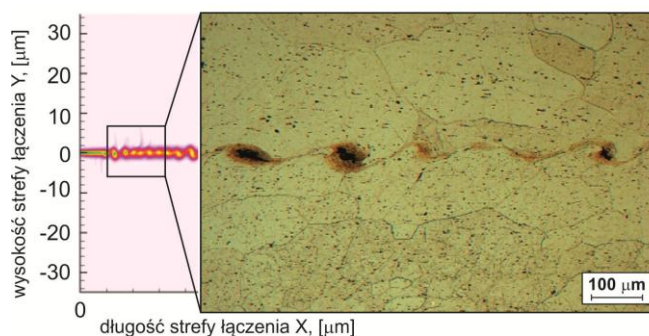
Efektywność tworzenia połączenia jest obecnie na tyle wysoka, że podczas testu wytrzymałościowego rozdzielanie następuje przez utratę spójności materiału zgrzewanego a nie strefy łączenia (rys. 22). Oznacza to zaawansowany stopień wytwarzania połączeń, taki który gwarantuje zachowanie spójności wiązania łączonych materiałów.



Rys. 22. Wyniki testu wytrzymałościowego połączenia zgrzewanego blach w technologii EMPT: materiał EN AW-6060/TRIP700; grubości 1,0/1,5 [6]

Fig. 22. The spot weld joint of sheets made with EMPT: materials EN AW-6060/TRIP700; thickness 1,0/1,5 [6]

Dość obiecujące są badania związane z opisem zjawisk zachodzących podczas zgrzewania impulsem elektrodynamycznym z wykorzystaniem teorii Kelvina-Helmholtza (rys. 23) [17]. Istotnym w tym przypadku narzędziem wspomagającym proces projektowania są programy komputerowe, umożliwiające symulację wirtualną przebiegu formowania z dużymi prędkościami.



Rys. 23. Model numeryczny strefy przejściowej dla eksperymentalnie uzyskanego zgrzewanego połączenia [19]

Fig. 23. The numerical model of the transition zone for experimentally achieved spot weld joint [19]

5. WSPOMAGANIE KOMPUTEROWE PROJEKTOWANIA I ANALIZY EFEKTYWNOŚCI ROZWIĄZAŃ

Komputerowe systemy wspomaganie prac inżynierskich i projektowania w coraz większym stopniu ułatwiają wstępne analizy poprawności założeń konstrukcyjnych. Przenikają do coraz szerszej gamy procesów wytwórczych, a zwłaszcza tych dotyczących nowych rozwiązań. Z chwilą pojawienia się pierwszych procesorów o architekturze RISC programy obliczeniowe zyskały na znaczeniu. Lawinowo zwiększające się moce obliczeniowe procesorów oraz wzrost szybkości pamięci pozwolił na rozwój programów typu CAD/CAM/CAE [20-26].

Istniejące na rynku programy do obliczeń numerycznych najczęściej oparte na metodzie elementów skończonych pozwalają symulować również zjawiska występujące przy przepływie prądu elektrycznego [27-30]. Rozwój możliwości komputerów w symulacji procesów zwiększył efektywność ogólnie pojętego projektowania. Modelowanie za pomocą metody elementów skończonych procesów charakteryzujących się wysoką prędkością formowania staje się coraz ważniejsze, nie tylko w celu zrozumienia procesu, ale także w projektowaniu parametrów procesu.

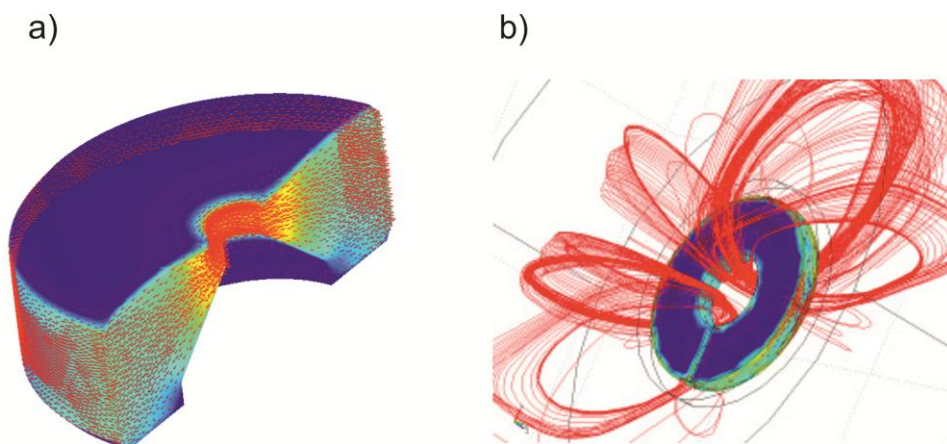
Elementy instalacji służące bezpośrednio do formowania projektowane są specjalnie pod konkretne rozwiązanie formy i geometrii wyrobu. Dla projektowanego rozwiązania połączenia czy wymaganego kształtu blaszanego elementu projektuje się cewkę i wzornik. Duże możliwości w tym zakresie posiadają systemy komputerowego wspomaganie projektowania CAD/CAM/CAE.

Zagadnienie formowania z dużymi prędkościami obejmuje nie tylko duże odkształcenia i odmienne właściwości materiałów, lecz także sposób zainicjowania odkształceń a także szybką zmianę energii w układzie. W przypadku formowania elektromagnetycznego, modelowanie formowania z dużymi prędkościami związane jest z zagadnieniami kontinuum ciała stałego i przewodności elektrycznej. Rozwijane są kody obliczeniowe pozwalające uwzględnić wpływ oddziaływania pola magnetycznego na formowany materiał. W takim przypadku rozwiązaniu podlegają równania o charakterze nieliniowym z uwzględnieniem indukcji magnetycznej w materiale formowanym, przewodności prądu przez materiał cewki i przestrzeni wolnej między nimi. Implementacja tych zjawisk w oprogramowaniu wymaga również znajomości szeregu wskaźników właściwości fizycznych materiałów o strukturze metalicznej.

Połączenie równań mechaniki ciała stałego z równaniami Maxwella dla elektrodynamicznego formowania posiada niewiele programów. Do grona softwarowego wsparcia projektowania procesu można zaliczyć m.in. programy MSC. Marc [27], ANSYS/Multiphysics [28], LS-DYNA [29] oraz PAM-STAMP [30]. Programy oparte na *Metodzie Elementów Skończonych* dają możliwość prześledzenia wpływu wielkości prądu, geometrii cewki, czasu przepływu prądu na kształt i gęstość powstałego pola elektromagnetycznego oraz siłę elektrodynamiczną pozwalającą formować plastycznie materiał (rys. 24).

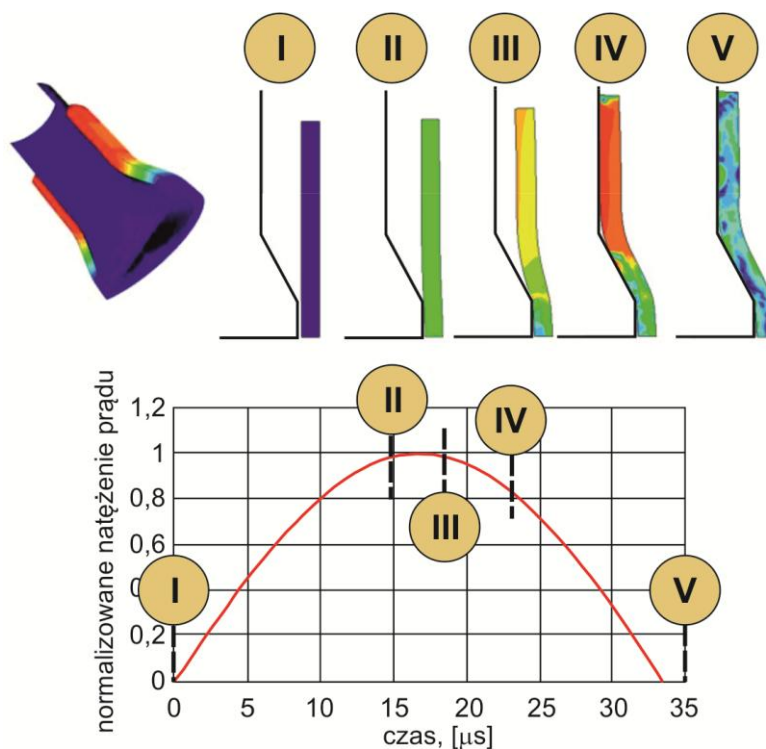
Oddziaływanie z dużymi prędkościami na formowany materiał generuje w nim odkształcenia plastyczne o rozkładzie i wartościach zależnych od charakterystyki umocnieniowej materiału.

Uwzględniając w opisie modelu MES formowanego materiału wpływ prędkości odkształcenia możliwe jest prześledzenie zmian jego stanu odkształcenia (rys. 25). Analiza MES tworzenia się strefy przejściowej w wyniku nacisku z dużą prędkością umożliwia prognozowanie rozkładu i wielkości nacisków (rys. 26).



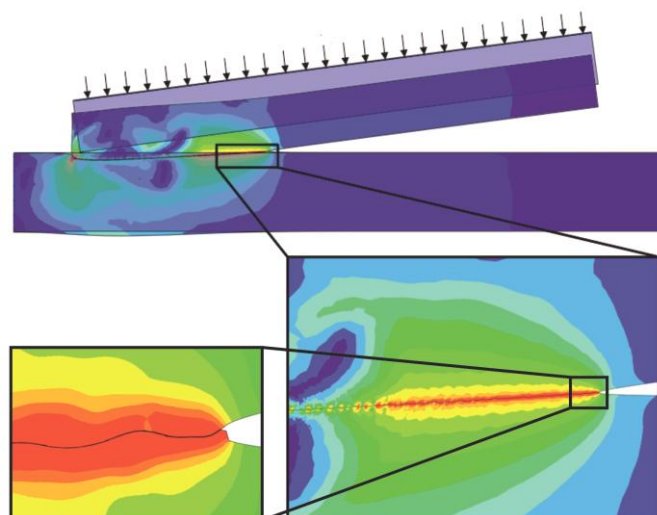
Rys. 24. Numeryczna analiza rozkładu gęstości pola elektromagnetycznego wewnątrz cewki prądowej – a), oraz zewnętrzne pole elektromagnetyczne wytworzone przez cewkę – b) [6]

Fig. 24. The numerical analysis of electromagnetic field density distribution inside the current coil — a) and the external electromagnetic field generated by the coil — b) [6]



Rys. 25. Analiza MES zmiany kształtu formowanej części oraz odkształceń wewnątrz materiału [6]

Fig. 25. The FEM analysis of formed element's shape change and strain in the material [6]



Rys. 26. Model numeryczny strefy kontaktu elementów zgrzewanych impulsem elektromagnetycznym [19]
 Fig. 26. The numerical model of contact zone for elements welded with the electromagnetic pulse [19]

Reasumując, precyzyjnie zaprojektowana technologia wytwarzania części z zastosowaniem technologii EMPT wymaga nie tylko odpowiedniego przygotowania projektowego CAD/CAM/CAE, ale i weryfikacji próbnego wykonania prototypu.

Wymagania odnośnie odwzorowania kształtu elementu względem wzornika, który jest zarazem elementem do połączenia wymusiły, na przestrzeni ostatniej dekady, rozwojowe prace badawcze realizowane w renomowanych instytucjach badawczych na świecie. Wyniki tych badań przyczyniają się do lepszego poznania możliwości formowania tą technologią, oraz pozwalają na zwiększenie liczby wdrożeń w przemyśle.

6. PODSUMOWANIE

Postęp w kształtowaniu połączeń za pomocą siły elektrodynamicznej związany jest z możliwościami badawczymi ośrodków realizujących duże projekty zlecane przez przemysł. Zapotrzebowanie przemysłu na nowe rozwiązania w produkcji, w tym montażu, wymusza rozwój znanych już rozwiązań.

Duży potencjał technologii EMPT sprawia, że firmy przemysłu samochodowego czy lotniczego są żywo zainteresowane wdrażaniem nowych jej aplikacji. Obecna trwałość elementów składowych systemu i możliwość automatyzacji procesu pozwalają na wprowadzanie tej metody do produkcji masowej. Zastosowanie rozwiązań dynamicznego kształtowania materiałów umożliwi realne skrócenie czasu produkcji.

Postęp w nowoczesnych technikach wspomagania projektowania i analiz procesów wytwórczych pozwala na skrócenie czasu i obniżenie kosztów przygotowania nowego rozwiązania aplikacji formowania impulsem elektrodynamicznym. Technologia EMPT może stanowić jedną z możliwości prototypowego wytwarzania elementów.

W obliczu kryzysu gospodarczego wydawać by się mogło, że wprowadzenie nowych rozwiązań jest szalone i nieracjonalne. Odważne, dobrze zaplanowane posunięcia mogą przyczynić się do sukcesu przedsięwzięcia firmy i zwiększenia jej konkurencyjności na światowym rynku. Zwiększająca się liczba kolejnych wdrożeń i obecny kryzys, w perspektywie najbliższej dekady, spowodują zapewne obniżenie cen oferowanych systemów EMPT.

LITERATURA

- [1] PSYK V., RISCH D., KINSEY B.L., TEKKAYA A.E., KLEINER M., 2011, *Electromagnetic forming - A review*, Journal of Materials Processing Technology, 787 – 829.
- [2] SHRIBMAN V., BLAKELY M., 2008, *Benefits of the Magnetic Pulse Process for Welding Dissimilar Metals*, Welding Journal, 87/9, 56 – 59.
- [3] HARVEY G., JOLLA L., BROWER D., 1961, *Metal forming device and method*, United States Patent 2.976.907.
- [4] RÖMHELD M., POH F., HARTMANN W., 2008, *High-current capability of coaxial cables in magnetofforming applications*, Proceedings of the 3rd International Conference on High Speed Forming, 265–272.
- [5] <http://www.draka.cz/> (01.04.2013).
- [6] <http://www.pstproducts.com> (01.04.2013).
- [7] <http://www.magneform.com> (01.04.2013).
- [8] <http://www.elmaginc.com> (01.04.2013).
- [9] HOMBERG W., MARRÉ M., BEERWALD C., KLEINER M., 2006, *Joining by forming of lightweight frame structures*, in: Advanced Materials Research: Flexible Manufacture of Lightweight Frame Structures, 10, 89–100.
- [10] KLEINER M., GEIGER M., KLAUS A., 2003, *Manufacturing of lightweight components by metal forming*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 52/2, 521–542.
- [11] MARRÉ M., BROSIUS A., TEKKAYA A.E., 2008, *Joining by compression and expansion of (None-) Reinforced Profiles*, Advanced Materials Research, 43, 57–68.
- [12] WEDDELING C., WOODWARD S., PSYK V., NELLESEN J., MARRÉ M., BROSIUS A., TEKKAYA A. E., TILLMAN W., 2010, *Development of design principles for form-fit joints in lightweight frame structures*, Proceedings of the 4th International Conference on High Speed Forming, 137–148.
- [13] AIZAWA T., KASHANI M., OKAGAWA K., 2007, *Application of magnetic pulse welding for aluminum alloys and SPCC Steel Sheet Joints*, Welding Journal, 86/5, 119 – 124.
- [14] FAES K., BAATEN T., DE WAELE W., DEBROUX N., 2010, *Joining of copper to brass using magnetic pulse welding*, Proceedings of the 4th International Conference on High Speed Forming, 84–96.
- [15] VERSTRAETE J., DE WAELE W., FAES K., 2011, *Magnetic pulse welding: lessons to be learned from explosive welding*, Sustainable construction and design, 2/3, 458– 464.
- [16] ZHIDAN X., JUNJIA C., HAIPING Y., CHUNFENG L., 2013, *Research on the impact velocity of magnetic impulse welding of pipe fitting*, Materials & Design, 49, 736 – 745.
- [17] HAI-PING Y., ZHI-DAN X., HONG-WEI J., ZHI-XUE Z., CHUN-FENG L., 2012, *Magnetic pulse joining of aluminum alloy-carbon steel tubes*, Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 22, 548 – 552.
- [18] PSYK V., GERSHTEYN G., DEMIR O. K., BROSIUS A., TEKKAYA A. E., SCHAPER M., BACH F.-W., 2008, *process analysis and physical simulation of electromagnetic joining of thin-walled parts*, Proceedings of the 3rd International Conference on High Speed Forming, 181 – 190.
- [19] ELSEN A., LUDWIG M., SCHAEFER R., GROCHE P., 2010, *Fundamentals of EMPT-Welding*, Proceedings 4th International Conference on High Speed Forming, 117 – 126.
- [20] CHLEBUS E., 2000, *Techniki komputerowe CAx w inżynierii produkcji*, WNT, Warszawa.
- [21] YANG D.Y., AHN D.G., LEE C.H., PARK C.H., KIM T.J., 2002, *Integration of CAD/CAM/CAE/CP for the development of metal forming process*, Journal of Materials Processing Technology, 125–126, 26 – 34.
- [22] TUBIELEWICZ K., ZABORSKI A., 2005, *Projektowanie technologiczne za pomocą systemów CAD/CAM*, Przegląd Mechaniczny, 6, 31 – 35.
- [23] PLICHTA J., PLICHTA S., 2006, *Techniki komputerowe w inżynierii produkcji*, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin.
- [24] KMIOTEK M., 2008, *Przegląd solverów numerycznych stosowanych w mechanice obliczeniowej*, Scientific Bulletin of Chełm Section of Mathematics and Computer Science, 1, 151 – 158.

-
- [25] HOJNY M., 2010, *Application of an integrated CAD/CAM/CAE/IBC system in the stamping process of a bathtub 1200 S*, Archives of Metallurgy and Materials, 55/3, 713 – 723.
- [26] RUSIŃSKI E, SMOLNICKI T., 2010, *Rozwój metod obliczeniowych w budowie maszyn i pojazdów*, Przegląd Mechaniczny, 6, 17 – 24.
- [27] <http://www.mscsoftware.com> (01.04.2013).
- [28] <http://www.ansys.com> (01.04.2013).
- [29] <http://www.lstc.com> (01.04.2013).
- [30] <http://www.esi-group.com> (01.04.2013).

IMPROVING SPECIAL JOINT FORMING TECHNOLOGY USING THE ELECTROMAGNETIC PULSE

This paper presents the progress of researches on using the electrodynamic force in various forming processes of shaped joints and high speed welded joints. Major technology applications are presented basing on the industry implementations. The capabilities of process automation and control are described. Nowadays, the high speed manufacturing and prototyping technologies mainly base on the incremental methods. The electromagnetic forming can complement already known solutions of high speed part prototyping. The progress trends and computer design capabilities related to the electromagnetic pulse shaping are presented.