

Sposób sterowania procesem zgrzewania rezystancyjnego punktowego

Przedmiotem wynalazku jest sposób sterowania procesem zgrzewania rezystancyjnego punktowego, przeznaczony do stosowania w przemyśle motoryzacyjnym do zgrzewania cienkościennych metalowych elementów.

Sposób sterowania procesem ma na celu uzyskanie złącza zgodnego z założonymi parametrami, wypełniające w tym zakresie warunki normy oraz ograniczenie skutków wystąpienia w trakcie zgrzewania ekspulsji ciekłego metalu.

Zgrzewanie rezystancyjne punktowe jest znanym od lat procesem nierozłącznego łączenia elementów metalowych, polegający na doprowadzeniu prądu elektrycznego do obszaru styku, nagrzaniu go do temperatury powyżej temperatury topnienia zgodnie z prawem Joule'a – Lenza i utworzenie ciekłego jądra zgrzeiny. Po wyłączeniu prądu zgrzewania następuje krzepnięcie obszaru styku i powstanie trwałego połączenia.

Proces zgrzewania rezystancyjnego opisują podstawowe parametry, tj. prąd i czas zgrzewania oraz siła docisku elektrod, przy czym istnieje związek pomiędzy zmianą parametrów technologicznych procesu zgrzewania a parametrami elektrycznymi.

Problemem technologicznym jest ekspulsja ciekłego metalu podczas zgrzewania, będąca efektem zbyt dużej energii dostarczonej do obszaru złącza. Pod wpływem wysokiego ciśnienia par metali wewnątrz jądra zgrzeiny materiał blach nie jest w stanie utrzymać ciekłego jądra zgrzeiny i następuje wyrzucenie ciekłego metalu poza obszar złącza. Z uwagi na bardzo dynamiczny charakter procesu, zjawisko to trwa kilka milisekund, jest ono bardzo trudne zarówno do detekcji jak i kontroli.

Kontrolę jakości wykonywanych zgrzein punktowych, ze względu na ilość połączeń, prowadzi się w czasie rzeczywistym w trakcie ich powstawania, podczas tworzenia ciekłego jądra zgrzeiny z równoczesną korektą odstępstw i zakłóceń w procesie zgrzewania oporowego punktowego.

Metody kontroli jakości w czasie rzeczywistym np. działające w oparciu o sieci neuronowe, metody matematyczne z zastosowaniem analizy na bazie logiki rozmytej, systemy ultradźwiękowe, wykorzystywane są również do sterowania parametrami procesu zgrzewania.

Znane są rozwiązania w których zjawisko ekspulsji w procesie zgrzewania wykrywa się na podstawie gwałtownych zmian napięcia zgrzewania, przemieszczenia elektrod czy siły docisku elektrod, jak i innych parametrów podstawowych oraz parametrów od nich pochodnych lub w połączeniu, a proces zgrzewania prowadzi się z eliminacją lub ograniczeniem skutków ekspulsji (wyprysku). Dla ograniczenia skutków ekspulsji stosuje się między innymi natychmiastowe zatrzymanie doprowadzania prądu zgrzewania, zgrzewanie prądem o mniejszej wartości i zwiększoną siłę docisku elektrod, natomiast według patentu US5892147 szacuje się w czasie rzeczywistym wielkość przyrostu jądra zgrzeiny oraz ilość wprowadzonego do procesu ciepła. Znany jest również z opublikowanego opisu wynalazku JP2005262259 dwuetapowy sposób zgrzewania oporowego punktowego, gdzie zgrzewanie w drugim etapie prowadzi się przy mniejszym prądzie zgrzewania, dłuższym czasie zgrzewania oraz z większą siłą docisku elektrod, w porównaniu z pierwszym etapem zgrzewania. W pierwszym etapie siła docisku elektrod P_1 , prąd zgrzewania I_1 i czas zgrzewania T_1 , w stosunku do grubości (mm) najcieńszej płyty metalowej spośród szeregu płyt, spełnia warunki, w których: $0.8tm \leq P_1 \leq 5tm$, $3tm + 5 \leq I_1$, $2 \leq T_1 \leq 6$, gdzie tm : grubość (mm) najcieńszej płyty metalowej spośród szeregu płyt, a zgrzewanie w drugim etapie, prowadzi się siłą nacisku P_2 , prądem zgrzewania I_2 i w czasie T_2 oraz spełnia warunki: $1.1P_1 \leq P_2 \leq 10P_1$, $0.5I_1 \leq I_2 \leq I_1$, $T_1 \leq T_2 \leq 10T_1$.

Sposób sterowania procesem zgrzewania, znany z amerykańskiego patentu US3774006A, polega na sterowaniu czasem zgrzewania poprzez pomiar rezystancji dynamicznej w trakcie procesu zgrzewania. Sterownik, w skład którego wchodzi: licznik impulsów, amperomierz, woltomierz, wyłącznik prądu oraz układ detekcji zbocza jako sygnał bazowy wykorzystuje rezystancję mierzoną podczas procesu zgrzewania i na jej podstawie (wartość oraz kształt krzywej) dokonuje adaptacyjnej kontroli i stabilizacji procesu. Inny sposób sterowania prądem i czasem podczas procesu zgrzewania rezystancyjnego punktowego znany jest z opisu US5852273A. Polega on na wykorzystaniu danych z obliczeń numerycznych do sterowania prądem i czasem zgrzewania w celu uzyskania jądra zgrzeiny o żądanym kształcie i wymiarach. Układ sterowania wykorzystuje pomiar prądu i napięcia i na podstawie danych z obliczeń dobiera parametry ich narostu w sposób zapewniający optymalny rozrost ciekłego jądra zgrzeiny. Sterowanie realizowane jest w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego, co sprawia, że wartości elektryczne procesu poddawane są ciągłym zmianom, mającym na celu zapewnienie najkorzystniejszych warunków cieplnych podczas powstawania jądra zgrzeiny.

Patent US4447700A przedstawia sposób adaptacyjnej kontroli procesu zgrzewania rezystancyjnego polegający na wykorzystaniu rezystancji dynamicznej jako parametru,

na podstawie którego dokonuje się regulacji procesu. Przed rozpoczęciem procesu zgrzewania kontroler dokonuje pomiaru statycznej rezystancji i sprawdzenia czy mierzona wartość mieści się w ustalonych wcześniej granicach. Dzięki temu możliwa jest identyfikacja materiału zgrzewanego, jego grubość i ewentualne zanieczyszczenia na powierzchni. Podczas procesu, w każdej połówce cyklu zgrzewania dostarczana moc jest mierzona i kontrolowana w zależności od aktualnych parametrów m.in. rozszerzalności cieplnej materiału zgrzewanego. Ponadto działający w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego sterownik analizuje i kompensuje niekorzystne czynniki technologiczne, takie jak: spłaszczanie elektrod w trakcie procesu oraz bocznikowanie prądu zgrzewania.

W sposobie sterowania siłą docisku elektrod, według EP1428608 B1, ustala się jednorazowo optymalną zadaną siłę docisku dla danego procesu zgrzewania oraz określa wymagany prąd roboczy dla napędu elektrycznego, dla stałej prędkości ruchu przy każdym następnym skoku roboczym. W procesie monitorowana jest rzeczywista prędkość ruchu, a w razie potrzeby stałą prędkość utrzymuje się przez korektę prądu roboczego.

Z opisu patentu US4596917 znane jest monitorowanie wielu zmiennych procesu spawania oporowego w celu uzyskania chwilowej informacji o jakości zgrzein podczas cyklu zgrzewania. Czujniki zmiennych wejściowych i zmiennych odpowiedzi dostarczają sygnały do układu mikrokomputera. Uproszczony model analityczny procesu zgrzewania punktowego jest wbudowany w mikrokomputer i stanowi punkt odniesienia dla kontroli jakości zgrzeiny. Wadliwe zgrzeiny są diagnozowane, a przyczyna wyświetlana.

Znany jest z opisu patentu US6506997 sposób monitorowania warunków procesu zgrzewania oporowego, gdzie w czasie rzeczywistym monitoruje się co najmniej jeden parametr zgrzewania, tj. prąd zgrzewania, czas zgrzewania lub siłę docisku elektrody. Natomiast na podstawie modelu bilansu energetycznego wyznacza się przewidywane warunki procesu zgrzewania, tj.: średnią temperaturę, średnicę spoiny i jej przyrost, straty ciepła na podstawie których parametry zgrzewania są modyfikowane w czasie rzeczywistym, dla eliminacji ekspulsji.

Sposób sterowania procesem zgrzewania rezystancyjnego punktowego, prowadzony urządzeniem zgrzewającym o wysokiej częstotliwości (10kHz i wyższej) wyposażonym w układ sterujący, w którym w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego steruje się w czasie rzeczywistym ustawieniami parametrów przemiennych, ustalonych dla ukształtowania na płaszczyźnie styku między zgrzewanymi elementami jądra zgrzeiny przy stałej sile docisku F elektrod, i mierzy co najmniej prąd zgrzewania, napięcie zgrzewania

oraz czas trwania zgrzewania, a w układzie docisku elektrod ma czujnik siły docisku elektrod, który charakteryzuje się tym, że zmiany siły docisku F elektrod ustala się w układzie obliczeniowym analizatora 6 metodą różniczkowania dyskretnego w czasie nieprzekraczającym 0.1 ms, a dla wychodzącej poza wartość progową zmiany siły docisku F elektrod wstrzymuje wysterowanie przepływu prądu przez czas $t_p = (2+3) \cdot t_1 \cdot g < 300$ ms, gdzie: g - grubość zgrzewanych blach, t_1 - czas trwania pierwszego impulsu prądu, a dla drugiego impulsu prądu o wartości $I_2 = (0.65 \div 0.85) \cdot I_1$, czas t_2 trwania tego impulsu wynosi $t_2 = [(t_0 - t_1) + t_p/t_0] \cdot [(I_1/I_2)^2]$, gdzie: I_1 - wartość prądu pierwszego impulsu, g - grubość zgrzewanych blach, t_2 - czas trwania drugiego impulsu prądu, t_0 - czas trwania prądu zgrzewania technologii jedno impulsowej, t_p - czas przerwy pomiędzy impulsami, t_1 - czas trwania pierwszego impulsu prądu, natomiast energia cieplna doprowadzona do obszaru zgrzewania spełnia zależność $1.1 \cdot E_0 < E_1 + E_2 < 1.5 \cdot E_0$ gdzie: E_0 to energia dla parametrów technologii bez ekspulsji, z jednym impulsem prądu zgrzewania, E_1 to energia pierwszego impulsu prądu zgrzewania, E_2 to energia drugiego prądu zgrzewania, przy czym czas przerwy t_p i wartość drugiego impulsu prądu I_2 ustala układ obliczeniowy analizatora, a układ sterowania prądem zgrzewania wysterowuje sygnał drugiego impulsu prądu.

Sposób sterowania procesem zgrzewania według wynalazku zapewnia uzyskiwanie powtarzalnych oraz zgodnych z wymogami norm zgrzein, spełniających ponadto kryteria wytrzymałości mechanicznej. Wynalazek rozwiązuje problem ekspulsji w procesie zgrzewania rezystancyjnego, co poprawia bezpieczeństwo pracy, ma także wpływ na zwiększenie trwałości elektrod, ograniczenie wielkości wgniotu elektrod, poprawę jakości wykonywanych połączeń (w tym wytrzymałość) oraz estetykę złącza.

Sposób sterowania procesem zgrzewania według wynalazku został pokazany w przykładzie wykonania na rysunku, na którym fig. 1 przedstawia schemat blokowy zgrzewarki, fig. 2 przedstawia przebieg prądu zgrzewania w cyklu jednoimpulsowym bez ekspulsji. Fig. 3 przedstawia przebieg prądu zgrzewania w cyklu dwuimpulsowym dla przypadku wykrycia ekspulsji i zgrzewania z drugim impulsem prądu dla uzyskania nominalnej średnicy jądra.

Proces zgrzewania rezystancyjnego punktowego prowadzi się zgrzewarką inwertorową o częstotliwości 10 kHz i wyższej, pokazaną w przykładowym wykonaniu na fig. 1 w formie schematu blokowego. Zgrzewarka zawiera w swojej strukturze cztery typowe sekcje: przemiennik częstotliwości 1, transformator zgrzewarki wysokoprądowy 2, pro-

stownik wysokoprądowy 3 oraz elektrody 4. Pomiedzy obsadami elektrod 4 znajduje się tensometryczny czujnik 5 siły docisku elektrod o zakresie pomiarowym 2-20 kN, co umożliwi rejestrację sygnału napięciowego proporcjonalnego do mierzonej siły. Czujnik 5 siły docisku elektrod wyjściem sygnałowym jest podłączony do wejścia (siły docisku) analizatora 6, a wyjście analizatora podłączone jest do układu sterowania prądem zgrzewania 7, który steruje blokiem przemiennika częstotliwości 1. Układ sterowania prądem zgrzewania 7 steruje prądem zgrzewania zgrzewarki i stanowi go, np. mikrokontroler lub procesor sygnałowy wyposażony w wejścia analogowe i przetwornik analogowo-cyfrowy o szybkości próbkowania, co najmniej 100 kHz, umożliwia to detekcję zjawiska ekspulsji w początkowej jego fazie, która trwa max. 1 ms. Sterowanie realizowane jest w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego.

W procesie zgrzewania steruje się w czasie rzeczywistym ustawieniami parametrów przemiennych, w zależności od parametrów procesu zgrzewania ustalonych dla ukształtowania na płaszczyźnie styku między zgrzewanymi elementami jądra zgrzeiny. Po technologicznej próbie wyłuskiwania, jądro zgrzeiny uzyskane w tak prowadzonym procesie zgrzewania spełnia wymaganą normą średnicę, tj. $5\sqrt{g}$, gdzie g – jest grubością cieńszej blachy (jeżeli zgrzewane są blachy o różnej grubości). W procesie mierzy się co najmniej prąd zgrzewania i napięcie zgrzewania, siłę docisku elektrod oraz czas trwania zgrzewania. Z punktu widzenia dynamiki procesu, sygnał pochodzący z czujnika 5 siły docisku wykazuje się największą zmiennością w porównaniu do innych sygnałów pochodzących z procesu (prąd, napięcie). Występujące w procesie zmiany siły docisku F elektrod 4 ustala się w układzie obliczeniowym analizatora 6 metodą różniczkowania dyskretnego, w czasie nieprzekraczającym 0.1 ms, a dla wychodzącej poza wartość progową zmiany siły docisku F elektrod, co jest efektem ekspulsji, wstrzymuje wysterowanie przepływu prądu.

Wykrycie niekorzystnego zjawiska jakim jest ekspulsja ma miejsce w czasie, gdy jądro zgrzeiny nie osiągnęło nominalnej średnicy, i kolejnym etapem po wykryciu ekspulsji jest doprowadzenie do rozbudowy jądra.

Natomiast w przypadku wykrycia ekspulsji analizator 6 generuje i przesyła sygnał blokady do układu sterowania prądem zgrzewania 7, który z kolei wstrzymuje wysterowanie przepływu prądu zgrzewania.

Dalszy proces sterowania w takim przypadku jest dwuimpulsowy z dodatkowym czasem przerwy pomiędzy impulsami prądu.

Układ obliczeniowy analizatora 6 ustala czas przerwy i wartość drugiego impulsu prądu I_2 , a układ sterowania prądem zgrzewania 7, wysterowuje sygnał drugiego impulsu, by

uzyskać nominalną wartość jądra zgrzeiny, a parametry zależą od czasu w którym została wykryta ekspulsja.

Jak już opisano dla wychodzącej poza wartość progową zmiany siły docisku F elektrod, układ sterowania prądem zgrzewania I wstrzymuje wysterowanie przepływu prądu zgrzewania przez czas $t_p = (2+3) \cdot t_1 \cdot g < 300$ ms, gdzie: g - grubość zgrzewanych blach, t_1 - czas trwania pierwszego impulsu prądu.

Czas przerwy ma na celu schłodzenie obszaru złącza i zmniejszenie ciśnienia w ciekłym jądrze zgrzeiny, oddanie nadmiaru ciepła do materiału zgrzewanego i elektrod, dopasowanie się powierzchni łączonych.

Dla drugiego impulsu prądu I_2 ustala się wartość z zakresu 0.65 do 0.85 wartości prądu zgrzewania pierwszego impulsu I_1 , natomiast czas t_2 trwania tego impulsu ustala się według wzoru i wynosi $t_2 = [(t_0 - t_1) + t_p/t_0] \cdot [(I_1/I_2)^2]$,

gdzie I_1 - wartość prądu pierwszego impulsu, g - grubość zgrzewanych blach, t_2 - czas trwania drugiego impulsu prądu, t_0 - czas trwania prądu zgrzewania technologii jednoimpulsowej, t_p - czas przerwy pomiędzy impulsami, t_1 - czas trwania pierwszego impulsu prądu.

Natomiast energia cieplna doprowadzona do obszaru zgrzewania spełnia zależność $1.1 \cdot E_0 < E_1 + E_2 < 1.5 \cdot E_0$,

gdzie: E_0 to energia dla parametrów technologii bez ekspulsji z jednym impulsem prądu zgrzewania, E_1 to energia pierwszego impulsu prądu zgrzewania (technologia dwuimpulsowa), E_2 to energia drugiego impulsu prądu zgrzewania (technologia dwuimpulsowa) i jest tak ustalana, aby uzyskać złącze w warunkach maksymalnie zbliżonych do założeń technologii.

Instytut Spawalnictwa

DYREKTOR

 dr. inż. Adam Pietras