

Zrobotyzowane procesy zgrzewania

Obecnie najczęściej stosowanym rodzajem zgrzewania elektrycznego jest zgrzewanie oporowe. Dzieli się je na:

- doczołowe (zwarciowe, iskrowe);
- punktowe (jedno- i dwustronne);
- liniowe (na zakładkę, liniowo-doczołowe);
- garbowe.

W zgrzewaniu doczołowym zwarciowym, dzięki oporowemu nagrzaniu obszaru styku przepływającym prądem elektrycznym, a następnie plastycznemu odkształceniu po osiągnięciu odpowiedniej temperatury zgrzewania, otrzymuje się trwałe połączenie między ściśle dociśniętymi, a oczyszczonymi elementami na całej powierzchni styku. Przy czym obszar zgrzewania jest nagrzewany do uplastycznienia lub do temperatur wyższych od temperatur topnienia. Głównymi parametrami tego typu zgrzewania są: natężenie prądu, siła docisku, długość mocowania, naddatek na spęczanie, czas przepływu prądu zgrzewania. Technologia zgrzewania doczołowego zwarciowego stosowana jest m.in. do łączenia: prętów, drutów, obręczy, rur, kształtowników wykonanych ze stali węglowych nisko- i wysokostopowych, stopów niklu, miedzi i aluminium.

W procesie zgrzewania doczołowego iskrowego (zgrzewanie również następuje na całej powierzchni styku) wyróżnia się trzy etapy: podgrzewanie wstępne, wyiskrzanie, spęczanie. Podgrzewanie jest wykonywane przy niewielkim docisku. Po nagrzaniu złącza następuje etap wyiskrzania, w którym jest wypalany materiał powierzchni złącza, w wyniku czego uzyskuje się gładką i czystą powierzchnię. Po usunięciu nadmiaru przeznaczanego na wyiskrzanie następuje etap spęczania, w którym powstaje wypływka zawierająca stopiony i utleniony metal. Zgrzewane przedmioty są dociskane siłą wystarczającą jedynie do zapewnienia styku w kilku miejscach. Po załączeniu przepływu prądu przez obszary stykowe o małej powierzchni i dużej oporności stykowej płynie prąd o bardzo dużej gęstości (natężenie prądu na jednostkę powierzchni stykowej), powodujący topienie metalu obszarów stykowych, utworzenie ciekłych mostków prądowych, a następnie gwałtowne ich rozerwanie w wyniku działania sił elektromagnetycznych i ciśnienia par metalu. Wraz z wyrzuceniem ciekłego metalu mostków z obszaru styku równocześnie są usuwane wszelkie zanieczyszczenia. Proces wyiskrzania, postępujący z odpowiednią prędkością, w sposób ciągły, powoduje, że ciepło z tworzących się coraz to nowych mostków prądowych odpływa w głąb zgrzewanych przedmiotów i nagrzewa przyległe obszary do stanu silnego uplastycznienia. Głównymi parametrami tego typu zgrzewania są: natężenie prądu, prędkość wyiskrzania, naddatek na wyiskrzanie, prędkość spęczania, siła docisku spęczania, naddatek na spęczanie, długość mocowania.

Zgrzewanie doczołowe iskrowe znajduje zastosowanie w łączeniu doczołowym rur, drutów, prętów kształtowników, szyn kolejowych, taśm, blach, ogniw łańcuchów, narzędzi

skrawających, wałów itd. Zgrzewa się przedmioty wykonane ze stali węglowych nisko- i wysokostopowych, miedzi i stopów miedzi, aluminium i jego stopów. Ponadto możliwe jest łączenie stali z miedzią, miedzi z aluminium oraz stali niskowęglowych ze stalą narzędziową.

W porównaniu ze zgrzewaniem zwarciowym, zgrzewanie iskrowe ma kilka zalet:

- większą wytrzymałość i plastyczność złącza;
- prostsze przygotowanie przedmiotów;
- wąską strefę wpływu ciepła;
- szerszy zakres możliwości zgrzewania ze sobą różnych metali (okres wyiskrzania może trwać tak długo, aż każdy z metali osiągnie temperaturę topnienia);
- mniejsze zużycie energii i większą szybkość zgrzewania, a zatem większą wydajność.

Najbardziej rozpowszechnionym sposobem zgrzewania oporowego, zapewniającym wykonanie złącza o wysokiej wytrzymałości, jest zgrzewanie punktowe. Umożliwia ono łączenie na zakładkę, w odpowiednio rozmieszczonych punktach dociśniętych wzajemnie blach, za pomocą elektrod kłowych przewodzących prąd. W miejscu docięcia, na skutek przepływu prądu, materiał blach się rozgrzewa i łączy ze sobą. Głównymi parametrami tego typu zgrzewania są: natężenie prądu, siła docisku, czas zgrzewania, wymiary robocze elektrody. Najczęstsze zastosowanie zgrzewania punktowego to łączenie elementów wykonanych ze stali węglowych i stopowych, niklu, tytanu, ich stopów oraz stopów miedzi i aluminium. Grubość zgrzewanych elementów zależy od rodzaju materiału (np. w przypadku stali węglowych o zawartości węgla do 0,25% maksymalna grubość zgrzewanych blach nie przekracza 20 mm, a w przypadku aluminium i jego stopów – 5 mm). Z uwagi na fakt, że wydajność zgrzewania punktowego jest bardzo duża, technologia ta jest z powodzeniem robotyzowana (np. dla blach o grubości 0,8–1,0 mm można uzyskać do 2 tys. zgrzein/h przy użyciu zgrzewarek jednopunktowych oraz do 10 tys. zgrzein w przypadku zgrzewarek wieloelektrodowych).

Zgrzewanie liniowe jest metodą łączenia, w której złącze elementów metalowych jest tworzone przez wiele zgrzein punktowych powstałych w stanie ciekłym, ułożonych jedna obok drugiej, wzdłuż określonej linii. Możliwe jest to dzięki zastosowaniu elektrod krążkowych, które doprowadzają prąd i wywierają docisk zgrzewania. W zależności od kinetyki ruchu elektrod, przebiegu impulsów prądowych i czasu ich trwania zgrzewanie oporowe liniowe dzieli się na:

- ciągłe – elektrody krążkowe są napędzane ze stałą prędkością, a prąd zgrzewania przepływa przez elektrody i złącze w sposób ciągły, przy stałej sile docisku zgrzewania – spoina jest tworzona jako jeden ciągły szew;
- przerywane – elektrody krążkowe obracają się ze stałą prędkością, a prąd zgrzewania przepływa z regularnymi przerwami;

- skokowe – polega na skokowym ruchu obrotowym elektrod krążkowych, które są zatrzymywane na czas przepływu prądu i obracają się o określony skok, w czasie przerwy jego przepływu.

Głównymi parametrami zgrzewania oporowego liniowego są: natężenie prądu, siła docisku, prędkość zgrzewania, czas przepływu prądu zgrzewania, czas przerwy w przepływie prądu, wymiary robocze i rodzaj materiału elektrod. Zgrzewanie liniowe stosuje się do łączenia cienkich blach w aplikacjach, gdzie priorytetem jest uzyskanie szczelnego połączenia (np. zbiorniki paliwowe, sprzęt gospodarstwa domowego, samochody, wagony).

Podczas **zgrzewania garbowego** zgrzeina powstaje w miejscu punktu kontaktowego, specjalnie ukształtowanego na materiale roboczym. Ponieważ punktami kontaktowymi (tzw. garbami) mogą być wybrzuszenia lub występy technologiczne (np. pierścieniowe, wydłużone), ich wymiary są jednocześnie wymiarami zgrzewania zgrzein powstałych podczas procesu. Z wykorzystaniem dużych, obejmujących wiele punktów elektrod możliwe jest łączenie wielu punktów w jednym cyklu pracy. Technologia zgrzewania oporowego garbowego umożliwia tworzenie złączy zakładkowych lub doczołowych i jest szeroko stosowana w produkcji wielkoseryjnej akcesoriów samochodowych, m.in. do zgrzewania elementów o kształcie pręta (śruby, zaczepty), elementów rurowych, sworzni i krzywek.

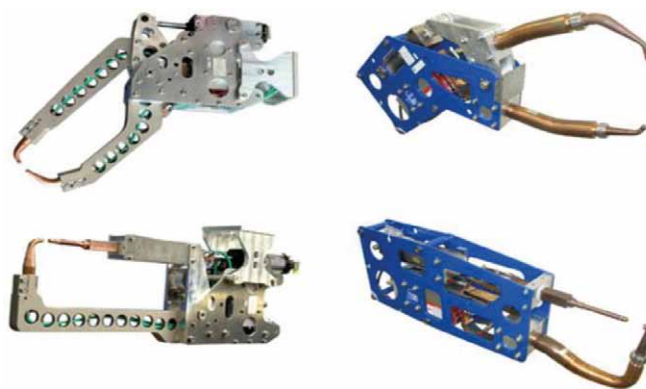
Zrobotyzowane stanowiska spawalnicze

– dobór robota i jego wyposażenia

Przedstawione technologie zgrzewania, ich cechy oraz parametry poszczególnych typów zgrzewania determinują możliwość wykorzystania robotów przemysłowych w tych technologiach. Z uwagi na możliwości integracji zgrzewadeł z robotami przemysłowymi oraz powszechność stosowania danej technologii na zrobotyzowanych stanowiskach produkcyjnych najczęściej można spotkać aplikacje zgrzewania punktowego.

Wdrażanie zrobotyzowanych stanowisk do zgrzewania powinno być poprzedzone dokładną analizą, która dostarczy odpowiedzi dotyczącej celowości takiego działania – w szczególności: czy takie działanie jest opłacalne (ekonomicznie uzasadnione) oraz jak wpłynie na wydajność produkcji i bezpieczeństwo pracy. Bez wątplenia w przypadku zgrzewania wyeliminowanie człowieka operatora podnosi bezpieczeństwo pracy, zwiększa wydajność produkcji oraz jakość produktu.

Z punktu widzenia technologa procesu zgrzewanie polega na takim dobraniu parametrów procesu, aby powstało połączenie zgrzewane – zgrzeina – o założonej średnicy (zależnej od grubości zgrzewanych elementów) i wytrzymałości równej co najmniej wytrzymałości materiału rodzimego. Dlatego konieczne jest dobranie odpowiedniego zgrzewadła. Ze względu na masę zgrzewadła montowanego na robocie przemysłowym zgrzewadła można podzielić na urządzenia o masie poniżej i powyżej 90 kg (np. lekkie zgrzewadła firmy COMAU z serii VX oraz VC – rys. 1). Dlatego też roboty przemysłowe wykorzystywane w procesie zgrzewania są najczęściej urządzeniami o dużym udźwigu (zwykle powyżej 100 kg). Przeważnie są to również roboty sześciosiowe z uwagi na konieczność manipulowania narzędziem roboczym w sześciu stopniach swobody (w wielu



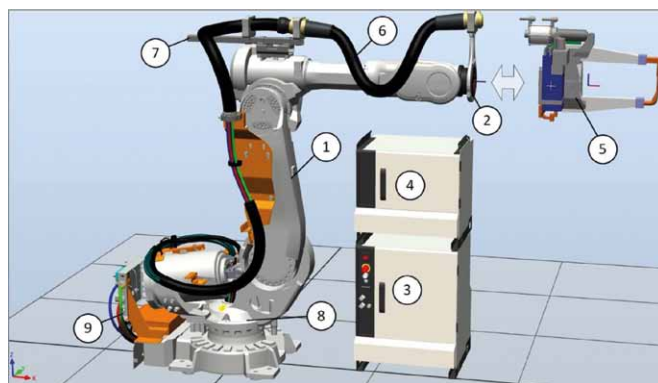
Rys. 1. Lekkie zgrzewadła firmy COMAU z serii VX oraz VC o masie poniżej 90 kg

(Źródło: COMAU Robotics)

przypadkach podjęcie do miejsca zgrzewania jest bardzo utrudnione ze względu na duże gabaryty samego zgrzewadła oraz złożony kształt łączonych detali, np. karoserii samochodowej). Do głównych cech robotów do zgrzewania należy zaliczyć:

- liczbę osi – 6;
- masę manipulatora ok. 900 kg;
- udźwig do 150 kg;
- zasięg ok. 2,2 m;
- powtarzalność ok. 0,03 mm;
- możliwość montażu na podłodze, ścianie, pod kątem;
- standardowo stopień ochrony IP54 lub IP67 [I.12, I.13].

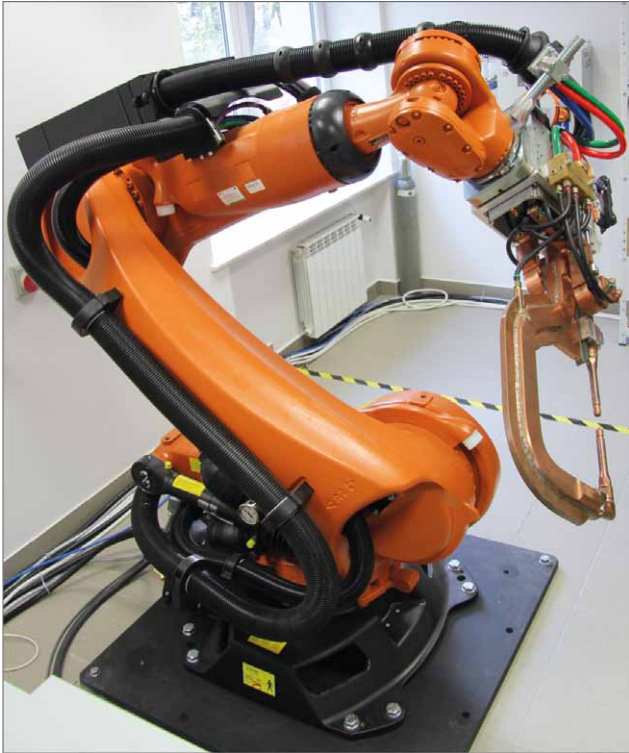
Z uwagi na popularność technologii zgrzewania firmy produkujące roboty przemysłowe mają w swojej ofercie roboty przeznaczone do zgrzewania (np. IRB 6620 firmy ABB, R-1000iA firmy FANUC, KR 125 firmy KUKA, Smart5 NM/NJ firmy COMAU). Oznacza to, że roboty te są w pewien sposób (sprzętowo i programowo) przygotowane do szybkiego wdrożenia (rys. 2 i 3). Firmy oferują m.in.:



Rys. 2. Główne komponenty robota do zgrzewania na przykładzie robota IRB 6640 firmy ABB:

- 1 – manipulator;
- 2 – uchwyt na osi 6;
- 3 – kontroler;
- 4 – szafa procesowa;
- 5 – zgrzewadło;
- 6 – ochrona przewodów (DressPack);
- 7 – uchwyt;
- 8 – przepusty w osi 1;
- 9 – skrzynka połączeniowa

(Źródło: opracowanie własne na podstawie RobotStudio)

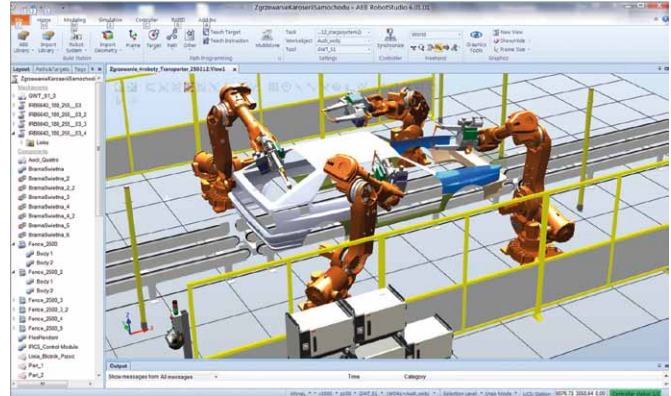


Rys. 3. Robot KR 120 R2500 PRO firmy KUKA na stanowisku zgrzewalniczym

- specjalistyczne szafy procesowe umożliwiające szybkie podłączenie zgrzewadła z okablowaniem doprowadzonym do kiści robota;
- tzw. DressPack – dopasowane kanały z przewodami ochraniające przewody oraz dostosowane kształtem i wymiarami do danego typu robota;
- specjalistyczne oprogramowanie procesowe (np. oprogramowanie RobotWare);
- spot kontrolera (IRC5 firmy ABB [I.5], oprogramowanie Spot Tool firmy FANUC);
- specjalistyczne interfejsy dla tzw. Teach Pendantów (przenośnych paneli do programowania pracy robota), wspierające programistów i operatorów;
- dostosowane sprzętowo kontrolery robotów (zwłaszcza pod kątem komunikowania się z osprzętem zgrzewadła).

Wśród dodatkowych opcji, jakie powinno zawierać oprogramowanie, należy wyróżnić:

- zmianę końcówki pistoletowej do zgrzewania;
- automatyczną regulację TCP;
- automatyczną korekcję błędów;
- realizację lustrzanego odbicia ruchu;
- sprawdzenie wolnej przestrzeni;
- automatyczne obliczanie TCP;
- sterowanie dodatkową osią;
- wczesne wykrywanie kolizji;
- śledzenie ruchu taśmy produkcyjnej;
- skok zależny od kolizji.



Rys. 4. Stanowisko zgrzewania karoserii samochodowej na linii montażowej

(Źródło: opracowanie własne na podstawie RobotStudio)

Zrobotyzowane stanowiska zgrzewalnicze – konfiguracja stacji

Pojedyncze stanowiska do zgrzewania punktowego mogą mieć postać podobną do stanowisk spawalniczych, dlatego ich projektowanie i budowa oparte są na podobnych zasadach. Jednak z uwagi na fakt, że najwięcej robotów zgrzewających jest instalowanych w przemyśle samochodowym na w pełni zautomatyzowanych liniach, zajmują one określoną (zamkniętą) przestrzeń (rys. 4). Również w tym przypadku, podobnie jak w aplikacjach spawalniczych, konieczne jest zapewnienie pełnej automatyzacji oraz bezpieczeństwa.

Nowe rozwiązania i technologie w procesie zrobotyzowanego zgrzewania

Choć sama idea procesu zgrzewania nie jest nowa, nie oznacza to, że się nie zmienia. Zmiany są znaczące. Przede wszystkim dlatego, że choć proces zgrzewania jest stosunkowo tani, to malejące koszty implementacji takich rozwiązań, jak na przykład spawanie laserowe, sprawiają, że część zakładów zaczyna stosować zamiast zgrzewania właśnie spawanie laserowe. Pozwala to na znaczne przyspieszenie procesu łączenia detali. Patrząc jednak na dziesiątki robotów zgrzewalniczych w każdej z fabryk motoryzacyjnych, trudno – nawet przy malejących cenach źródeł laserowych – wyobrazić sobie pełne zastąpienie zgrzewania spawaniem laserowym [I.12, I.13].

Jednym z nowych rozwiązań, jakie pojawiły się na rynku, jest zgrzewanie laserowe (rys. 5), zastosowane przez firmę COMAU w zakładach Fiata w Cassino. Wykorzystano w nim wysoko skoncentrowaną wiązkę laserową o bardzo długiej ogniskowej, przemieszczającą się z dużą prędkością dzięki zastosowaniu optycznego układu luster galwanometrycznych. Nowa technologia ma jednak zastosowanie tylko w niektórych aplikacjach, zwłaszcza tam, gdzie konieczne jest zespolenie kilku takich samych elementów za pomocą zgrzewania punktowego wykonywanego z dużą prędkością (np. paneli drzwi samochodowych). Jak przekonują inżynierowie, koszt wykonania zgrzewiny techniką laserową (biorąc pod uwagę produkcję masową) jest porównywalny z tradycyjną technologią zgrzewania



Rys. 5. Robot firmy COMAU na stanowisku do zgrzewania laserowego

(Źródło: COMAU Robotics)

punktowego, a jest znacznie wydajniejszy. Wykonanie jednego punktu zgrzewania dawną technologią zajmuje ok. 2 s – w tym samym czasie laser wykonuje osiem takich punktów.

Jedno z najnowocześniejszych rozwiązań – Smart Laser – polegające na zintegrowaniu robotów serii Smart firmy COMAU Robotics z wykorzystaniem innowacyjnych laserów na ciele stałym, zostało opracowane na bazie czteroosiowego robota COMAU Smart NH1 z kontrolerem C4G. Przy czym źródło lasera, które może się znajdować w odległości od 750 do 1100 mm od zgrzewanego detalu, jest traktowane jako dodatkowa oś robota (poruszająca się z prędkością do 4000 mm/s).

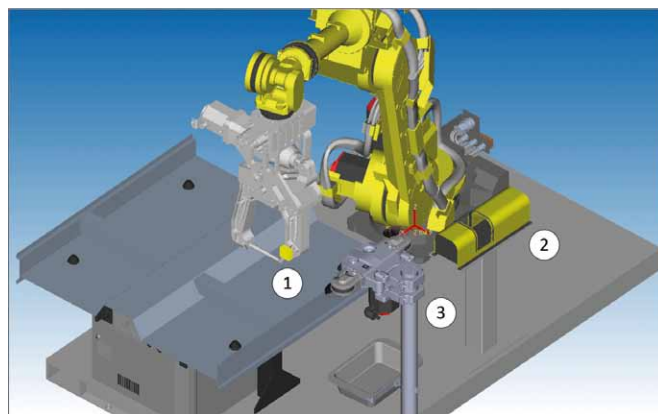
Rozwiązanie Smart Laser z powodzeniem zostało wdrożone w zakładach Fiata w Cassino i jest wykorzystywane do zgrzewania ocynkowanych, wewnętrznych elementów drzwi samochodów Lancia Delta i Alfa Romeo Giulietta. Podczas realizacji procesu w pierwszej kolejności na jednym z detali, za pomocą impulsów laserowych, wykonywanych jest kilka przetłoczeń. Przeciwdziałają one osłabieniu zgrzewanych punktów na skutek tworzących się podczas zgrzewania porów, przez które ulatniają się (zgromadzone między zgrzewanymi powierzchniami) opary cynku. Powstała dzięki temu szczelina między zgrzewanymi detalami pozwala oparom cynku ulotnić się ze strefy topienia. Połączenie dwóch elementów drzwi jest realizowane zgrzeiną długości ok. 20 mm, co gwarantuje taką samą wytrzymałość mechaniczną, jak tradycyjne zgrzewanie punktowe. Cały system składa się z dwóch kabin (jedna do zgrzewania drzwi prawych, druga do lewych). W każdej kabine są zainstalowane dwie jednostki Smart Laser: jedna wykonuje przetłoczenia na detalu ułożonym w pionie na stole obrotowym, a druga realizuje właściwe zgrzewanie laserowe w poziomie.

Roboty są zasilane z trzech źródeł lasera TruDisk 4002 o mocy 4 kW. Jedno obsługuje roboty wykonujące przetłoczenia, a dwa pozostałe źródła sterują wiązkami laserowymi wykonującymi właściwe zgrzewanie laserowe. Takie rozwiązanie umożliwia przejęcie funkcji jednego robota przez drugiego w przypadku awarii (redundancja). Łączny czas cyklu zgrzewania elementów jednej pary drzwi – prawych i lewych – wynosi 78 s, co pozwala na wykonanie 880 par drzwi w ciągu doby, przy wydajności sięgającej 90%.

Innym przykładem nowoczesnego podejścia do procesu zgrzewania jest opracowane przez firmę FANUC rozwiązanie bazujące na pomiarze drgań występujących podczas manipulacji zgrzewadłem (rys. 6). Mimo dużej sztywności konstrukcji robota, nie da się w klasycznym rozwiązaniu wykluczyć drgań związanych z operowaniem znaczącą masą. W swoim rozwiązaniu FANUC w specjalnej linii robotów Gakushu Robot zaimplementował funkcję *Learning Vibration Control* (LVC). Nie jest to, niestety, jedynie funkcja programowa, gdyż wymaga dodatkowych elementów w postaci modułu rejestrującego drgania podczas procesu uczenia się.

Proces zaczyna się od wstępnego programowania aplikacji zgrzewania. Następnie – po zainstalowaniu czujnika mierzącego drgania i usunięciu elementu, który jest zgrzewany – następuje optymalizacja mająca na celu wyeliminowanie drgań w punkcie zgrzewu (dzięki czemu czas przebywania narzędzia w punkcie może być zredukowany). Po nauczeniu nowych parametrów procesowych czujnik jest usuwany i proces technologiczny może być uruchomiony na danym stanowisku w trybie roboczym.

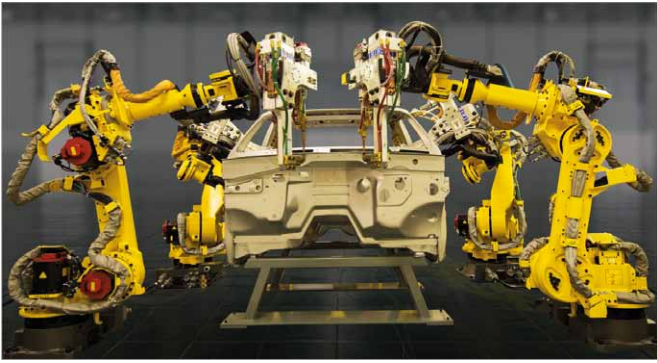
Oszczędność czasu uzyskana dzięki implementacji LVC jest dość znaczna, gdyż dla cyklu operacji zgrzewania wynosi – w zależności od kontrolera robota (R-30iA/R-30iB) – ok. 10%. Dla dużych zakładów motoryzacyjnych skrócenie cyklu zgrzewania o 10% jest już rozwiązaniem wartym uwzględnienia [II.7]. Tym bardziej, że nie ma konieczności wielokrotnego ponoszenia kosztu zaawansowanych rozwiązań sprzętowych, gdyż moduł pomiarowy może być na czas uczenia przenoszony



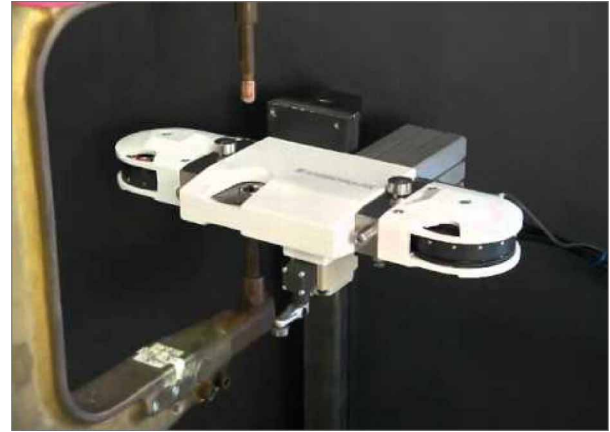
Rys. 6. Robot firmy FANUC wyposażony w zgrzewadło oraz trzyosiowy akcelerometr:

- 1 – trzyosiowy czujnik akcelerometryczny LVC;
- 2 – moduł do automatycznej wymiany elektrod DH SVR 2 Kyokutoh;
- 3 – iRVision Inspection Box

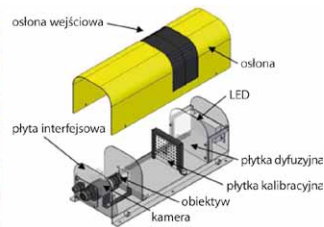
(Źródło: FANUC)



Rys. 7. Roboty firmy FANUC na stanowisku do zgrzewania z trzyosowym akcelerometrem (Źródło: FANUC)



Rys. 9. DH SVR 2 Kyokutoh (Źródło: Kyokutoh)



Rys. 8. Ogólny widok i schemat iRVision Inspection Box firmy FANUC (Źródło: FANUC)



Rys. 10. Robot firmy KUKA na stanowisku do zgrzewania w technologii FSW (Źródło: www.chess.com)

między poszczególnymi stanowiskami, na których po zoptymalizowaniu programu nie jest później wykorzystywany. Na rysunku 6 przedstawiono jeszcze dwa elementy wyposażenia stanowisk zgrzewalniczych. Pierwszym jest iRVision Inspection Box, służący do oceny stanu zużycia elektrod zgrzewadła (rys. 8).

Robot co określony czas podjeżdża do modułu i umieszcza w nim jedną, a następnie drugą elektrodę. Zintegrowany system wizyjny dokonuje oceny stanu zużycia elektrod i na tej podstawie podejmuje decyzję o ewentualnej konieczności wymiany elektrod zgrzewadła. Moduł iRVision Inspection Box może być również wykorzystywany na stanowiskach spawalniczych do oceny stanu palnika i automatycznego ustawiania TCP narzędzia. Do automatycznej wymiany elektrod służy kolejny z elementów stanowiska, moduł DH SVR 2 firmy Kyokutoh (rys. 9). Robot najpierw podjeżdża do gniazda, w którym są odkręcane zużyte elektrody, a następnie podjeżdża do magazynku znajdującego się na skraju modułu i wkręca nową elektrodę.

Ciekawym rozwiązaniem, które obecnie (po pomyślnym wykorzystaniu w przemyśle lotniczym) coraz częściej znajduje zastosowanie również w branży motoryzacyjnej, jest zgrzewanie tarcowe z przemieszaniem (*Friction Stir Welding* – FSW). Choć patent na tę technologię łączenia metali pochodzi z 1991 r., to rozwój robotyki pozwolił obecnie na wykorzystanie jej wszędzie tam, gdzie spoiny muszą być ciągłe i wolne od pęknięć oraz porowatości typowych dla spoin uzyskiwanych w procesie spawania. Dodatkową zaletą jest możliwość łączenia różnych

rodzajów aluminium, co również zostało już docenione w przemyśle lotniczym i staje się coraz bardziej popularne w motoryzacji. Jedną z pierwszych firm implementujących metodę FSW na stanowiskach zrobotyzowanych była firma ABB, współpracująca m.in. z firmą ESAB, która w robocie IRB 7600 zainstalała głowicę FSW. W ostatnich latach również KUKA (rys. 10) podjęła intensywne prace w tym kierunku, m.in. podpisując kilka lat temu porozumienie z EADS, jednym z głównych producentów uzbrojenia na rynku europejskim. Rozwiązanie to jest teraz wykorzystywane również przez innych producentów robotów jako metoda przeznaczona do specyficznych aplikacji w przemyśle lotniczym lub motoryzacyjnym. Łączenie metalu w ten sposób znalazło zastosowanie m.in. na liniach produkcyjnych elementów do takich modeli, jak Mazda MX-5 Miata, Audi R8 Spider oraz Volvo V70. ■

Bibliografia dostępna pod linkiem:
nis.com.pl/bibliografia.html

Fragment pochodzi z książki:
 W. Kaczmarek, J. Panasiuk
Robotyzacja procesów produkcyjnych
 Wydawnictwo Naukowe PWN, 2017