

Józef Gawroński¹, Mirosław Cholewa², Krzysztof Janerka³
 Politechnika Śląska, Katedra Odlewnictwa, ul. Towarowa 7, 44-100 Gliwice

REZYSTANCYJNO-TERMICZNE AKTYWOWANIE DYSPERSYJNEGO ZBROJENIA W ODLEWANYCH MATERIAŁACH KOMPOZYTOWYCH

Istotą problemu jest wykorzystanie elektrycznej impedancji zbrojenia do jego nagrzewania w celu polepszenia warunków zwilżania. Celem jest udoskonalenie technik wprowadzania dyspersyjnych komponentów zbrojących. Optymalizacja temperatur powierzchni kontaktu powinna zmniejszyć wielkość niezbędnych naprężeń ścinających, występujących w ciekłym metalu podczas mechanicznego mieszania komponentów. Pozwoli to na skrócenie czasu mieszania i zmniejszenie jego intensywności. Wśród technologii stosowanych w wytwarzaniu kompozytów dyspersyjnych szerokie zastosowanie posiadają techniki wykorzystujące powierzchnię, fizykochemiczną aktywację zbrojenia. Proponowana technologia służy inicjowaniu i intensyfikowaniu zjawisk powierzchniowych - dokładnie w centrum zachodzących procesów. Technologia może stanowić uzupełnienie przemysłowej techniki pneumatycznego wprowadzania cząstek zbrojących, których wykorzystanie jest szczególnie uzasadnione dla kształtowych odlewów kompozytowych. Do tej pory jednym z głównych elementów procesu wprowadzania cząstek było ich nagrzewanie w lancy. Nagrzewanie następowało w sposób pośredni od ścian lancy z jednoczesnym nagrzewaniem gazu nośnego. Według prezentowanej technologii, nagrzewanie zbrojenia powinno następować przez wykorzystanie ciepła Joule'a-Lenza z uwzględnieniem elektrycznych cech zbrojenia. W opracowaniu porównano metody nagrzewania indukcyjnego i bezpośredniego tzw. „naboju zbrojenia”, będącego walcową próbką o stałej objętości, poddaną działaniu prądu elektrycznego.

RESISTANCE AND THERMAL ACTIVATING OF DISPERSION REINFORCEMENT IN CAST COMPOSITE MATERIALS

The essential of problem is using electrical impedance of reinforcement to heating it in order to improve wetting conditions. The aim is improvement of technique injection of dispersion reinforcement component. The optimization of contact surface temperatures should to decrease value of indispensable shearing stresses, which occurs in liquid metal during mechanical mixing of components. This permits to shorten mixing time and to decrease it intensity. Among technologies using to producing dispersion composites the wide application having techniques which use physical and chemical surface activation of reinforcement. The proposed technology permits to initiate and intensify surface phenomena exactly in center of proceeding processes. Technology may present completion of industrial technique pneumatic injection of reinforcement particles, which using is especially justified for form composites casting. Until now one of general elements of particles injection process was a heating its in lance. The heating followed in indirect way from lance wall with heating carrier gas. According to presented technology the heating of reinforcement should follow by using Joule-Lenz heat with taking into account electrical characteristic of reinforcement. In work was compared an induction heating method and direct heating so-called „reinforcement cartridge” which is expose a cylindrical specimen with constant volume to electrical power action. Figure 1 shows requirements parameters process of heating and resistance method of reinforcement activation.

EFEKTY CIEPLNE ZWIĄZANE Z PRZEPLÝWEM PRĄDU ZMIENNEGO PRZEZ IMPEDANCJĘ NABOJU ZBROJENIA

Jednym z pożądaných wymogów w odniesieniu do zbrojenia jest zbliżone do osnowy przewodnictwo cieplne, co pozwoliłoby na stabilny przebieg procesu tworzenia i krzepnięcia kompozytu. Niestety takie przypadki są rzadkie. Wśród kompozytów o korzystnych właściwościach trybologicznych cząstki zbrojące wykazujące przewodnictwo elektryczne nie zajmują szczególnego miejsca. Głównymi reprezentantami obu grup, najczęściej stosowanych, są karborund (SiC) i grafit (C_{gr}). Materiały powyższe wykazują pożądanę przewodność elektryczną: śladowe SiC oraz wysokie C_{gr}, a ponadto posiadają odmienny charakter typowy dla

metaloidów i półprzewodników. Wyraża się to diametralnie różnymi charakterystykami rezystancji w funkcji rosnącej temperatury.

Idea, która przyświeca prezentowanej technologii, polega na wykorzystaniu przewodnictwa elektrycznego dyspersyjnych cząstek zbrojących do ich nagrzewania podczas tworzenia kompozytu za pomocą przepływającego prądu elektrycznego. Cząstki przed wprowadzeniem do ciekłej, metalicznej osnowy umieszczano w cylindrycznym, ceramicznym pojemniku, a następnie, wykorzystując rezystancję rzeczywistą, nagrzewano za pomocą przepływu prądu zmiennego lub za pomocą

¹ prof. zw. dr inż., ² dr inż., ³ dr inż.

prądów wirowych indukowanych w cząstkach tworzących wtórny obwód indukcyjnego oddziaływania pola elektromagnetycznego. Istnieje możliwość regulacji parametrami nagrzewania: temperaturą, intensywnością nagrzewania i rozłożeniem ciepła na powierzchni zbrojenia poprzez regulację częstotliwością, natężeniem i napięciem prądu. Bezpośrednio po nagraniu lub nawet w trakcie nagrzewania można wprowadzać cząstki pod lustro ciekłego metalu osnowy. Taki sposób pozwala zlikwidować straty ciepła cząstek przed ich osadzaniem 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 projektowanego połączenia zbrojenia z osnową, jego struktura i warunki krzepnięcia [2-4] zależą m.in. od parametrów ich kontaktu, tj.: temperatury, czasu, wielkości sumarycznej powierzchni, udziału objętościowego, gęstości masy komponentów i ich czystości. Na skutek fizycznych oddziaływań pierwotnych tworzone są warunki oddziaływań wtórnych o naturze chemicznej często utrudniających pełne połączenie. 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 powinna być zatem lokalizowana na granicy kontaktu komponentów przy jednoczesnej możliwości regulowania nią co do wartości i czasu jej oddziaływania. Materiały zbrojące charakteryzujące się nawet niewielkim przewodnictwem elektrycznym nagrzewają się pod wpływem przepływającego prądu elektrycznego, a ilość generowanego ciepła zgodnie z prawem Joule'a-Lenza wynosi

$$Q = i^2 Z t \quad (1)$$

gdzie i oraz Z to skuteczna wartość prądu i impedancja. W ogólnym przypadku:

$$Z = [R^2 + (X_L - X_C)^2]^{0,5} \quad (2)$$

$$X_L = 2\pi f L \quad (3)$$

$$X_C = 1/2\pi f C \quad (4)$$

gdzie R , X_L , X_C , f , L i C - odpowiednio: rezystancja rzeczywista, reaktancja indukcyjna, reaktancja pojemnościowa, częstotliwość płynącego prądu, indukcyjność i pojemność obwodu.

Z tych podstawowych zależności wynika, że 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 jego wartość poprzez wielkość reprezentowanej impedancji, która z kolei zależy także od częstotliwości płynącego prądu. Zmienny prąd daje możliwość przestrzennego kształtowania obszarów generowania ciepła poprzez wykorzystanie zjawiska naskórkowości. W przypadku prądów o wysokiej częstotliwości praktycznie cały prąd płynie w warstwie powierzchniowej. Efekt ten spowodowany jest tworzeniem elementarnych sił elektromotorycznych na skutek zjawiska samoindukcji. Wzrost oporności indukcyjnej wewnątrz przewodnika zwiększa się ze wzrostem częstotliwości.

Przy zasilaniu obwodu napięciem $u = U_m \sin \alpha$ w obwodzie płynie prąd

$$i = I_m \sin(\alpha - \varphi) \quad (5)$$

Moc chwilowa w obwodzie

$$\begin{aligned} p &= ui = U_m I_m \sin \alpha \sin(\alpha - \varphi) = \\ &= UI \cos \varphi - UI \cos(2\alpha - \varphi) \end{aligned} \quad (6)$$

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

$$P = UI \cos \varphi, \quad W \quad (7)$$

gdzie prąd czynny $I_c = I \cos \varphi$.

Moc bierna wynosi

$$P_q = UI \sin \varphi, \quad \text{var} \quad (8)$$

gdzie prąd bierny $I_q = I \sin \varphi$,

oraz moc pozorna (przewodowa)

$$P_s = \sqrt{P^2 + P_q^2} = UI, \quad \text{VA} \quad (9)$$

gdzie prąd pozorny $I = I_s$.

Dzięki zjawisku naskórkowości oraz indukcji magnetycznej następuje nagrzewanie wykorzystujące cząstki jako źródło ciepła. Szybkość i skuteczność nagrzewania zależy od magnetycznych właściwości cząstek, które powinny być przynajmniej paramagnetyczne. Wówczas głębokość wnikania prądu określa się jako [5]

$$\delta = \frac{0,05}{\pi} \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}}, \quad \text{mm} \quad (10)$$

Jest to głębokość wnikania zastępczego prądu stałego i zdefiniowano ją jako głębokość, przy której gęstość prądu wynosi 36,7% jego natężenia na powierzchni wsadu, przy typowych wielkościach cząstek zbrojących

[5]. 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: granulatu stopu osnowy, dodatków stopowych bądź kolejnego dodatku zbrojącego, np. grafitu. Na podstawie przedstawionych przesłanek rozpatrzono dwie techniki nagrzewania:

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

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

PRZEPROWADZONE BADANIA

Do przeprowadzenia badań wytypowano cząstki węgla krzemu o ziarnistości $z = 71 \mu\text{m}$ i module morfologicznym $M_m = 0,015 \mu\text{m}^{-1}$ [6], wyzarzone w temperaturze 425°C w ciągu 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.

W celu uzyskania pożądanej przewodności elektromagnetycznej cząstki preparowanego węgla krzemu mieszano z granulatem stopu osnowy. I jak wykazały przeprowadzone próby, dopiero przy stosunku wagowym ilości stopu aluminium do ilości zbrojenia w naboju $k = 0,77$ następowało bezpośrednie przewodzenie prądu i generowanie ciepła w objętości naboju

$$k = \frac{\text{Al}}{\text{SiC}} \Big|_{\text{wag}} = \frac{217}{283} = 0,77$$

gdzie:

Al - masa granulatu aluminiowego stopu osnowy,
SiC - masa cząstek zbrojenia.

Wszystkie oczekiwane efekty cieplne pojawiły się dopiero przy zawartościach nośnika elektromagnetycznego 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 - impedancji. Mieszanka stanowiąca nabój tworzyła opornik o wymiarach: $\phi 30 \times 150$ mm umieszczony w korundowej tulei o grubości ścianki $g = 6$ mm z centralnie umieszczoną termoparą. Tak przygotowana próbka była poddawana nagrzewaniu poprzez bezpośredni przepływ prądu elektrycznego lub przez indukowanie w jej wnętrzu prądów wirowych.

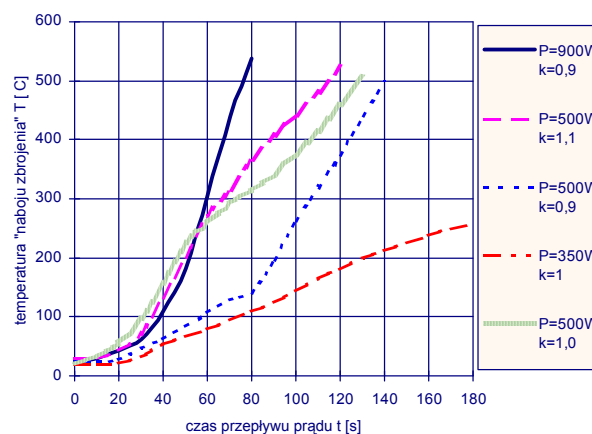
W pierwszym przypadku źródłem prądu był sieciowy regulowany transformator o następujących danych znamionowych:

- $U_2 = 20 \div 100$ V
- $I_2 = 0 \div 60$ A
- $P_1 = 6,6$ kVA
- $\eta = 0,76$
- $\cos \varphi = 0,58$

Podczas kolejnych prób rejestrowano napięcie, prąd, temperaturę i czas nagrzewania. W drugim przypadku wykorzystano układ zasilania pieca indukcyjnego średniej częstotliwości o mocy 10 kW zasilającego cewkę o długości 100 mm, średnicy wewnętrznej $\phi = 50$ mm i liczbie zwojów $n = 6$ zwiniętej z rurki miedzianej o średnicy $\phi_{zew} = 10$ mm. Podczas prób rejestrowano temperaturę w funkcji czasu, przy stałej mocy $P = 5$ kW.

ANALIZA UZYSKANYCH WYNIKÓW BADAŃ

Jako kryterium poprawności nagrzewania „naboju zbrojenia” przyjęto możliwie najkrótszy czas uzyskiwania temperatury $T_{min} = 500^\circ\text{C}$.



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

Fig. 1. Depend of increase „reinforcement cartridge” temperature in time function with changeable share of metallic filler and with changeable electric power

Podczas indukcyjnego nagrzewania uzyskiwano wymagane temperatury po ok. 20 min. W porównaniu do bezpośredniego nagrzewania dało to zbyt długie czasy i zbyt wysokie zużycie energii. Na rysunku 1 zaprezentowano wybrane wyniki bezpośredniego nagrzewania rezystancyjnego próbek o stosunku zbrojenia do wypełnienia metalicznego w naboju zbliżonym do jedności ($k = 1$).

Z przedstawionego wykresu wynika, że w badanym przypadku efektywny sposób nagrzewania elektryczno-rezystancyjnego cząstek zbrojenia niewykazujących przewodnictwa elektrycznego wymaga zastosowania źródeł prądu o mocy rzędu tysiąca watów. Przy współczynniku wypełnienia materiałem przewodzącym $k = 1$ i mocy $P \geq 500$ W po 60 s następuje nagrzanie naboju do temperatury około 300°C . Czas niezbędny do osiągnięcia temperatury zbliżonej do 500°C wynosi $t \leq 140$ s dla współczynnika k bliskiego 1 ($k \cong 1$), intensywność nagrzewania wzrasta przy tym ze wzrostem wartości k . Przy blisko dwukrotnym wzroście mocy do wartości przykładowej $P = 900$ W następuje wyraźne skrócenie czasu nagrzewania do wartości $t = 80$ s.

UWAGI KOŃCOWE I WNIOSKI

Czynnikami istotnie ograniczającymi skuteczność nagrzewania są:

- zbyt mała moc przepływającego prądu - poniżej $P = 500$ W,
- zbyt mały stopień wypełnienia materiałem przewodzącym - poniżej $k = 0,77$.

Dla przykładu, zbyt niska moc $P = 350$ W nawet przy poprawnym współczynniku $k = 1$ nie wystarcza do uzyskania wymaganej temperatury (dolna krzywa z rysunku nr 1) maksimum na krzywej, co nie zostało przedstawione na wykresie, znajduje się w punkcie o współrzędnych [$t = 420$ s; $T = 330^{\circ}\text{C}$]. Ponadto:

1. Przeprowadzenie prób wykazało praktyczną wyższość bezpośredniego grzania „naboju zbrojenia” prądem zmiennym, przepuszczanym wzdłuż walcowej próbki rezystora, będącego „nabojem zbrojenia”.
2. Uzyskano temperaturę 500°C w ciągu kilkadziesiąt sekund, przy niewielkim zużyciu energii - rzędu 0,02 kWh, co stanowi właściwe wartości dla potrzeb przyszłych aplikacji.
3. Potwierdzono łatwość regulacji parametrów elektrycznych kształtujących termiczne właściwości cząstek zbrojących.

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, Proc. Int. Conf. Fab. Particul. Reinforced Metal Compos., Montreal 1990, 563-570.
- [3] Mortensen A., Solidification processing of metal matrix composites, Int. Mater. Rev. 1992, 37, 3, 101-128.
- [4] Wu Y., Solidification behaviour of AlSi-SiC Mmcs, During wedge-mould casting, Acta Metall. Mater. 1994, 42, 3, 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.

Recenzent
Edward Guzik