

Koncepcje sterowania współczesnych systemów spawalniczych

Concepts of control in the contemporary welding systems

Streszczenie

W ramach dyskusji nad stanem i perspektywami rozwoju spawalnictwa, w artykule przedstawiono jeden z istotnych kierunków rozwoju, dotyczący sterowania i mechanizacji bazującej na tradycyjnych metodach spawalniczych. Współczesne tendencje rozwoju mechanizacji przekształcają tę gałąź inżynierii spawalnictwa w nowy twór, który nazwano umownie systemami spawalniczymi.

W artykule, w formie omówiono takie koncepcje sterowania systemów spawalniczych, jak: sterowanie synergiczne, systemy obsługi spawarek kompaktowych, koncepcje zupełnej automatyzacji oraz optymalizacji systemu spawalniczego. Pokazano, na przykładzie problematyki osłony łuku, formułowanie rozwiązań możliwych do implementacji w rozwijanych koncepcjach sterowania systemów spawalniczych.

Abstract

The work presents one of the vital development trends as regards control and mechanization, which is based on traditional welding techniques. This work is a contribution to the discussion on the state and perspectives of the welding technology advancement. The contemporary development trends in mechanization transform this branch of welding engineering into something new, which is conventionally called welding systems.

In a popular scientific style, the work describes such concepts of welding systems control as: synergetic control, compact welders operation systems, complete automation and optimization of a welding system concepts. Formulating of solutions feasible to implement in the developed concepts of welding systems control are presented on the example of arc shield issue.

Wstęp

Nie szokują już poglądy wyrażane w ramach dyskusji milenijnej nad rozwojem spawalnictwa, jak przykładowo w pracy [1], w której stwierdzono, że „spawalnictwo stało się w przemyśle światowym podstawową i jedną z najnowocześniejszych technologii łączenia materiałów”. Nie szokują, bo przygotowywano nas do tego faktu już dużo wcześniej. Autorowi na myśl przychodzi wypowiedź prof. Araty, dyrektora Instytutu Badawczego Spawalnictwa w Osace. Profesor Arata już 1987 roku (podczas uroczystości nadania mu tytułu doktora honoris causa Politechniki Warszawskiej) powiedział „...nowoczesne procesy przetwarzania materiałów zrodziły się spontanicznie ze zgromadzonych i zintegrowanych wyników studiów podstawowych nad inżynierią spawalnictwa w ciągu ostatnich dziesięciu lat. Spawalnictwo staje się typową nauką interdyscyplinarną i odgrywać będzie ważną rolę w rozwoju innych badań. Możemy powiedzieć, że nauka ta wyrosła z konwencjonalnego spawalnictwa jako trzonu utworzonego na podstawie importowanej technologii w nowy trzon zdolny do eksportu na inne dziedziny różnych owocnych osiągnięć” [2]. Inżynieria spawalnictwa wypracowała w swojej historii nowożytnej setki procesów i metod spawalniczych, opracowała również szereg technik pokrewnych. Dlatego na przełomie wieków i tysiąclecia stawiano jedno z bardziej intrygujących pytań – „Czy rozwój spawalnictwa będzie polegał na dalszym wynajdowaniu coraz to nowszych procesów i metod spawalniczych, czy zaobserwuje się jakiś inny strategiczny cel rozwoju?”

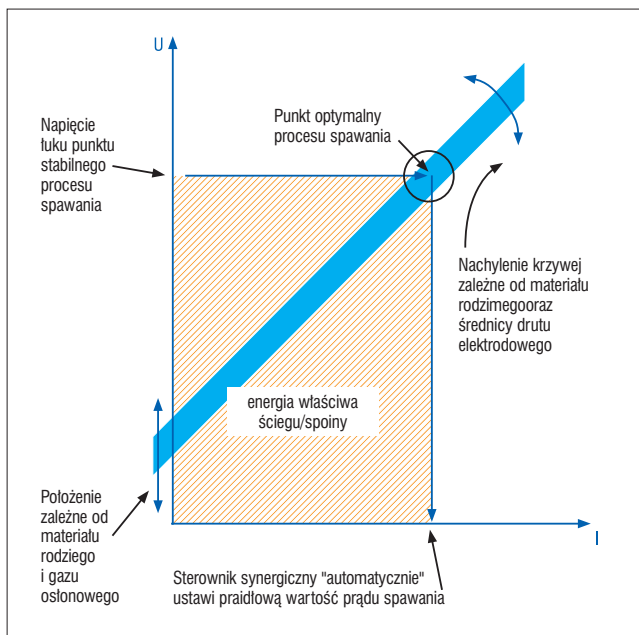
Autor w ramach uzasadnienia własnych badań brał udział w kilku programach dotyczących strategii rozwoju procesów spawalniczych i metod badań nieniszczących. W artykule omówiono wypracowywane kierunki rozwoju spawalnictwa, nie tylko w przymacie własnej specjalizacji, ale szerzej – kierunki globalne, które można określić mianem koncepcji sterowania współczesnych systemów spawalniczych.

Kierunki rozwoju spawalnictwa – metody czy sterowanie

Na jednym z seminariów (Warszawa, 2001) nt. „Stan i perspektywy rozwoju spawalnictwa w świecie – współpraca Niemiec z Polską” zadano głównemu prelegentowi prof. Ulrichowi Diltthey'owi, dyrektorowi Instytutu Spawalnictwa Politechniki w Akwizgranie pytanie – jaki widzi kierunek dalszego rozwoju spawalnictwa? Odpowiedź była prosta i oczywista, ale zaskakująca. Profesor Diltthey odpowiedział – „dalszy rozwój spawalnictwa, to ściśle powiązanie dotychczas opracowanych metod spawalniczych z metodami badań nieniszczących oraz rozwój tych metod rozumiany jako coraz większy udział elektroniki w ich sterowaniu”. A więc nie rozwój metod, a unowocześnianie starych, znanych procesów spawalniczych (nowe, współcześnie rozwijane metody, jak: spajanie FSW oraz odmiany spawania laserowego uznaje się za wyjątki potwierdzające regułę).

Dla ukierunkowania rozważań, zauważono, że współczesna tendencja spawalnictwa światowego – w zakresie systemów wytwarzania – wykorzystuje techniczne rozwiązania elektroniki, informatyki i cybernetyki. Na tej bazie formułuje się strategię rozwoju procesów spawalniczych zupełnie odmienne od spawalnictwa tradycyjnego. Strategie takie wyznaczają przykładowo: tematyka Komisji XII MIS-u w sformułowaniu „Rozwój urządzeń kontrolno-sterujących dla robotów i wyposażenia spawalniczego oraz możliwości programowania w systemie off-line”, idea „Total Automation in Joining” przedstawiona przez G. Bolmsjö na forum Europejskich Inicjatyw Badawczych w ramach działalności JOM Institute oraz koncepcja optymalizacji procesu wytwarzania konstrukcji spawanej przedstawiona podczas sesji plenarnej 15-tej Światowej Konferencji Badań Nieniszczących WCNDT.

W literaturze [3, 4] autor dokonał wybiórczej analizy stanu zagadnienia i uznał za najbardziej doniosłe w rozwoju sterowania procesów, i systemów spawalniczych następujące koncepcje: synergia, systemy sterowania spawarką, koncepcja zupełnej automatyzacji, optymalizacja systemu spawalniczego.



Rys. 1. Istota sterowania synergicznego; na podstawie materiałów źródłowych firm ESAB i AGA

W niniejszym artykule rozwija się problematykę współczesnego spawalnictwa bardziej szczegółowo w formie popularno-naukowego opisu wybranych koncepcji.

Synergia w spawalnictwie

Duża liczba zmiennych, właściwa współczesnemu procesowi spawania stanowi zasadniczą przeszkodę w posługiwaniu się nowoczesnymi urządzeniami. Dodatkowo, wprowadzanie przez operatora danych wiąże się z błędami technologicznymi. Świadomość tych trudności skłoniła konstruktorów do zastosowania tzw. synergicznego systemu sterowania. Przez to pojęcie rozumie się sterowanie spawarek polegające na odpowiednim sprzężeniu wszystkich wielkości determinujących proces technologiczny celem jego właściwej realizacji. Ma on na celu odciążenie operatora od podejmowania złożonych, a przy tym subiektywnych decyzji. Pozostawia mu się tylko ograniczoną możliwość dostosowania procesu do własnych indywidualnych przyzwyczajeń lub technik, które jednak nie wpływają ujemnie na dobór parametrów spawania. W rezultacie sterowanie procesem sprowadza się do tzw. „jednogławkowej regulacji” zmiennych technologicznych [5].

Ideę synergii w spawalnictwie oddaje najlepiej rysunek 1, który jest nieco zmodyfikowanym „historycznym diagramem”, przedstawionym w 1988 roku na prospektach i dokumentach instruktażowych firm ESAB i AGA.

Teoretycznie, sterowanie synergiczne w spawalnictwie mogło być realizowane po opracowaniu modeli zjawisk w przestrzeni międzyelektrodowej, a szczególnie – procesu przenoszenia metalu z elektrody podawanej ze stałą prędkością do jeziora spoiny. Techniczne warunki realizacji sterowania synergicznego powstały po zastosowaniu prądu pulsacyjnego do spawania, przy możliwości regulacji czasu przepływu prądu impulsu i wartości prądu bazowego, przy stabilizowanym napięciu zasilania łuku oraz, przy równoczesnym sterowaniu stabilizowaną prędkością podawania drutu elektrodowego. Wszystko to przy określonych warunkach stałych, takich jak: średnica drutu elektrodowego, materiał elektrody i skład mieszanki gazowej.

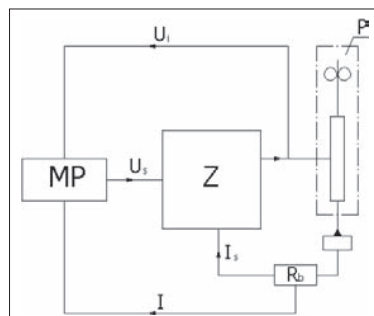
Tradycyjnie, w spawalnictwie przyjmuje się, że proces spawania elektrodą topliwą w osłonie gazów jest określony przez dwie podstawowe zależności [6]:

- prądu spawania w funkcji prędkości podawania elektrody. Przy tym dla stabilności procesu wymaga się, aby wartość prędkości

podawania elektrody była równa prędkości jej stapiania, która jest już właściwością spoiwa,

- napięcia łuku w funkcji prądu spawania (rys. 1).

O zjawiskach zachodzących w łuku, a przede wszystkim o jego stabilności, decyduje moc doprowadzona do przestrzeni międzyelektrodowej (obszar zakreślony na rys. 1) i prąd spawania, od którego zależy prędkość stapiania się elektrody. Występuje tu również, wspomniana wcześniej, zależność pomiędzy prądem i napięciem. Wynika z tego, że równaniem wiążącym wszystkie czynniki wpływające na jakość procesu spawania jest zależność $P = f(I)$ wynikająca z iloczynu $P = U \cdot I$ [6].



Rys. 2. Synergiczny układ sterowania procesem spawania metodą MIG; MP – sterownik mikroprocesorowy, U_l – sygnał napięcia łuku, Z – zasilacz tranzystorowy, P – podajnik, I_s – sygnał sterujący natężenia prądu spawania, R_b – bocznik prądowy, U_s – sygnał sterujący [6]

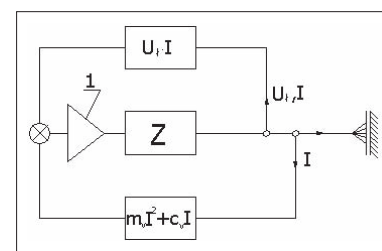
Ostatnią zależność przyjęto jako matematyczny warunek synergicznego układu sterowania procesem spawania. Prąd I jest zmienną niezależną, natomiast moc P (rys. 1) jest zmienną zależną, której wartość decyduje o spełnieniu warunku – stabilności procesu.

Do realizacji sterowania synergicznego w praktyce jest stosowany układ przedstawiony na rysunku 2. Podstawową częścią układu jest regulator mikroprocesorowy, którego zadaniem jest wypracowanie sygnału błęd sterującego zasilacz tranzystorowy.

Sygnałem tym jest różnica pomiędzy wielkością odniesienia obliczoną z „punktu optymalnego” a wielkością sprzężenia zwrotnego, wyliczoną jako iloczyn rzeczywistych wartości napięcia i natężenia prądu spawania. Jeden ze schematów funkcjonalnych, realizujący zasadę sterowania synergicznego wg zasady rysunek 1 pokazano na rysunku 3.

W synergicznym układzie sterowania procesami spawania, wykorzystującym funkcje $P = f(I)$ jako algorytm sterowania parametrami zadawanymi są: prędkość podawania drutu elektrodowego, średnica drutu elektrodowego, materiał elektrody, rodzaj mieszanki gazowej.

Rys. 3. Schemat funkcjonalny synergicznego prostownika mikroprocesorowego realizującego program sterowania według funkcji $P = f(I)$; Z – zasilacz, 1 – wzmacniacz operacyjny, U_l – napięcie łuku, I – prąd spawania [6]



Dla każdej nastawionej wartości prędkości podawania drutu, regulator synergiczny ustala: wartość prądu impulsów i prądu bazowego, czasy przepływu prądu impulsu, i prądu bazowego występującego pomiędzy impulsami oraz napięcie łuku, tak aby w czasie spawania był utrzymywany stabilny łuk, i natryskowe przechodzenie metalu.

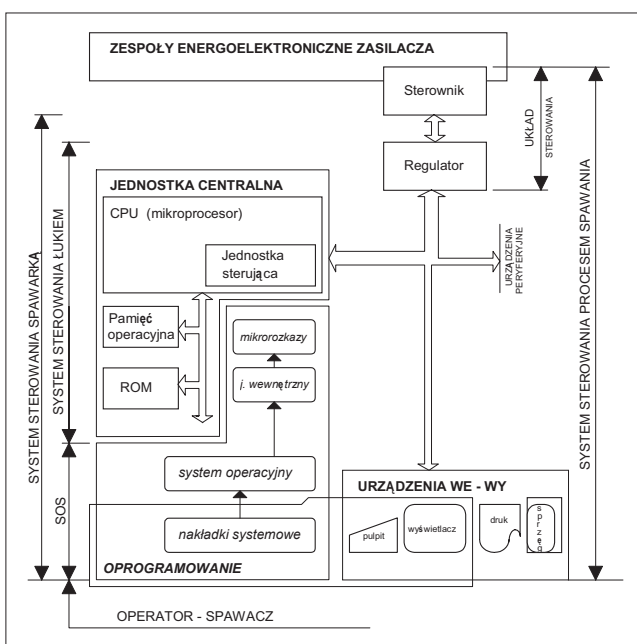
Implementacja idei sterowania synergicznego do elektroenergetycznych układów urządzeń spawalniczych pozwoliła na dalszy rozwój sterowania współczesnych spawarek, z możliwością optymalizacji. Optymalizacja procesu spawania w czasie rzeczywistym i możliwości programowania spawarek, w języku spawalniczym określone mianem implementacji WPS-ów, pozwoliła na rozwój tzw. „systemów obsługi spawarki”.

Sterowanie współczesnych spawarek

W literaturze [6] podano „Można zauważyć występowanie swego rodzaju sprzężenia zwrotnego między rozwojem elektronicznie sterowanych maszyn i urządzeń a rozwojem zastosowań technologii spawalniczych. Oznacza to, że rozwój elektronicznych układów sterowania tworzy warunki do nowych zastosowań technologii spawalniczych ..., a rozwój technologii spawania stawia coraz większe wymagania elektronicznym układom sterowania i regulacji. Urządzenia spawalnicze stają się więc coraz bardziej skomplikowanymi maszynami sterowanymi za pomocą systemów komputerowych. Elektronika stwarza coraz większe możliwości: ... automatyzacji procesów spawalniczych przy ścisłej kontroli zachowania optymalnych parametrów” (E. Dobaj, „Maszyny i ...” [6]).

Analogicznie dzieje się z komputerami osobistymi, oprogramowanie stwarza coraz to większe wymagania w zakresie hardware'owym, z kolei rozwój elektroniki umożliwia ciągle rozwój oprogramowania. Z teoretycznego punktu widzenia systemy sterowania urządzeniami spawalniczymi składają się do spojrzenia na obserwowane zjawiska w rozwoju sprzętu spawalniczego właśnie od strony informatyki. Stąd można mówić o systemach sterowania procesem spawania, a w zakresie węższym, dotyczącym zasilaczy – o systemach sterowania spawarkami.

Stosując analogię komputerową, można powiedzieć, że systemy sterowania spawarkami składają się z układu sterowania opartego o elektroniczne i energoelektroniczne podzespoły, stanowiące hardware spawarki oraz software'owego oprogramowania. Przyjętą w pracy terminologię i strukturę systemu sterowania ilustruje rysunek 4, na którym przedstawiono architekturę systemu sterowania współczesnych spawarek inwerterowych. Zastosowanie w spawarkach mikroprocesorów pozwala na ukazanie pełnej analogii w oprogramowaniu do systemów komputerowych. W spawarkach sterowanych mikroprocesorami wyróżnić można dwa systemy oprogramowania. Pierwszym jest oprogramowanie odpowiedzialne za sterowanie parametrami spawania; właśnie w takim ujęciu możemy mówić o systemach sterowania zasilaczy, np. według podziału podanego w pracy [7]. Analogiem tego oprogramowania w PC-tach jest system operacyjny, np. DOS. W bardziej rozwiniętych spawarkach spotkać można tzw. nakładkę na system operacyjny, czyli oprogramowanie systemowe, wg schematu rysunku 4, pozwalające na bardziej przyjazne komunikowanie się urządzenia z operatorem-spawaczem. Ono to stanowi trzon systemu obsługi spawarki.

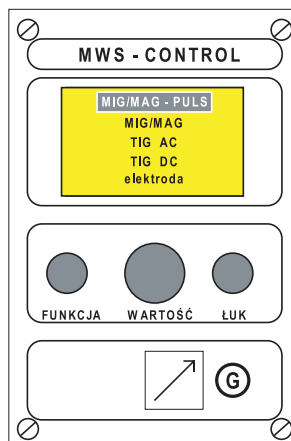


Rys. 4. Struktura systemu sterowania współczesnych spawarek z zasilaczem inwerterowym; SOS – system obsługi spawarki

O ile dwa pierwsze, wspomniane wyżej, elementy systemu sterowania spawarkami, zwłaszcza wielofunkcyjnymi (kompaktowymi), spełniają pewne zasady stosowane przez wszystkich producentów i dają się sklasyfikować, o tyle nakładki charakteryzują się dużą dowolnością, i oryginalnością rozwiązań. Z tego względu systemy obsługi spawarki stanowią niejako wizytówkę producenta [8].

Jako przykład przedstawiono system sterowania spawarki kompaktowej 400 SEM. Jej wyróżnikiem jest właśnie sposób komunikowania się systemu sterowania spawarki z użytkownikiem. System sterowania komunikuje się z użytkownikiem poprzez nakładkę programową, którą producent określa mianem sterowania monitorowego i oznacza symbolem fabrycznym MWS-CONTROL (Monitor Welding System-Control).

Idea systemu monitorowego sterowania procesem spawania MWS nawiązuje do nakładek graficznych dostępnych dla PC-tów, takich, jak GEM firmy Digital Research czy bardziej rozpowszechnionej – Windows firmy Microsoft. Producent zatroszczył się również o urządzenie odpowiadające komputerowej „myszce”. Nakładkę typu Windows tworzy ekran ciekłokrystaliczny z okienkami. Każde okienko można uaktywnić. Uaktywnione okienko jest podświetlane. Natomiast rolę myszy w systemie MWS pełnią trzy pokrętki, czyli selektory: FUNKCJA, WARTOŚĆ i ŁUK.



Rys. 5. Płyta czołowa systemu sterowania MWS-CONTROL spawarki kompaktowej 400 SEM

Selektorem FUNKCJA uaktywnia się poszczególne pola ekranów systemu. Z kolei, selektorem WARTOŚĆ dokonuje się zmiany wartości uaktywnionych funkcji systemu sterowania, rozwija podmenu oraz zatwierdza wpisane wartości. Wreszcie trzeci selektor oznaczony mianem ŁUK pozwala, w dowolnej chwili, niezależnie od położenia dwóch pierwszych, na zmianę napięcia łuku podczas spawania metodami MIG/MAG-PULS oraz MIG/MAG STANDARD, a podczas spawania metodą TIG AC (prądem przemiennym) – na eliminację składowej stałej prądu spawania.

MIG/MAG IMP	I-MAX	P 100 %	U pulsu
V2A 1,2	100 %	f 100 %	U-100%
ARG + 2,5% CO2			
4ta + H P 0			
posuw drutu	11,0 m/min		
prąd spawania	278 A		
napięcie spawania	0 V		
puls ↓ 4	puls ↑ 5	OPD 89 %	

Rys. 6. Obraz podstawowy metody spawania MIG/MAG-PULS systemu MWS-CONTROL spawarki kompaktowej 400 SEM

Sterowanie spawarką przy wykorzystaniu nakładki MWS jest bardzo przyjazne dla operatora-spawacza. Polega na uaktywnianiu kolejnych okienek obrazu podstawowego danej metody oraz dokonaniu zmian. Podczas tych operacji na ekranie systemu MWS przez cały czas widoczne są wszystkie ustalone parametry charakterystyki spawania.

Po załączeniu urządzenia jako pierwsze ukazują się „menu” metod spawania z podświetloną nazwą tej metody spawania, która była ostatnio używana (rys. 5). Jeżeli nie zostanie dokonana żadna zmiana selektorami FUNKCJA/WARTOŚĆ, to system MWS po kilku sekundach wyświetli obraz podstawowy aktywnej metody spawania, którego wygląd dla metody MIG/MAG-PULS przedstawiono na rysunku 6.

Mając obraz podstawowy przedstawiony jak na rysunku 6, można poprzez obrót pokrętki FUNKCJA uaktywnić pole wyboru rodzaju drutu elektrodowego i typu gazu ochronnego, a selektorem WARTOŚĆ wybrać każdą z 28 na stałe zaprogramowanych kombinacji drut-gaz ochronny.

Wybór kombinacji drut-gaz pozwala na ustawienie w systemie obsługi spawarki odpowiedniej charakterystyki spawania. Właściwy wybór kombinacji spawalniczej jest bardzo ważny i krytyczny w systemie obsługi spawarki, gdyż na jej podstawie procesor ustawia pozostałe parametry procedury spawania. W przypadku stosowania innych kombinacji drut-gaz, nie ujętych w pamięci MWS, system wymaga „ręcznego” programowania charakterystyki spawania i jej zapamiętania. Później można, w dowolnej chwili, wywołać z pamięci systemu tak ustawioną własną procedurę.

Warto zauważyć na obrazie podstawowym na rysunku 6, że ręczne programowanie, poprzez kolejne podświetlenia okienek, umożliwia niezależne ustawienie wartości następujących parametrów:

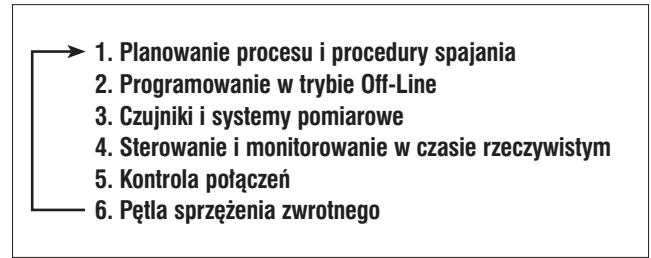
1. prędkości podawania drutu elektrodowego (posuw drutu),
2. prądu impulsu (I-MAX),
3. częstotliwości impulsowania (f),
4. czasu trwania impulsów (P),
5. napięcia łuku (U pulsu),
6. nachylenia czoła impulsów (puls ↑),
7. nachylenia grzbietu impulsów (puls ↓).

Ręczne programowanie pozwala na ustawienie wszystkich stosowanych w zaawansowanej technice spawalniczej parametrów energetycznych łuku, które umożliwiają definiowanie wielkości kropli, częstotliwości przechodzenia kropli oraz energii liniowej procesu spawania, realizując tym samym podstawowe zalety spawania metodą MIG/MAG-PULS.

Koncepcja zupełnej automatyzacji spawania

Koncepcja „Total Automation in Joining”, czyli zupełnej automatyzacji łączenia została przedstawiona przez prof. Gunnara Bolmsjö na forum Europejskich Inicjatyw Badawczych w ramach działalności JOM Institute w 1992 roku. Według prof. Bolmsjö, Total Automation in Joining jest koncepcją globalną, która odnosi się do wszystkich procesów łączenia materiałów. Jej cechą jest globalne powiązanie i automatyzacja wszystkich niezbędnych działań techniczno-organizacyjnych związanych z łączeniem materiałów. Koncepcja ujmie trzy problemy, a mianowicie: (i) planowanie i przygotowanie procesu łączenia, inaczej – projektowanie technologii, (ii) sterowanie, w tym również kontrolowanie procesu łączenia w czasie rzeczywistym oraz (iii) programowanie zapewnienia i kontroli jakości w układzie sprzężenia zwrotnego. Przy czym, zagadnienie (i) rozumiane jest jako opracowanie algorytmu i programu informatycznego procesu łączenia, tak pod względem technologii, jak i geometrii oraz trajektorii. Pojęcia „geometrii i trajektorii” problemu projektowania technologii oznaczają w kolejności zagadnienia: kształtowania i wymiarowania materiału rodzimego oraz kinetyki urządzeń spawalniczych, w tym trajektorii uchwytu spawalniczego.

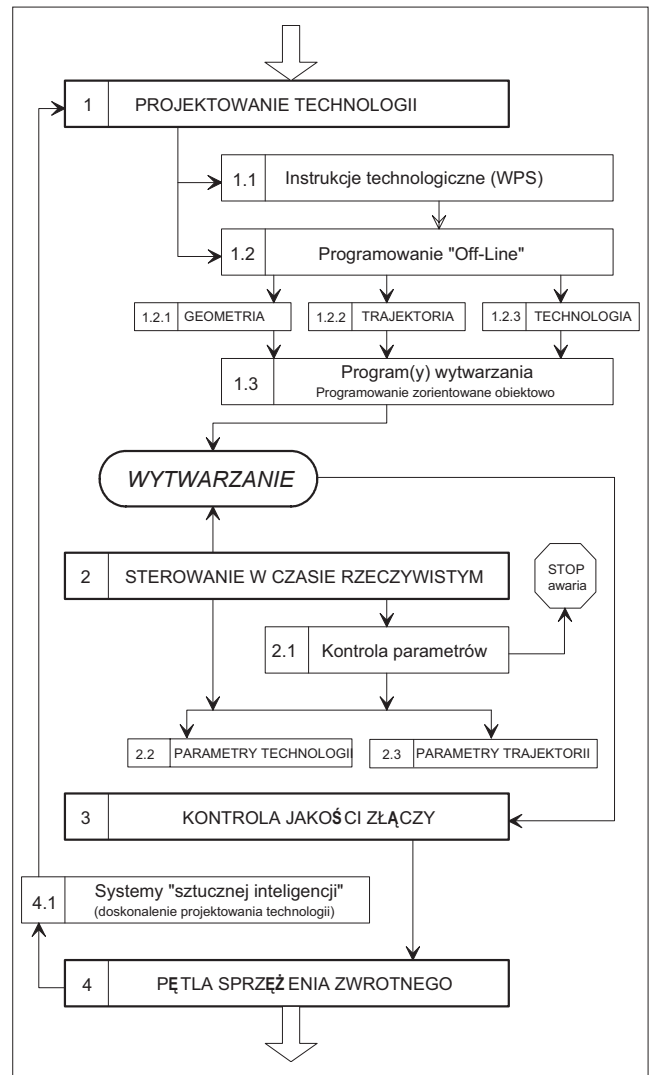
Tablica I. Idea koncepcji TAJ, czyli zupełnej automatyzacji spawania wg prof. G. Bolmsjö



czego. Z kolei, układ sprzężenia zwrotnego z zagadnienia trzeciego zawiera, według koncepcji prof. G. Bolmsjö, aspekty „sztucznej inteligencji” rozumianej tutaj jako możliwości „uczenia się” systemu w celu doskonalenia projektowania technologii, np. na wzór heurystyki informatycznej. Głównym celem koncepcji zupełnej automatyzacji łączenia jest:

- rozsądne zredukowanie czasu, środków i sił w procesach przygotowania i programowania, czyli obiektywizacja i optymalizacja projektowania technologii,
- podwyższenie jakości procesów łączenia,
- podniesienie elastyczności zmechanizowanych systemów łączenia materiałów.

Ramowy program działania systemu, a zarazem podstawowe zadania składowe koncepcji zupełnej automatyzacji łączenia przedstawiono w tablicy I.



Rys. 7. Struktura „Zupełnej Automatyzacji Spawania” na podstawie koncepcji TAJ prof. G. Bolmsjö

Konkretne realizacje koncepcji zupełnej automatyzacji łączenia mogą się różnić w zależności od procesu i metody łączenia materiałów. Ogólny algorytm koncepcji musi pozostać identyczny i będzie zbliżony do tego, który przedstawiono na rysunku 7. W opracowaniu [9], dla odróżnienia globalnej koncepcji od rozwiązania szczegółowego przyjęto rozwiązanie szczegółowe określać mianem systemu Zupełnej Automatyzacji Spawania, systemem ZAS.

Optymalizacja systemów spawalniczych

Obecnie uważa się, że w wielkoseryjnej, zautomatyzowanej lub zrobotyzowanej produkcji konstrukcji spawanych, badania nieniszczące złączy muszą być wykonywane równocześnie z produkcją. Ta nowa koncepcja dla badań nieniszczących wymaga ponownego ich rozpatrzenia z punktu widzenia przydatności do badań w systemie „on-line” z czasami operacji odpowiadającymi cyklom spawania poszczególnych złączy. Dla tej koncepcji spawania, rozwija się te metody kontroli, które najbardziej spełniają prognozowane wymagania zautomatyzowanych linii produkcyjnych. Przewiduje się, że w liniach badań nieniszczących w trybie „off-line”, a na pewno „on-line” badania metodą prądów wirowych wyprą badania magnetyczno-proszkowe i penetracyjne, zaś komputerowo wspomaganie badania ultradźwiękowe wyprą badania radiograficzne. Oczywiście o kontroli wizualnej w tradycyjnym znaczeniu mowy być nie może. Tak więc, w zautomatyzowanych systemach spawania największe zastosowanie będą miały następujące metody badań NDT [4]:

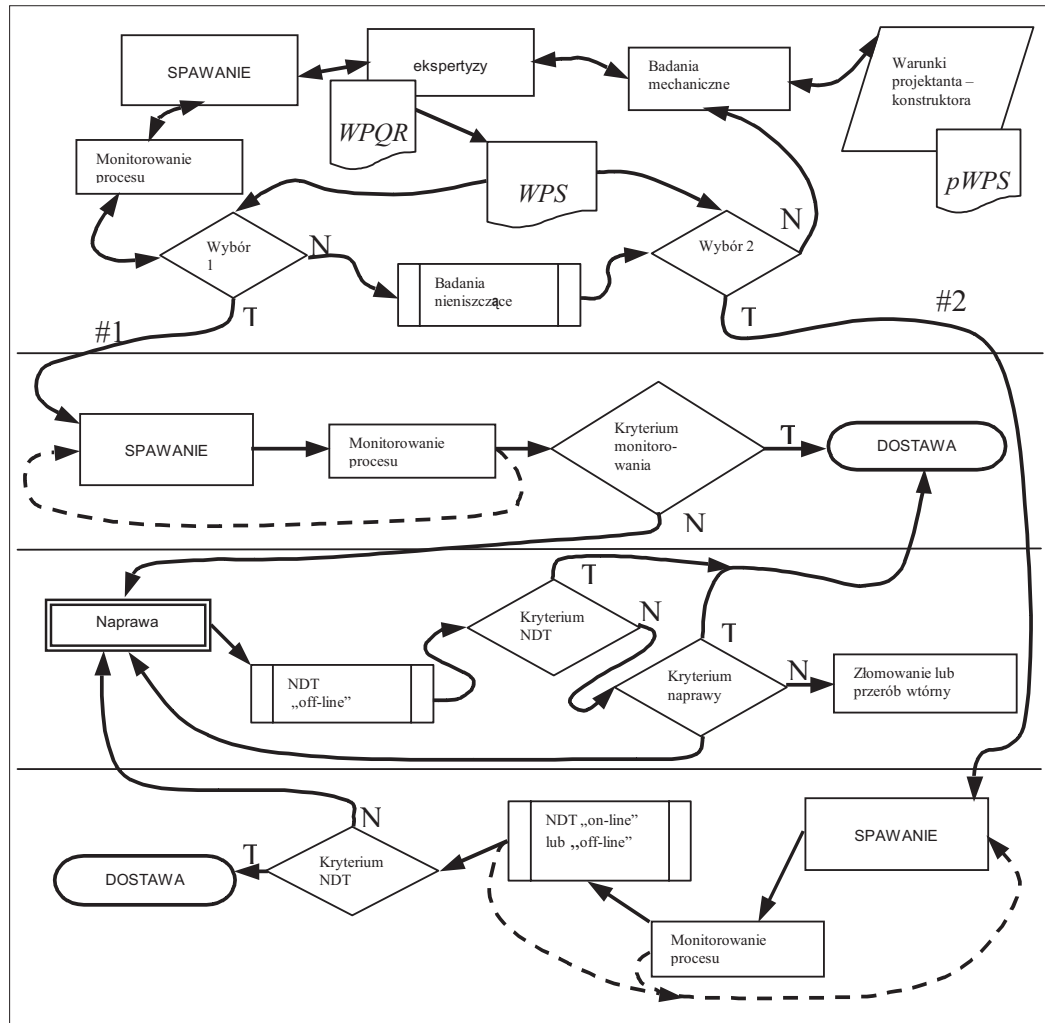
- wspomaganą komputerowo analizą obrazów złączy spawanych przy użyciu kamer cyfrowych CCD – w zakresie oględzin zewnętrznych,
- badania metodą prądów wirowych z multicewkowymi głowicami – w zakresie wykrywania wad powierzchniowych i podpowierzchniowych,
- komputerowo wspomaganie badania ultradźwiękowe.

Z punktu widzenia metod NDT, tworzone wizję nowoczesnej produkcji opierające się na spawaniu spowodują brak kontroli metodami badań nieniszczących w klasycznym rozumieniu.

Taki przyszłościowy system wytwarzania konstrukcji spawanych został opracowany i przetestowany we francuskich zakładach lotniczych „Aerospatiale Matra CCR” [10]. System ten oparto o tzw. koncepcję optymalizacji systemu spawalniczego. Schemat strukturalny

koncepcji przedstawiono na rysunku 8.

W opracowanym systemie cały potencjał ludzki jest zaangażowany w górnej warstwie wg rysunku 8, którą autorzy [10] nazywają etapem laboratoryjnego wytwarzania partii próbnej, a który jest w istocie projektowaniem technologii spawania w nowoczesnym rozumieniu inżynierii spawalnictwa. Optymalizacja systemu spawalniczego wg określenia autorów jest interaktywnym procesem różnych działań profesjonalnych, które współdziałają ze sobą. Przede wszystkim, zostaje opracowana instrukcja pWPS. Równocześnie jednak z procesem zatwierdzania instrukcji spawania prowadzona jest analiza skłonności do wadliwości złącza spawanego. W bloku, „ekspertyzy” na rysunku 8, oprócz badań makro i mikroskopowych, badań chemicznych prowadzi się analizę współzależności pomiędzy wpływem monitorowanych paramet-



Rys. 8. System produkcji konstrukcji spawanych według idei „optymalizacji systemu spawania” – wytwarzanie bez badań NDT; na podstawie [10]

trów spawania a wynikami badań złączy spawanych, w tym również współzależność pomiędzy sygnałami z monitorowania procesu spawania a wynikami badań nieniszczących – oceniając tzw. wrażliwość monitorowania na wadliwość złącza.

Najważniejszymi elementami strukturalnymi koncepcji optymalizacji systemu spawalniczego są dwa bloki wyboru, oznaczone na rysunku 8 jako „Wybór 1” i „Wybór 2”.

Oczywiście, z ekonomicznego punktu widzenia zawsze wybiera się blok „Wybór 1”, tzn. proces produkcyjny bez badań nieniszczących w szczególności gdy alternatywą są badania off-line (poza linią produkcyjną). Wybór taki przedstawia linia #1, prowadząca do warstwy drugiej schematu strukturalnego (rys. 8). W warstwie tej, linią przerywaną zaznaczono specyficzne sprzężenie zwrotne pomię-

dzy monitorowaniem procesu a spawaniem. Zapewnia ono w czasie rzeczywistym korektę parametrów spawania wg ustalonych kryteriów monitorowania i jest istotnym elementem samokontroli procesu spawania, który z tego właśnie względu nie wymaga dodatkowych badań NDT.

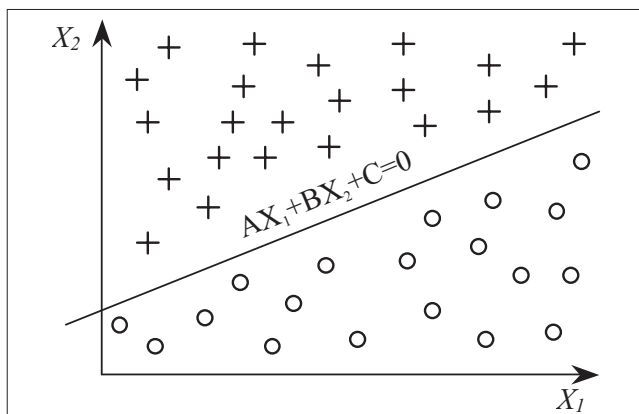
W drugim przypadku, gdy nie można ustalić na etapie badań laboratoryjnych współzależności pomiędzy monitorowanymi parametrami spawania, a badaniami nieniszczącymi wadliwości złącza spawanego, system działa jako swoisty alarm i wybiera skrzynkę „Wybór 2”, która linią # 2 prowadzi do procesu spawania z badaniami nieniszczącymi w trybie on-line, lub gdy takowe nie zostały zaimplementowane do systemu, prowadzony jest proces produkcyjny w tradycyjnym ujęciu off-line. Wyrób skierowany w systemie do naprawy jest wykonywany w tradycyjny sposób z międzyoperacyjnymi badaniami techniką NDT, jak to przedstawia trzecia warstwa schematu strukturalnego (rys. 8).

Realizacja idei nowoczesnych systemów spawalniczych na przykładzie problemu osłony łuku

O ile przedstawienie zasady sterowania synergicznego, czy też sterowania optymalnego spawarki jest w miarę proste, to opisanie procedur i implementacji sterowania systemami spawalniczymi przekracza ramy jakiegokolwiek publikacji. Procedury takie są dopiero tworzone. Rozwiązanie jest właściwie bardzo proste. Tak jak w opisanym sterowaniu synergicznym, istota sterowania systemami spawalniczymi polega na wykorzystaniu swoistego „sprzężenia zwrotnego”. Porównując schematy ideowe rysunku 7 i rysunku 8 z rysunkiem 2 oraz rysunkiem 3 łatwo dostrzega się pętle tego sprzężenia. O ile jednak, sterowanie synergiczne i optymalizacja sterowania spawarek opiera się (w zasadzie) na tradycyjnej teorii sterowania, to procedur sterowania systemów spawalniczych poszukuje się raczej w rozwiązaniach nowoczesnej heurystyki [11] i sztucznej inteligencji [12].

W procedurach sterowania systemów spawalniczych przyjmuje się również aspekt uczenia lub samouczenia się systemu, co ujęto w strukturze ZAS na rysunku 7. Według przyjmowanych koncepcji, samouczenie się systemu ma polegać na wykonaniu kilku elementów spawanych przez system, który po samodzielnej ocenie udoskonali projekt technologii tak, aby kolejne złącza wykonywał na przyjętym (przez człowieka) poziomie akceptacji – na wzór ewolucyjnego szkolenia sieci neuronowych [11].

Bardziej obrazowo, opisywany tu problem można przedstawić na przykładzie zadania dla prostej sieci neuronowej, pomysłu zaczerpniętego z pracy [11]. W wybranym zadaniu, którego ideę przedstawia rysunek 9, problem polega na znalezieniu przez sieć neuronową pro-



Rys. 9. Zadanie prostej sieci neuronowej; dla dowolnie wybranego obiektu $P(X_1, X_2)$ dokonać poprawnej klasyfikacji do zbioru krzyżyków lub kółek [11]

stej rozdzielającej o postaci $AX_1 + BX_2 + C = 0$ tak, aby dla dowolnie wybranego obiektu $P(X_1, X_2)$ sieć potrafiła zakwalifikować ten obiekt do jednego ze zbiorów: zbioru krzyżyków lub kółek.

Na etapie uczenia się sieci, to człowiek dokonuje oceny poprawności wyboru. Gdy wybór sieci jest błędny, dokonuje ona korekty (np. odpowiednią wagą w funkcji kary) współczynników prostej rozdzielającej. W systemach spawalniczych problem jest bardziej skomplikowany. Tym razem system w procesie uczenia „sam” musi rozpoznać czy obiekt $P(X_1, X_2)$ należy do zbioru krzyżyków, czy kółek. Po rozpoznaniu system poszukuje postaci prostej rozdzielającej, jak w prostej sieci neuronowej. Bardziej szczegółowy opis kwalifikowania obiektów (spawalniczych) przedstawiono, przykładowo, w pracy [13] dotyczącej kwalifikacji i oceny niezgodności spawalniczych oraz [14] – monitorowania i oceny skuteczności osłony łuku spawalniczego.

Zarys rozwiązania procedur systemów spawalniczych przedstawia się na przykładzie sterowania wybranej zmiennej technologicznej, a mianowicie na przykładzie sterowania zmiennymi osłony łuku [15].

Zgodnie z prezentowanymi tu schematami ideowymi systemów spawalniczych na rysunku 7 i rysunku 8, wdrożenie zagadnienia, tak wąskiego jakim jest wybór rodzaju gazu lub ustalenie wartości wydatku gazu, wymaga rozwiązań naukowo-technicznych na czterech płaszczyznach systemów (które szczegółowo wyróżniono na rys. 7). Zatem dla procesu sterowania wydatkiem gazu ochronnego wymagane są rozwiązania w zakresie:

1. projektowania technologii spawania,
2. sterowania i kontroli parametrów w czasie rzeczywistym,
3. kontroli jakości złączy spawanych,
4. pętli sprzężenia zwrotnego dla skorygowania projektowania technologii.

Rozwiązania, o których mowa, muszą obejmować algorytmy wyboru i obliczania wartości wielkości decyzyjnych oraz urządzenia techniczne do realizacji tych algorytmów.

Dla dalszych rozważań należy zauważyć, że w problematyce osłony łuku strumień gazu ochronnego ujawnia w procesie spawania dwie istotne cechy, a mianowicie: stanowi atmosferę łuku spawalniczego oraz stanowi izolację przed oddziaływaniem otoczenia. Oznacza to, że rozwiązanie problemu osłony łuku, w dowolnym procesie spawania, sprowadza się do ustalenia:

- rodzaju gazu ochronnego,
- parametrów osłony łuku.

Dalej, rozważania ogranicza się do procesu sterowania wydatkiem gazu ochronnego. W uproszczeniu, procedura sterowania zasadza się na trzech pojęciach teorii osłony łuku, a mianowicie: obszaru chronionego, strefy wrażliwej oraz skuteczności osłony.

Pierwsza wielkość – obszar chroniony – zgodnie z przyjętą definicją [16], określa warstwę osłony łuku przylegającą bezpośrednio do materiału rodzimego, dzięki której nie występuje niekorzystne oddziaływanie materii otoczenia na właściwości złącza spawanego. Druga wielkość – strefa wrażliwa – określa obszar powierzchni materiału rodzimego, który wymaga izolacji przed niekorzystnym oddziaływaniem otoczenia podczas spawania [17]. Wymiary strefy wrażliwej wyznacza izoterma temperatury wrażliwości [18]. Z kolei, temperaturę wrażliwości materiału rodzimego traktuje się jako nową, dodatkową właściwość materiałową, która stanowi zespół danych wejściowych przy projektowaniu technologii spawania, tak jak np. skład chemiczny, czy grubość blachy. Trzecie pojęcie – skuteczność osłony – wyraża wymaganie, aby charakterystyczny wymiar obszaru chronionego, np. mierzony średnicą F , był nie mniejszy od wymiaru strefy wrażliwej materiału rodzimego B , czyli $F - B \geq 0$.

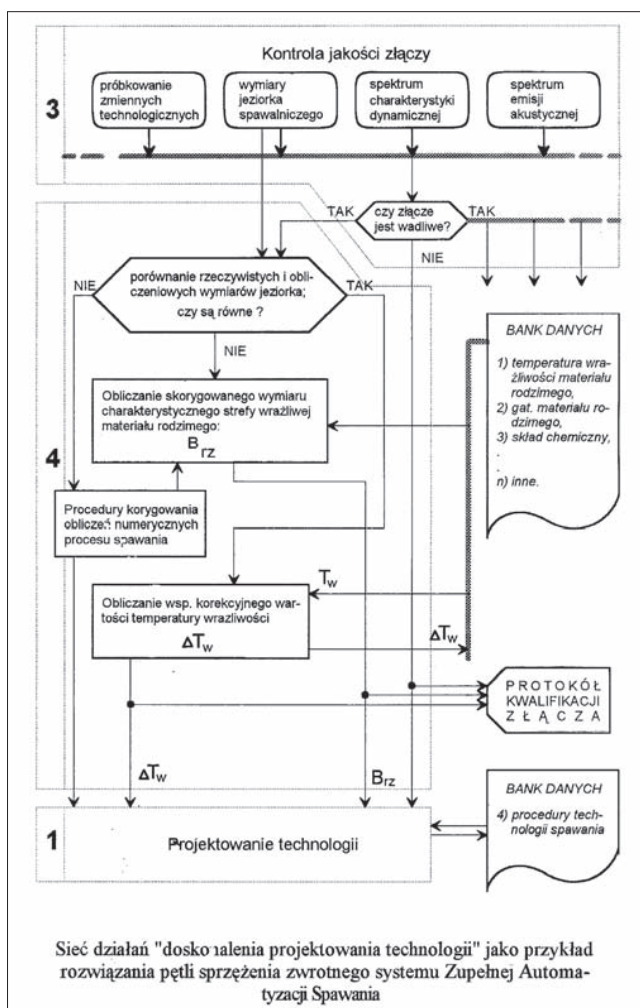
Traktując ukształtowaną osłonę łuku jako obiekt techniczny, formuluje się w oparciu o powyższą nierówność zadanie optymalizacji osłony łuku [15]. W sformułowanym zadaniu optymalizacji [15], skuteczność osłony jest ograniczeniem technologicznym, zaś funkcja celu wyraża ekonomiczną przesłankę minimalizacji kosztu całkowitego osłony łuku, którą w najdalszym uproszczeniu można sprowadzić do

minimalizacji wydatku gazu ochronnego. Formuła optymalizacji wiąże ze sobą trzy podstawowe wielkości osłony łuku, a mianowicie: prędkość średnią wypływu gazu z czoła dyszy, średnicę czoła dyszy oraz odległość od dyszy do powierzchni materiału rodzimego.

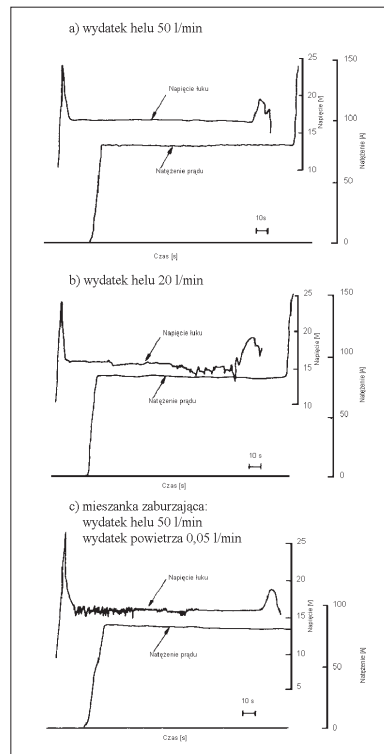
Wielkości te są wyznaczane równocześnie z poziomem wydatku gazu osłonowego dla konkretnej realizacji projektu technologii.

Dwie fazy systemów spawalniczych, a mianowicie 3. i 4. systemu ZAS (rys. 7) oraz pętla płaszczyzny 1. optymalizacji systemu spawania wg rysunku 8 są, z jednej strony, szczególnie istotnymi, a z drugiej – najbardziej enigmatycznymi płaszczyznami tych koncepcji. Związane z nimi pętle sprzężenia zwrotnego oraz moduły uczące systemu są najmniej określone, a trudności rozwiązań są zarówno natury teoretycznej, jak i implementacji użytkarnych. Celem sprzężenia, jest powiązanie monitorowania procesu spawania, kontroli jakości złączy i uczenia się systemu z projektowaniem technologii w taki sposób, aby możliwe było doskonalenie procedur i programów fazy 1. z rysunku 7.

Na rysunku 10 podano jeden z możliwych schematów ideowych procesów monitorowania i pętli sprzężenia zwrotnego systemu podczas sterowania wydatkiem gazu osłonowego. W omawianym zagadnieniu rozwiązanie uzyskano poprzez odpowiednie opracowanie procedury optymalizacji osłony łuku. Mianowicie, w kolejnych płaszczyznach systemu ZAS wykorzystuje się „wewnętrzne” sprzężenie zwrotne procesu optymalizacji. W uproszczeniu, realizacja sprzężenia polega na poniższych logicznych etapach rozwiązania zadania optymalizacji. Na etapie projektowania technologii ustala się (z banku danych lub w oparciu o programy eksperckie) wartość temperatury wrażliwości materiału rodzimego. Na tej podstawie, programowo (etap 1.3 na rys. 7), obliczany jest wymiar charakterystyczny strefy wrażliwej materiału rodzimego. W opar-



Rys. 10. Sieć działań „doskonalenia projektowania technologii” jako przykład rozwiązania pętli sprzężenia zwrotnego systemu Zpełnej Automatykacji Spawania



Rys. 11. Próbkowanie procesu spawania; wpływ zanieczyszczeń gazu osłonowego [19]

ciu o pozostałe parametry technologiczne (etap 1.2.3) wyznaczone są parametry osłony łuku, w tym wartość wydatku gazu jako rozwiązanie zadania optymalizacji. Ponieważ optymalizacja oznacza najlepszy wybór wartości wydatku gazu (również średnicy dyszy i odległości dysza-przedmiot), to zachowanie jakości złącza polega jedynie na monitorowaniu, kontroli (etapy 2.1 oraz 3) i sterowaniu (etap 2) wartości wydatku gazu ochronnego.

Monitorowanie to i kontrola skuteczności osłony łuku polega na próbkowaniu w czasie rzeczywistym „objektów” procesu spawania i ich inteligentnego przetwarzania w systemie. W najprostszym przypadku obiektem próbkowania może być charakterystyka dynamiczna na procesie spawania (w rzeczywistości, dokonuje się równoczesnej analizy wielu obiektów, jak przykładowo w szczególności na schemacie rys 10). W takim przypadku, w płaszczyźnie 1. systemu, jak na rysunku 8, należy rozpoznać wpływ skuteczności osłony na charakterystykę dynamiczną. Uzyskiwane wyniki badań, przykładowo z prac badawczych w ramach opracowywanych systemów IPA lub CAQ [19] (systemy monitorowania w czasie rzeczywistym i komputerowo wspomaganie systemy oceny jakości złączy spawanych), przedstawiono na rysunku 11. „Subtelne” oddziaływanie osłony łuku na charakterystyki procesu może być następnie oceniane przez procedury np. z wykorzystaniem sieci neuronowych, jak to opisano w pracy [14]. Przywołane rozwiązania jako podsystemy wchodzą w skład struktury pętli sprzężenia schematu na rysunku 10.

O jakości rozwiązania – sterowania wydatkiem gazu osłonowego – decydują: istotna wartość temperatury wrażliwości, adekwatność modelu matematycznego rozkładu temperatur na materiale rodzimym podczas spawania oraz modelu matematycznego osłony łuku [20]. Istotą systemu, określonego w bloku 4.1 (rys. 7) mianem „sztucznej inteligencji”, w odniesieniu do wydatku gazu ochronnego (ogólniej osłony łuku), jest pojęcie strefy wrażliwej materiału rodzimego oraz matematycznie sformułowane wymaganie skuteczności osłony w postaci wcześniej podanej nierówności. Implementując do systemu ZAS procedury określenia wartości temperatury wrażliwości, można opracować algorytm doskonalenia projektowania technologii. Doskonalenie to w przypadku sterowania wydatkiem gazu ochronnego (rys. 10) będzie ograniczało się jedynie do ustalenia skorygowanej wartości temperatury wrażliwości lub wyznaczenia jej poprawki na podstawie próbkowania obiektów systemu w czasie rzeczywistym procesu spawania.

Podsumowanie

Przedstawione w artykule koncepcje systemów spawalniczych są oczywiście subiektywne i wybiórcze. Globalne kierunki dalszego rozwoju spawalnictwa (zarówno w zakresie nowych metod i sterowania) są przedmiotem programów Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa, Europejskiej Federacji Spawalniczej oraz placówek naukowych i naukowo-badawczych. Stanowią również tematykę specjalnych seminariów spawalniczych. O strategiach rozwoju spawalnictwa, publicznie wypowiadają się dyrektorzy Instytutów Spawalnictwa.

Za podsumowanie stanu i perspektyw rozwoju spawalnictwa niech posłużą poniższe cytaty:

„Rozwój w metodach spawalniczych dotyczy, przede wszystkim doskonalenia wcześniejszych osiągnięć, a w znacznie mniejszym stopniu nowości”.

Prof. Jan Pilarczyk,
dyrektor Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach [21]

„Zwiększenie jakości i zdolności roboczej konstrukcji spawanych nierozłącznie wiąże się z doskonaleniem tak ważnego i pracochłonnego procesu, jakim jest nieniszcząca kontrola jakości połączeń spawanych”.

„Spawalnicy nie zdążyli jeszcze opanować jednego ze szczytów techniki inżynierskiej – budowy samolotów dla lotnictwa cywilnego. Nitowanie ciągle uważane jest za pewniejsze od spawania. „... „aby z należytą skutecznością stosować spawanie w budowie samolotów ... , w pierwszej kolejności należałoby zmienić konstrukcję samolotów z uwzględnieniem specyfiki zmechanizowanych i automatycznych metod spawania”.

Prof. B. E. Paton,
dyrektor Instytutu Spawania Elektrycznego im. E. O. Patona [22]

Omówione w artykule koncepcje wymagały i nadal wymagają opracowań naukowych i wdrożeniowych oraz implementacji, i walidacji w procesach spawalniczych takich elementów wiedzy, jak:

- Mechanizacja i robotyzacja prac spawalniczych w zakresie trajektorii.
- Elektroenergetyczne systemy sterowania spawarkami i procesami spawalniczymi.
- Systemy CAQ (IAP) w zakresie monitorowania procesów spajania i systemów kontroli złączy spajanych.
- CAW (komputerowego wspomaganie procesów spawalniczych) w zakresie projektowania i optymalizacji technologii.

W artykule wykorzystano materiały i własne doświadczenia z programów badawczych finansowanych przez firmę ELEKTRA BACKUM POLSKA oraz programu TEMPUS finansowanego z projektu IB_JEP 14043-99.

Literatura

- [1] **Szczok E.:** Badania procesów spawania łukowego elektrodą topliwą w osłonie mieszanek gazowych. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, 2/1996.
- [2] Przegląd Spawalnictwa (XL) nr 2/1988.
- [3] **Szefner Z.:** Strategie rozwoju sterowania urządzeń i systemów spawalniczych. Problemy Eksploatacji, nr 2/2004, ITE, Radom, 2004.
- [4] **Szefner Z.:** Stan oraz perspektywy rozwoju badań nieniszczących w kwalifikacji złączy spawanych na podstawie materiałów 15. WCNDT. Materiały VI Krajowej Naukowo-Technicznej Konferencji Spawalniczej nt. „Jakość w spawalnictwie”, Międzyzdroje, 8–10 maj, 2001.
- [5] **Kensik R., Plewniak J., Krawczyk R., Świątek A.:** Synergiczne sterowanie w procesach MIG/MAG. Przegląd Spawalnictwa (LXIX) nr 2/ 1997.
- [6] **Dobaj E.:** Maszyny i urządzenia spawalnicze. WNT, Warszawa, 1998.
- [7] **Kensik R.:** Systematyka urządzeń do spawania elektrodą topliwą w osłonie gazów ochronnych. II Szczecińska Konferencja Spawalnicza pt. „Nowoczesne wyposażenie stanowisk przy wytwarzaniu i remontach konstrukcji metalowych”, Szczecin, 1996.
- [8] **Szefner Z.:** Koncepcja systemu sterowania spawarki kompaktowej 400 SEM firmy ELEKTRA BACKUM. Przegląd Spawalnictwa (LXIX) nr 6/1997.
- [9] **Szefner Z.:** Controlling protective gas consumption in „Total Automation in Joining” concept. Proceedings of the International Conference on the Joining of Materials JOM-7, Helsingor, Denmark, May 31–June 2, 1995.
- [10] **Ithurralde G., Simonet D., Choffy J-P., Bernard L.:** NDT Approach and multisensors tools for the Inspection of aeronautic Welds. 15-th Word Conference on Non-Destructive Testing, Rome, Italy, 15–21 October, 2000, CD-file\jdn287.htm.
- [11] **Michalewicz Z., Fogel D., B.:** Jak to rozwiązać czyli nowoczesna heurystyka, WNT, Warszawa, 2006.
- [12] **Chromiec J., Strumieczna E.:** Sztuczna inteligencja. Metody konstrukcji i analizy systemów eksperckich, Akademicka Oficyna Wydawnicza PLZ, Warszawa, 1994.
- [13] **Nafaà N., Redouante D., Amar B.:** Weld Defect Extraction and Classification in Radiographic Testing Based Artificial Neural Networks, 15-th Word Conference on Non-Destructive Testing, Rome, Italy, 15–21 October, 2000, CD-file\jdn575.htm.
- [14] **Luksa K.:** Wykrywanie braku osłony gazowej łuku w metodzie GMA na podstawie wyników monitorowania procesu spawania, Przegląd Spawalnictwa, nr 4/2002.
- [15] **Szefner Z.:** Automatyzacja procesów spawalniczych. Koncepcja zupełnej automatyzacji na przykładzie problemu gazu ochronnego. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, nr 5/1995.
- [16] **Szefner Z.:** Podstawowe definicje problemu kształtowania osłony łuku podczas spawania łukiem osłoniętym. Archiwum Technologii Budowy Maszyn, z. 8, PAN, 1990.
- [17] **Szefner Z., Nowacki J.:** Wybrane aspekty strefy wrażliwej złącza spawanego. Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji, z. 22 nr 1, Poznań, 2002.
- [18] **Szefner Z.:** Temperatura wrażliwości materiału rodzimego – jako parametr technologii spawania. Przegląd Spawalnictwa, nr 4/2004.
- [19] **Kaihara S., Kouketsu M. i in.:** Development of In-Process Assurance Welding System, Journal of Ship Production, z. 9, nr 2, May, 1993.
- [20] **Szefner Z.:** Mathematical model of gas shield in Heliarc inert gas shielded welding. Part 2. Adequacy of the Shield Model. The International Journal for the Joining of Materials 4(3) September, 1992.
- [21] **Pilarczyk J.:** Spawalnictwo w trzecim tysiącleciu. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, nr 5/1999.
- [22] **Paton B., E.:** Problemy spawalnictwa na przełomie wieków. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, nr 5/1999.