

**Andrzej MAJCHER, Andrzej GOSPODARCZYK,
Mirosław MROZEK, Jan PRZYBYLSKI**
Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Radom

SYSTEM STEROWANIA PROCESEM SPIEKANIA PROSZKÓW METODĄ IMPULSOWO-PLAZMOWĄ

Słowa kluczowe

System sterowania procesem, technologia spiekania proszków, metoda PPS, zasilacz impulsowy dużej mocy, ignitron.

Streszczenie

W artykule przedstawiono system sterowania nowatorskim procesem spiekania proszków metodą impulsowo-plazmową (PPS). Opracowano go z wykorzystaniem normy sterowania procesów wsadowych. Opisano model procesu, model proceduralny systemu sterowania oraz funkcje realizowane przez system, związane głównie z opracowanym specjalizowanym zasilaczem dużej mocy do ładowania kondensatorów. System zastosowano w urządzeniu technologicznym wdrożonym na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej.

Wprowadzenie

Spiekanie proszków metodą impulsowo-plazmową (PPS Pulse Plasma Sintering) zaliczane jest do grupy nowatorskich procesów określanych jako FAST (Field Assisted Sintering Techniques), wykorzystujących przy spiekaniu aktywność polem elektrycznym wytwarzanym przez przepływ zewnętrznego prądu elektrycznego [1]. W najprostszym przypadku jest to grzanie rezystancyjne przebiegiem stałym o niewielkim napięciu (5–40 V) i dużym natężeniu (do 25 kA) przy jednoczesnym nacisku na poddawany procesowi materiał. Istotną

różnicą występującą w innych metodach FAST jest stosowanie przebiegów impulsowych. W najbardziej rozpowszechnionej obecnie metodzie SPS (Spark Plasma Sintering) [2] są to impulsy stałoprądowe o natężeniu prądu do 8 kA, amplitudzie do 10 V i czasie trwania ok. 3 ms, formowane w paczki o zadawanej liczebności i odstępach czasowych między nimi [2, 3, 4]. W metodzie PPS, zwanej także EDC (Electrodischarge Compaction) [5], do inicjacji reakcji SHS (self-propagating high-temperature synthesis) wykorzystuje się wymuszenie elektryczne w postaci przebiegu oscylacyjnego o amplitudzie około 10 kV, prądzie około 100 kA i czasie trwania rzędu 200 ms. Główne problemy występujące w systemie sterowania takim procesem to:

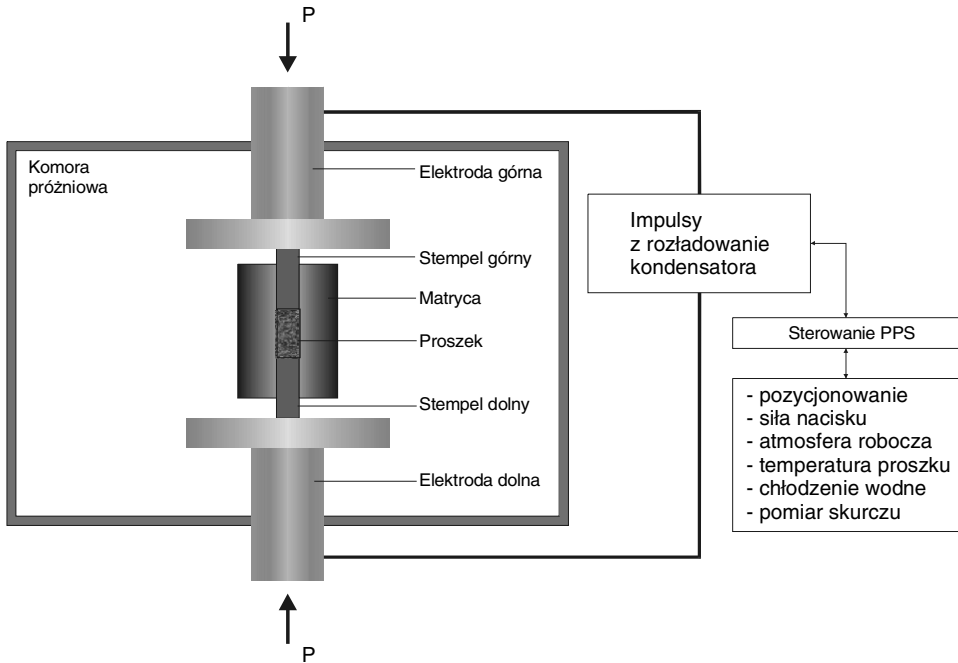
- konieczność zapewnienia ochrony elementów systemu przed silnymi zakłóceniami elektromagnetycznymi wywołanymi impulsowym przepływem prądu o dużej gęstości,
- konstrukcja zasilacza wysokonapięciowego dużej mocy, który musi dodatkowo sterować częstotliwością impulsów wymuszenia oraz układem iskiernika (ignitronu) – podzespołu przełączającego przebieg wymuszenia,
- implementacja procedur sterowania procesem w urządzeniu wykorzystywanym zarówno do celów badawczych, jak i produkcyjnych.

1. Model procesu

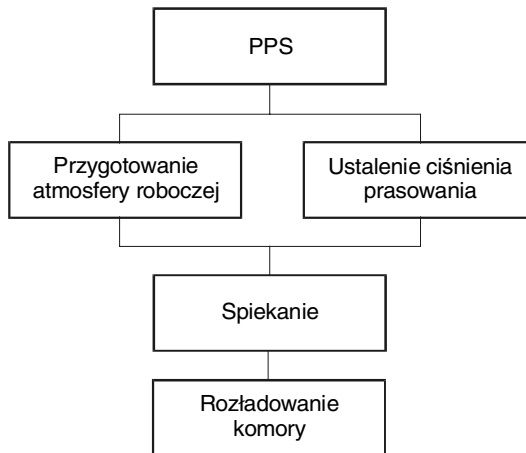
Silnoprądowe impulsy wymuszenia w metodzie PPS (rys.1) pochodzą z rozładowania baterii kondensatorów o pojemności około 200 μF . Wymuszenie to powoduje gwałtowne zwiększenie temperatury spiekane proszku, będące wynikiem wydzielania w syntezywanym materiale w czasie kilkuset mikrosekund energii do kilku kJ. Ten sposób nagrzewania z jednoczesnym prasowaniem ciśnieniem p pozwala na szybkie osiągnięcie temperatury zapłonu reakcji SHS, jednocześnie w całej objętości poddanego syntezie proszku [6, 7]. Nagrzewanie proszku następuje ciepłem Joule'a wydzielanym w czasie przepływu prądu przez konsolidowany proszek i wyładowania iskrowe (generacja plazmy) w porach między nimi.

System sterowania tego procesu opracowano wykorzystując normę sterowania procesów wsadowych [8]. Model procesu, zgodnie z tą normą, jest uporządkowanym, hierarchicznym zbiorem stadiów, operacji i działań. Dla procesu PPS wyróżniono cztery operacje: przygotowanie atmosfery roboczej, ustalenie ciśnienia prasowania, spiekanie, rozładowanie komory. Dla każdego stadium określono operacje i działania (rys. 2).

Przygotowanie atmosfery roboczej obejmuje uzyskanie założonego poziomu próżni (niska próżnia 1 Pa, wysoka próżnia 10^{-3} Pa) oraz opcjonalne wypełnienie komory jednym z dwóch gazów procesowych (H_2 , Ar).



Rys.1. Schematyczny układ procesu PPS



Rys. 2. Model procesu z dekompozycją na cztery operacje

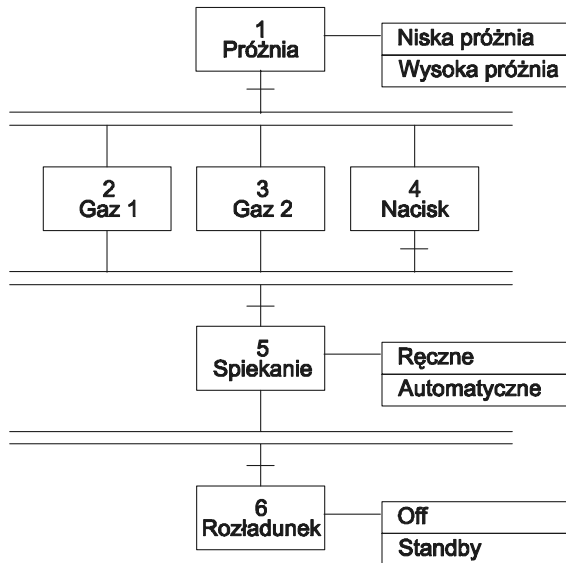
Ustalenie ciśnienia prasowania polega na przyłożeniu do stempli, w których umieszczona jest matryca, regulowanej w granicach do 100 kN, siły nacisku. W stadium spiekania przez proszek przepływają impulsy prądowe o param-

trach (amplituda, czas powtarzania, liczba) określonych przez operatora lub dobieranych automatycznie na podstawie temperatury spieku. Rozładowanie komory to ustalenie w niej ciśnienia atmosferycznego z opcjonalnym pozostawieniem pompy dyfuzyjnej w gotowości do przetwarzania kolejnego wsadu.

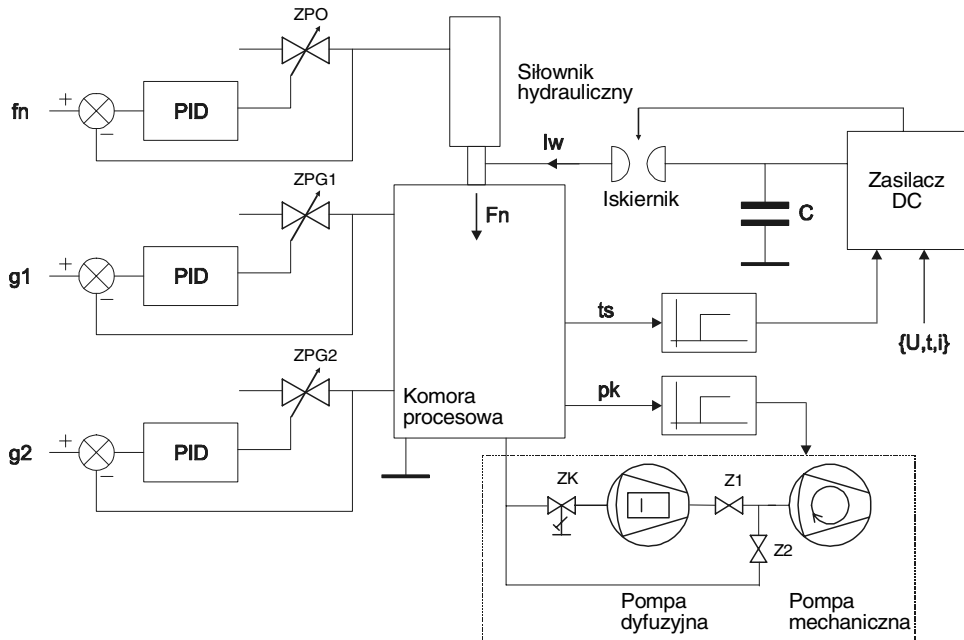
2. Model proceduralny systemu sterowania

Model proceduralny opisuje zarządzanie wyposażeniem procesowym prowadzące do wykonania zadań określonych w modelu procesu. Obejmuje on hierarchiczne zadania podzielone na procedury, procedury jednostek (w przypadku wieloetapowych, złożonych procesów), operacje i fazy. W modelu proceduralnym systemu sterowania procesem PPS, opracowanym z użyciem notacji grafu SFC (Sequential Function Charts), wyspecyfikowane operacje odpowiadają operacją modelu procesu. Każdą operację można dalej dzielić na fazy, które są bezpośrednio związane z zarządzaniem jednostkami wyposażenia (equipment module) będącymi elementami modelu fizycznego systemu, przedstawionego schematycznie na rys. 4.

Operacja przygotowania atmosfery roboczej w fazie 1 – uzyskiwania niskiej próżni wykonywana jest przez pompę mechaniczną. Natomiast w fazie wysokiej próżni dodatkowo włączana jest pompa dyfuzyjna. Decyduje o tym regulator dwustanowy, dla którego sygnałem wejściowym p_k jest ciśnienie



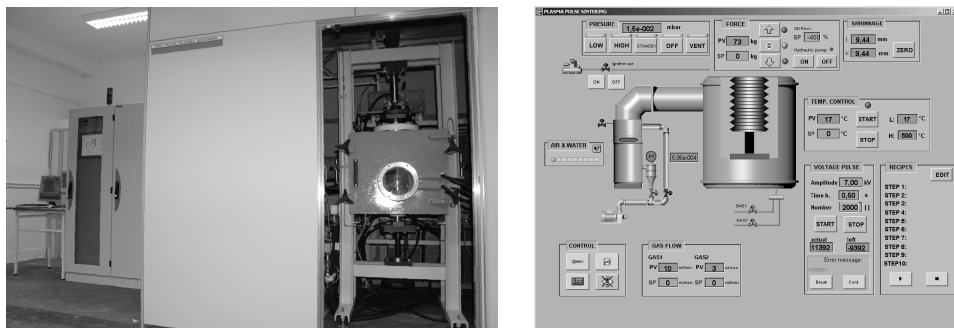
Rys. 3. Model proceduralny systemu sterowania wykorzystujący notację SFC



Rys. 4. Schematyczny model fizyczny systemu sterowania procesem PPS

w komorze procesowej. W rzeczywistym układzie mierzone jest również ciśnienie na wejściu pompy dyfuzyjnej, którego wartość zezwala na jej włączenie. Fazy 2 i 3 realizowane są z użyciem zaworów proporcjonalnych ZPG1 i ZPG2 oraz regulatorów PID. Operacja ustalenia ciśnienia prasowania zawiera jedną fazę – nacisk 4. Regulowane jest ciśnienie oleju dostarczanego do siłownika hydraulicznego. Zadawana wartość tego ciśnienia wyskalowana jest wyznaczonym eksperymentalnie wielomianem pierwszego stopnia, w wartościach siły nacisku f_n . Uzyskana dokładność regulacji jest lepsza niż 0,5%. Operacja spiekania realizowana jest w fazie 5. W przypadku pracy ręcznej parametry przebiegu I_w zadawane są przez operatora – $\{U, t, i\}$. Przy pracy automatycznej regulator dwustanowy ustala wartość t – odstępów czasowych pomiędzy impulsami przy stałym napięciu ładowania baterii kondensatorów $U = \text{const}$ i stałej liczbie impulsów $i = 1$.

Realizacja sprzętowa systemu została wykonana z wykorzystaniem sterownika PLC, komputerowego panelu operatorskiego z oprogramowaniem SCADA, zewnętrznego komputera PC, sieci Modbus RTU i Ethernet TCP/IP (rys. 5).



Rys. 5. Urządzenie do spiekania metodą PPS oraz główny ekran oprogramowania SCADA systemu sterowania procesem

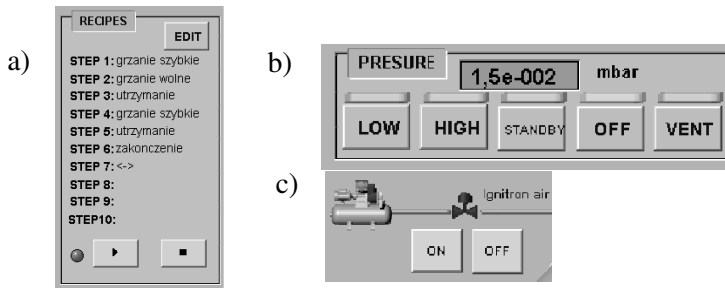
3. Funkcje systemu sterowania

Funkcje systemu sterowania procesem można zgrupować w następujących kategoriach [8]:

- zarządzanie przepisami technologicznymi (recipes),
- planowanie produkcji,
- zarządzanie informacjami produkcyjnymi,
- zarządzanie procesem,
- nadzór nad jednostką procesową,
- sterowanie procesem,
- ochrona personelu i środowiska.

Urządzenie technologiczne do procesu PPS przeznaczone jest do prac badawczych oraz małoseryjnej produkcji spieków – głównie targetów do rozpylania plazmowego, nowych materiałów typu diament-miedź na radiatory ciepłne, elementów narzędzi do obróbki wyrobów drewnopochodnych, elementów z nanoproszków. Stąd w opracowanym systemie udostępniono funkcje związane z zarządzaniem produkcją i znacząco rozbudowano funkcje związane z celami badawczymi.

Operator procesu ma możliwość wyboru trybu obsługi urządzenia (rys. 6) – od ręcznego sterowania poszczególnymi układami wykonawczymi, poprzez automatyczne wykonywanie faz procesu, do sterowania proceduralnego, w którym automatycznie wykonywane są zaprogramowane wcześniej przepisy technologiczne. Wszystkie parametry procesu przedstawiane są na wykresach oraz zapisywane w zbiorach o typowych formatach. Oprócz sygnałów wymaganych w systemie sterowania, wprowadzono dodatkowo pomiar skurczu spieku oraz obserwację przebiegu procesu kamerą CCD.



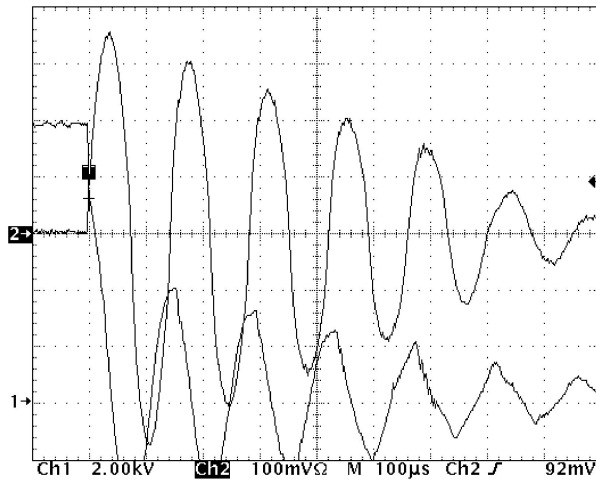
Rys. 6. Przykłady pracy półautomatycznej – sterowanie proceduralne (a), pracy automatycznej – sterowanie podstawowe (b), pracy ręcznej – sterowanie podstawowe (c)

Głównym modułem systemu, gdzie realizowane są funkcje związane ze sterowaniem procesem, jest zasilacz stałoprądowy o mocy około 60 kW. Opracowano dedykowany zasilacz [9,10], umożliwiający ładowanie baterii kondensatorów o pojemności $C = 200 \mu\text{F}$ do napięcia $U = 12 \text{ kV}$ w czasie $t = 0,5 \text{ s}$. Wymaga to wartości prądu ładowania $I_l = 4,8 \text{ A}$ ($C = I_l t/U$). Wartość zgromadzonej w baterii kondensatorów energii wynosi w takich warunkach $W = 14,4 \text{ kJ}$ ($W = CU^2/2$). Daje to w torze siekanego proszku przebieg o maksymalnej amplitudzie prądu do około 100 kA i kształcie przedstawionym na rys. 7.

W obwodzie wyjściowym zasilacza zastosowano mostek tranzystorów typu IGBT sterowany mikroprocesorowo oraz cztery transformatory impulsowe. Napięcie z uzwojeń wtórnych tych transformatorów prostowane jest w prostowniku mostkowym ochranianym przez sieć odciążającą typu RDC i filtrowane w filtrze typu LC. Moduły prostownikowe łączone są kaskadowo dla uzyskania napięcia nominalnego 12 kV. Ze względu na specyficzne warunki funkcjonowania zasilacza – wysokie napięcia i silne pole elektromagnetyczne – wybudowano do niego szereg zabezpieczeń układowych. Należą do nich:

- detektor stanu wewnętrznych rezystorów doładowczych,
- układ zabezpieczenia przed niewłaściwą wartością napięć zasilających urządzeń,
- układ ochrony przed zwarcie w obwodzie dużej mocy zasilacza,
- detektor temperatury radiatora z elementami dużej mocy,
- układ monitorowania stopnia sterującego tranzystorami IGBT,
- układ monitorowania napięcia zasilającego bloki sterownicze,
- układ ochrony przed zwarcie wyjścia zasilacza.

Zasilacz wyposażono również w układ pomiaru napięcia baterii kondensatorów, umożliwiającą ich synchroniczne ładowanie i rozładowanie. Układem wykonawczym jest tu iskiernik (ignitron), składający się z dwóch miedzianych

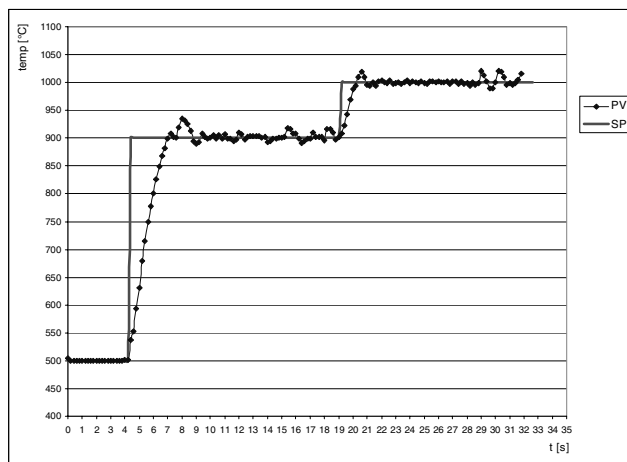


Rys. 7. Przebieg elektryczny w torze spiekane go proszku kanał 1 – napięcie rozładowania (2 kV/działkę), kanał 2 – prąd rozładowania (1 kA/działkę, mierzony w jednym z ośmiu równoległych przewodów łączących tor spiekania z masą baterii kondensatorów)

elektrod głównych o regulowanej odległości pomiędzy nimi oraz wolframowej elektrody wyzwalającej. Wykonano moduł generacji impulsów wysokonapięciowych (ok. 25 kV) powodujących powstanie łuku elektrycznego pomiędzy elektrodą wyzwalającą i jedną z elektrod głównych [11,12]. Opracowano nową metodę wyzwalania ignitronu, która zapewnia:

- niską wrażliwość na odległość pomiędzy elektrodami głównymi, co eliminuje konieczność regulacji ignitronu dla różnych wartości napięcia ładowania baterii kondensatorów,
- eliminację zjawiska samozapłonów (rozładowania baterii kondensatorów przy nieosiągnięciu ustawionego napięcia ładowania),
- eliminację zjawiska braku wyzwolenia ignitronu przy zbyt dużej odległości pomiędzy elektrodami głównymi.

Jednymi z najistotniejszych dla sterowanego procesu funkcji są zabezpieczenia przed silnym impulsowym polem elektromagnetycznym oraz wysokim napięciem. Każdy układ pomiarowy systemu niewłaściwie umieszczony w pobliżu toru przepływu prądu I_w ulega uszkodzeniu lub w najlepszym przypadku pomiar obarczony jest dużymi błędami przypadkowymi spowodowanymi wysokim poziomem zakłóceń. Opracowano układy ekranowania, filtracji napięć zasilania, izolacji galwanicznej sygnałów pomiarowych, izolacji wysokonapięciowej, które pozwoliły na właściwy pomiar parametrów procesu. Układy te służą także do ochrony części cyfrowej systemu oraz ochrony personelu i środowiska.



Rys. 8. Przebieg dwupołożeniowej regulacji temperatury pieku

Podsumowanie

Badania eksploatacyjne przeprowadzone na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej, gdzie wdrożono urządzenie technologiczne z opracowanym system sterowania, potwierdziły poprawność jego funkcjonowania, w szczególności w zakresie zastosowanych metod regulacji i ich odporności na zakłócenia. Użycie normatywnych zasad sterowania procesów wsadowych wydatnie ułatwia współpracę pomiędzy technologiem i automatykiem w trakcie projektowania systemu oraz późniejszą obsługę urządzenia. System sterowania procesem PPS jest jedynym takim rozwiązaniem w kraju i jednym z nielicznych na świecie.

Praca naukowa finansowana ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego, wykonana w ramach realizacji Programu Wieloletniego pn. „Doskonalenie systemów rozwoju innowacyjności w produkcji i eksploatacji w latach 2004–2008”.

Bibliografia

1. Groza J.R., Zavaliangos A.: Nanostructured bulk solids by field activated sintering. *Rev. Adv. Mater. Sci.*, 5 (2003), 24–33.
2. Chen W., Anselmi-Tamburini U., Garay J.E., Groza J.R., Munir Z.A.: Fundamental investigations on spark sintering/synthesis process. *Material Sciences and Engineering A* 394 (2005), 132–138.
3. Mamedov V.: Spark Plasma sintering as advanced PM sintering method. *Powder Metallurgy* 2002, vol. 45, 4, 322–328.
4. SCM Spark Plasma Sintering System Linie. www.shi.co.jp

5. Sethuraman A.R., Reucroft P.J., De Angelis R.J., Kim D.K., Okazaki K.: Alloy source synthesis for vapor deposition by electrodischarge compaction and analysis of Ni-Co alloy films deposited on silicon. *J. Vac. Sci. Technol. A* 8 (3) 1990, 2255–2257.
6. Michalski A., Jaroszewicz J., Rosiński M.: The synthesis of NiAl using the Pulse Plasma Method with the Participation of the SHS Reaction. *International Journal of Self-Propagation High-Temperature. Synthesis* 12 (2003), 237–246.
7. Michalski A., Rosiński M., Jaroszewicz J., Oleszak D.: Spiekanie nanokryształicznych proszków silnopiędowymi impulsami. *Archiwum nauki o materiałach* 4 (2003), 547–560.
8. ANSI/ISA-S88.01-1995 Batch Control, Part 1: Models and Terminology (1995). PN-EN 61512-1:2002(U) Regulacja procesów wsadowych. Część 1: Modele i terminologia.
9. Majcher A., Gospodarczyk A., Mrozek M., Przybylski J.: Modułowe systemy sterowania i zasilania dla plazmowych procesów inżynierii materiałowej. *Problemy Eksploatacji* 2003, nr 3, 189–197.
10. Majcher A., Gospodarczyk A., Mrozek M., Przybylski J.: Podstawowe moduły złożonych systemów sterowania plazmowych procesów inżynierii materiałowej. *Problemy Eksploatacji* 3/2004.
11. Majcher A., Gospodarczyk A., Mrozek M.: Metoda unipolarnego zasilania impulsowego akceleratora hybrydowego. *Problemy Eksploatacji* 2/2004.
12. Majcher A., Gospodarczyk A., Mrozek M., Przybylski J.: Układ inicjacji próżniowego wyładowania łukowego. *Problemy Eksploatacji* 4/2004, 53–61.

Recenzent:
Marian NOGA

Pulse-plasma sintering process control system

Key words

Process control system, sintering technology, PPS method, High power pulse supply, ignitron.

Summary

The paper presents a control system for innovative pulse plasma sintering process (PPS). It was designed on the basis of the batch control standard. The process model, procedural model of control system, system functions mainly connected with its own designed dedicated high power supply for capacitors load was described. This control system was put into practice in a technological apparatus made for the Materials Engineering Faculty of Warsaw Technical University.