12/2

Archives of Foundry,
Year 2001, Volume 1, № 1 (2/2)
Archiwum Odlewnictwa,
Rok 2001, Rocznik 1, Nr 1 (2/2)
PAN – Katowice PL ISSN 1642-5308

PORÓWNANIE ELEKTRYCZNYCH METOD CIEPLNEGO AKTYWOWANIA CZĄSTEK ZBROJĄCYCH W ODLEWANYCH MATERIAŁACH KOMPOZYTOWYCH

J. GAWROŃSKI[1], M. CHOLEWA[2]
Katedra Odlewnictwa, Wydział Mechaniczny Technologiczny
Politechnika Śląska,
ul. Towarowa 7,44-100 Gliwice

STRESZCZENIE:

Istotą opracowania jest wykorzystanie rzeczywistej, elektrycznej oporności zbrojenia do nagrzewania w celu poprawy warunków jego zwilżania. Dążeniem jest zmniejszenie różnic temperatur komponentów na powierzchni kontaktu dla skrócenia czasu mechanicznego mieszania i zmniejszenia jego intensywności. Proponowane techniki służą i intensyfikowaniu zjawisk powierzchniowych - dokładnie w centrum zachodzących procesów. Mogą stanowić uzupełnienie przemysłowej metody pneumatycznego wprowadzania chemicznie aktywowanych cząstek zbrojących [1]. W prezentowanym opracowaniu nagrzewanie zbrojenia następuje przez wykorzystanie ciepła Joule'a-Lenza przy uwzględnieniu elektrycznych cech zbrojenia. Porównano metody nagrzewania indukcyjnego i bezpośredniego tzw. „naboju zbrojenia" będącego walcową próbką o stałej objętości poddaną działaniu prądu elektrycznego.

Keywords: composite, wetting, forcement, electrical heating

1. EFEKTY CIEPLNE ZWIĄZANE Z PRZEPŁYWEM PRĄDU ZMIENNEGO PRZEZ IMPEDANCJĘ NABOJU ZBROJENIA

Jedną z pożądanych właściwości zbrojenia jest zbliżone do osnowy przewodnictwo cieplne - co pozwoliłoby na właściwy przebieg procesu tworzenia i krzepnięcia kompozytu. Wśród kompozytów o korzystnych właściwościach

[1] *prof. zw. dr inż., sekrmt3@zeus.polsl.gliwice.pl*
[2] *dr inż., sekrmt3@zeus.polsl.gliwice.pl*

trybologicznych cząstki zbrojące wykazujące przewodnictwo elektryczne stanowią niewielką ich część. Głównymi reprezentantami najczęściej stosowanych są karborund (SiC) i grafit (C_{gr}). Materiały powyższe wykazują pożądane przewodnictwo elektryczne: śladowe SiC oraz wysokie C_{gr}, a ponadto, posiadają odmienny charakter przewodnictwa, typowy dla metali i półprzewodników. Wyraża się to diametralnie różnymi charakterystykami rezystancji w funkcji rosnącej temperatury.

Idea, która przyświeca prezentowanym technikom, polega na wykorzystaniu przewodnictwa elektrycznego dyspersyjnych cząstek zbrojących do ich nagrzewania podczas tworzenia kompozytu za pomocą przepływającego prądu elektrycznego. Cząstki aktywowane chemicznie przed wprowadzeniem do ciekłej, metalicznej osnowy umieszczano w cylindrycznym, ceramicznym pojemniku po czym wykorzystując rezystancję rzeczywistą nagrzewano za pomocą przepływu prądu zmiennego lub za pomocą prądów wirowych indukowanych w cząstkach tworzących wtórny obwód indukcyjnego pola elektromagnetycznego. Istnieje możliwość łatwej regulacji parametrami nagrzewania: temperaturą, intensywnością nagrzewania, i rozłożeniem ciepła na powierzchni zbrojenia poprzez regulację częstotliwością, natężeniem i napięciem prądu. Bezpośrednio po nagrzaniu lub nawet w trakcie nagrzewnia można wprowadzać cząstki pod lustro ciekłego metalu osnowy. Taki sposób pozwala zlikwidować straty ciepła cząstek przy ich osadzaniu w osnowie oraz zminimalizować ilość gazów wprowadzanych wraz z cząstkami do ciekłej osnowy. Przede wszystkim ułatwia zachodzenie i intensyfikuje pożądane zjawiska powierzchniowe unikając jednocześnie szoków termicznych w materiałach zbrojących o małym przewodnictwie cieplnym, co często prowadzi do znacznych naprężeń cieplnych w cząstkach powodując w konsekwencji mikropęknięcia i fragmentację wprowadzanego zbrojenia.

Poprawność połączenia zbrojenia z osnową, jego struktura i warunki krzepnięcia kompozytu zależą miedzy innymi od parametrów kontaktu komponentów [2÷4] - tj.: temperatury, czasu, wielkości sumarycznej powierzchni, udziału objętościowego, gęstości masy i ich czystości. Podstawowym problemem jest identyfikacja i sterowanie ilością i rodzajem faz strefy przejścia oraz ich rozłożeniem. O ile stosunkowo łatwo reguluje i modyfikuje się kąty zwilżania oraz energie powierzchniowe rozdziału faz o tyle możliwości dynamicznego oddziaływania w procesie zwilżania daje prawie wyłącznie zmiana ciśnienia.

Wysoka temperatura ułatwiająca zwilżanie, jako alternatywa łatwo zmienianego ciśnienia, powinna być koncentrowana na granicy kontaktu komponentów przy jednoczesnej możliwości regulowania nią, co do wartości i czasu jej oddziaływania.

Ilość ciepła generowanego w cząstkach zbrojenia zależy w kwadracie od natężenia płynącego prądu, zatem przekrój poprzeczny i długość tzw. „naboju zbrojenia" ma wraz z przyłożonym napięciem zasilania wpływ na wielkość prądu poprzez impedancję naboju. Zmienny prąd daje możliwość przestrzennego kształtowania obszarów generowania ciepła dzięki wykorzystaniu zjawiska naskórkowości. W przypadku prądów o wysokiej częstotliwości praktycznie cały prąd płynie w warstwie przypowierzchniowej. Oporność indukcyjna wewnątrz przewodnika

rośnie wraz ze wzrostem częstotliwości prądu. Przy zasilaniu obwodu napięciem $u = U_m \sin\alpha$ w układzie płynie prąd:

$$i = I_m \sin(\alpha - \varphi) \quad \text{[A]} \tag{1}$$

Moc chwilowa w obwodzie:

$$p = ui = U_m I_m \sin\alpha \sin(\alpha - \varphi) = UI\cos\varphi - UI\cos(2\alpha - \varphi) \quad \text{[W]} \tag{2}$$

składa się z członu stałego $UI\cos\varphi$ oraz przebiegu okresowo zmiennego o podwójnej pulsacji 2α .Moc czynna

$$P = UI\cos\varphi \quad \text{[W]} \tag{3}$$

gdzie: prąd czynny:

$$I_c = I\cos\varphi \quad \text{[A]} \tag{4}$$

Dzięki indukcji magnetycznej oraz zjawisku naskórkowości następuje nagrzewanie naboju, gdzie cząstki stanowią źródło ciepła. Szybkość i skuteczność nagrzewania zależy od właściwości cząstek, które powinny być przynajmniej paramagnetyczne. Wówczas głębokość wnikania prądu określa się jako:

$$\delta = \frac{0{,}05}{\pi}\sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} \quad \text{[mm], [5]} \tag{5}$$

gdzie: ρ, μ, f to odpowiednio rezystywność, przenikalność magnetyczna cząstek oraz częstotliwość zasilającego prądu.

Zależność wyraża głębokość wnikania zastępczego prądu stałego i zdefiniowano ją jako głębokość, przy której gęstość prądu wynosi 36,7% [5] jego natężenia na powierzchni cząstek. W odniesieniu do cząstek wykazujących oporność elektryczną typową dla izolatorów oraz paramagnetyczne lub też diamagnetyczne właściwości konieczne jest wprowadzenie do objętości zbrojenia pewnej ilości materiału poprawiającego efekt cieplny. Najlepiej aby dodatkiem takim był materiał pożądany w końcowym produkcie jakim jest odlew kompozytowy. Mógłby być to zatem: granulat stopu osnowy, dodatków stopowych bądź kolejnego dodatku zbrojącego np. grafitu. Rozpatrzono dwie techniki nagrzewania:

- nagrzewanie wykorzystujące bezpośredni przepływ prądu przez „nabój zbrojenia”
- nagrzewanie indukcyjne poprzez indukowanie w objętości „naboju zbrojenia” wtórnych prądów wirowych wywołujących efekt cieplny

Zaletą elektrycznego aktywowania mieszanin tworzących „nabój zbrojenia” jest możliwość nagrzewania także cząstek nie przewodzących i diamagnetycznych i/lub posiadających powłoki technologiczne ułatwiające proces zwilżania w postaci krzemianów, azotków, tlenków itp., które nie posiadają pożądanych własności elektromagnetycznych.

2. PRZEPROWADZONE BADANIA

Do badań wytypowano cząstki węglika krzemu o ziarnistości z=71 [μm] i module morfologicznym M_m=0,015 [μm^{-1}] [6] wyżarzone w temperaturze 425 ^{0}C w czasie trzech godzin w atmosferze powietrza. Preparowano porcje o masie 500 g. Cząstki po prażeniu były poddawane chemicznemu aktywowaniu powierzchni za pomocą wodnych roztworów związków boru i sodu. Wytworzono materiał stanowiący główny składnik „naboju zbrojenia", zawierający wymagane względami technologicznymi, nieprzewodzące prądu powłoki na powierzchni cząstek zbrojenia (SiO_2 i aktywacji chemicznej). Dla uzyskania pożądanej przewodności elektromagnetycznej cząstki preparowanego węglika krzemu mieszano z granulatem stopu osnowy. I jak wykazały przeprowadzone próby dopiero przy stosunku wagowym stopu aluminium do zbrojenia w naboju k=0,77 następowało bezpośrednie przewodzenie prądu i generowanie ciepła w objętości naboju

$$k = \frac{Al}{SiC}\Big|_{wag} = \frac{217}{283} = 0{,}77 \qquad (6)$$

gdzie:
Al – masa granulatu aluminiowego stopu osnowy,
SiC – masa cząstek zbrojenia

Wszystkie oczekiwane efekty cieplne pojawiły się dopiero przy zawartościach nośnika elektryczno-magnetycznego porównywalnych do ilości cząstek zbrojenia.

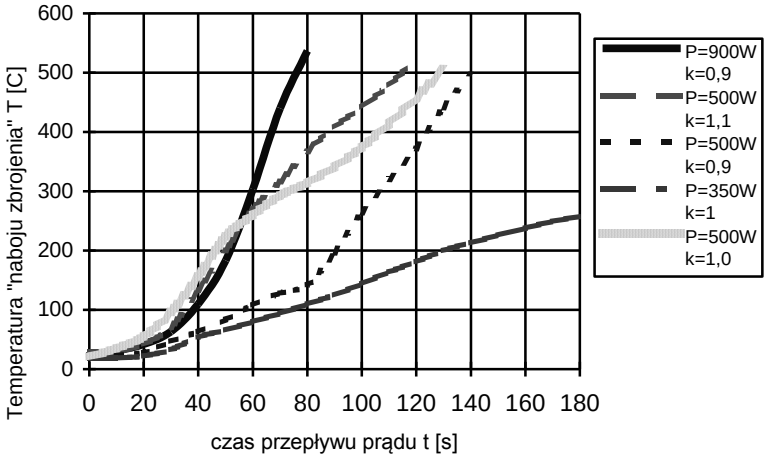
Masa „naboju zbrojenia" w kolejnych próbach była zbliżona do wartości 120 g. Podstawowym wymogiem z punktu widzenia zachowania tych samych warunków elektrycznych była geometria naboju wpływająca bezpośrednio na impedancję. Mieszanina stanowiąca nabój tworzyła opornik o wymiarach: ϕ30x150 mm umieszczony w korundowej tulei o grubości ścianki g=6 mm z centralnie umieszczoną termoparą. Tak przygotowana próbka była poddawana nagrzewaniu przez przepływ prądu elektrycznego lub przez indukowanie w jej wnętrzu prądów wirowych.

W pierwszym przypadku źródłem prądu był sieciowy regulowany transformator o następujących danych znamionowych: U_2=20÷100 V, I_2=0÷60 A, P_1=6,6 kVA, η=0,76, cosφ=0,58. Podczas kolejnych prób rejestrowano napięcie, prąd, temperaturę i czas nagrzewania. W drugim przypadku wykorzystano układ zasilania pieca indukcyjnego średniej częstotliwości o mocy znamionowej 10 kW zasilającego cewkę o długości 100 mm, średnicy wewnętrznej ϕ=50 mm i liczbie zwojów n=6 zwiniętej z rurki miedzianej o średnicy ϕ_{zew}=10 mm. Podczas prób rejestrowano temperaturę w funkcji czasu, przy stałej mocy P=5 kW.

3. ANALIZA UZYSKANYCH WYNIKÓW

Jako kryterium poprawności nagrzewania „naboju zbrojenia" przyjęto możliwie najkrótszy czas nagrzewania do temperatury T_{min}= 500 ^{o} C. Podczas indukcyjnego nagrzewania uzyskiwano wymagane temperatury po czasach zbliżonych

do 20 min. W porównaniu do bezpośredniego nagrzewania dało to zbyt długie czasy nagrzewania i zbyt wysokie zużycie energii. Poniżej, na rys. 1. zaprezentowano wybrane wyniki bezpośredniego nagrzewania rezystancyjnego próbek o stosunku zbrojenia do wypełnienia metalicznego w naboju zbliżonym do jedności (k=1)



Rys. 1. Zależność temperatury „naboju zbrojenia" w funkcji czasu przy zmiennych udziałach metalicznego wypełnienia ułatwiającego przewodzenie prądu i przy zmiennych mocach prądu zasilającego

Fig. 1. Time-dependent temperature of „reinforcement charge" in depending on changeable part of current conduct helping metallic filling and changeable force of supply current.

Z przedstawionej zależności wynika, że efektywny sposób nagrzewania cząstek zbrojenia nie wykazujących przewodnictwa elektrycznego wymaga zastosowania źródeł prądu o mocy rzędu tysiąca watów. Przy współczynniku wypełnienia k=1 i mocy P≥500 W po czasie 60 s następuje nagrzanie naboju do temperatury ok. 300 ^{o}C. Czas niezbędny do osiągnięcia temperatury zbliżonej do 500 ^{o}C wynosi t≤140 s dla współczynnika k≅1 intensywność nagrzewania wzrasta ze wzrostem wartości k. Przy blisko dwukrotnym wzroście mocy (przykładowo do P=900W) następuje wyraźne skrócenie czasu nagrzewania do wartości t=80 s

4. UWAGI KOŃCOWE I WNIOSKI

1. Przeprowadzenie prób wykazało praktyczną wyższość bezpośredniego grzania „naboju zbrojenia" prądem zmiennym, przepuszczanym wzdłuż walcowej próbki rezystora, będącego „nabojem zbrojenia";
2. Uzyskano wówczas temperaturę 500 ^{o}C w czasie kilkudziesięciu sekund, przy niewielkim zużyciu energii - rzędu 0,02 kWh. - co stanowi właściwe wartości dla potrzeb przyszłych, przemysłowych aplikacji;

3. Potwierdzono łatwość regulacji parametrów elektrycznych kształtujących termiczne właściwości cząstek zbrojących.

W rozważanym przypadku czynnikami istotnie ograniczającymi skuteczność nagrzewania były:

- zbyt mała moc wytworzona przez przepływający prąd, która poniżej P=500 W nie daje właściwego nagrzania zbrojenia
- zbyt mały stopień wypełnienia materiałem przewodzącym, który poniżej k=0,77 także nie daje oczekiwanego skutku cieplnego

LITERATURA:

[1] Gawroński J., Cholewa M., Szajnar J., Sprawozdanie końcowe pt. „*Wytwarzanie odlewów kompozytowych metodą pneumatycznego wprowadzania i mieszania cząstek ceramicznych”*, termin zakończenia - 01.03.1999 nr proj. 7 T08B 031 12. Finansowanie: KBN

[2] Jin J.: *Solidification of SiC particulate reinforced Al-Si alloy composites*, Fab. Particul. Reinforced Metal Compos.: Proc. Int. Conf. , Montreal, 1990, s. 563-570

[3] Mortensen A.: *Solidification processing of metal matrix composites*, Int. Mter. Rev., 1992, t. 37, nr 3, s. 101-128

[4] Wu Y.: *Solidification behaviour of AlSi-SiC Mmcs, During wedge-moult casting,* Acta Metall. Mater., t. 42, nr 3, 1994, s. 825-837

[5] Simpson P.G.: *Grzanie indukcyjne* WNT, Warszawa 1984

[6] Cholewa M.**:** *Właściwości makrostruktury osnowy kompozytu zbrojonego cząstkami dyspersyjnymi o odmiennych cechach geometryczno-cieplnych* Intern. Scientific Conf." Achievements in the Mechanical and Material Engineering", Materials Science Committee of the Polish Academy of Science, The faculty of Mechanical Engineering of the Silesian Technical University. Gliwice 1999,

THE COMPARISON OF ELECTRICAL METHODS FOR THERMAL ACTIVATION CAST COMPOSITE MATERIALS REINFORCED BY PARTICLES

SUMMARY

The essence of the study is in accordance with the Joule-Lenz principle, using of electric resistance of reinforcement for its heating in order to improve of wetting effects. Aspiration is to shorten mechanical mixing time and to decrease its intensity. There have been compared the methods of induction and direct heating of cylindrical sample with constant volume and overall dimensions. The proposed techniques are designed for intensification of surface phenomena strictly in the center of processes.

Recenzował Prof. Stanisław Jura