



Modelowanie złożonej wymiany ciepła w procesie wytwarzania spieku 90W-7Ni-3Fe

JERZY SYPEK, TOMASZ MAJEWSKI¹, ANDRZEJ JAROSŁAW PANAS

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki, Instytut Techniki Lotniczej,
¹Instytut Techniki Uzbrojenia, 01-489 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. Przedstawiono wyniki analizy numerycznej procesu wytwarzania metalu ciężkiego (spieku ciężkiego) 90W-7Ni-3Fe. Modelowano rzeczywisty układ stosowany do wytwarzania takiego materiału metodą nagrzewania rezystancyjnego. Do budowy modelu i wykonania obliczeń zastosowano pakiet Comsol Multiphysics. Analizę przeprowadzono przy założeniach upraszczających wynikających z ograniczonych możliwości środowiska obliczeniowego i braku pełnych charakterystyk materiałowych w całym analizowanym zakresie temperatury. W modelu odtworzono jednak wszystkie główne zjawiska i uzyskano możliwość jakościowej analizy przebiegu procesu spiekania, identyfikacji problemów technologicznych oraz optymalizacji procesu spiekania rezystancyjnego.

Słowa kluczowe: stop 90W-7Ni-3Fe, spiekanie metali, metoda rezystancyjna, złożona wymiana ciepła procesu spiekania, modelowanie numeryczne, metoda elementów skończonych, Comsol Multiphysics

1. Wstęp

Jedną z obecnie stosowanych metod wytwarzania spieków ciężkich jest metoda nagrzewania rezystancyjnego. Energia niezbędna do ogrzania i stopienia niektórych składników takich kompozytów wydziela się wewnątrz materiału poddawanego spiekaniu, wskutek przepływu prądu, jako ciepło Joule'a.

Proces wytwarzania spieku charakteryzuje się znacznym stopniem złożoności. Podczas zmiany temperatury spiekane materiały następuje ciągła zmiana jego właściwości fizycznych, cieplnych i elektrycznych, a na dodatek, w krytycznych momentach procesu, występują przemiany fazowe ze skokową zmianą tych parametrów. Towarzyszące procesowi wytwarzania rozpraszanie ciepła do otoczenia

i niejednorodność pola temperatury w funkcji współrzędnych (wymiarów) próbki spiekane materiału stanowią dodatkowe utrudnienie przy praktycznej realizacji procesu. Są także powodem przeprowadzenia analizy numerycznej jako narzędzia wspomagającego wytwarzanie metali ciężkich i sposobem na wyjaśnienie i zrozumienie przyczyn występujących w układzie rzeczywistym procesów.

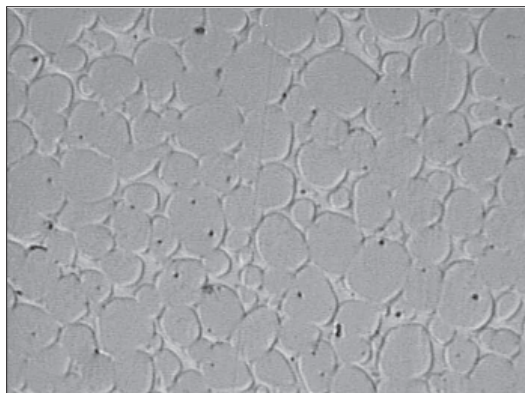
2. Cel analizy

Wytwarzanie spieków 90W-7Ni-3Fe metodą nagrzewania rezystancyjnego to złożony proces fizykochemiczny. Spiek jest wykonywany w specjalnym urządzeniu, w wysokiej temperaturze i przy podwyższonym ciśnieniu. Źródłem energii jest, zgodnie z prawem Joule'a-Lenza, ciepło Q wydzielane w każdym przewodniku podczas przepływu prądu o natężeniu I , proporcjonalne do kwadratu jego natężenia i do rezystancji przewodnika R :

$$Q \approx I^2 \cdot R \cdot t. \quad (1)$$

Prostota powyższej zależności jest pozorna. W rzeczywistości zarówno natężenie prądu jak i rezystancja są zależne od innych parametrów, zwłaszcza temperatury T i czasu τ ($I = f(\tau, T)$, $R = f(\tau, T)$). W trakcie procesu dokonuje się zmiana struktury wewnętrznej, a co za tym idzie, następuje zmiana warunków przewodzenia ciepła i prądu. W efekcie materiał przed spiekaniem i spiek charakteryzują się odmiennymi właściwościami cieplno-fizycznymi.

Materiałem wyjściowym w procesie rzeczywistym są wstępnie sprasowane proszki metali. W trakcie podgrzewania następuje stopienie niklu i żelaza i powstanie fazy nikiel-żelazo-wolfram tworzącej fazę wiążącą dla sferycznych ziaren wolframu (por. rys. 1 [1]). Towarzyszy temu zmiana właściwości fizycznych (gęstość, stan skupienia),



Rys. 1. Mikrostruktura spieku 90W-7Ni-3Fe (zdjęcie za [1])

cieplnych (ciepło właściwe, ciepło topnienia i krzepnięcia, przewodność cieplna) i elektrycznych (zmiana rezystancji).

Właściwości wytwarzanego spieku są uzależnione od wielu czynników [3]. Niektóre, jak np. wpływ czasu trwania procesu, mogą być poznawane na drodze doświadczalnej i są przedmiotem oddzielnych opracowań [4]. Część spośród uwarunkowań może być prześledzona na drodze analizy numerycznej. Dotyczy to zwłaszcza wpływu efektów związanych z wymianą ciepła w spiekanej próbce i w całym układzie [7].

Za cele niniejszej publikacji przyjęto:

- określenie dominujących efektów o podłożu cieplnym,
- określenie stref niejednorodnego nagrzewania próbki,
- porównanie wpływu trzech modelowych programów grzania na przebieg procesu nagrzewania.

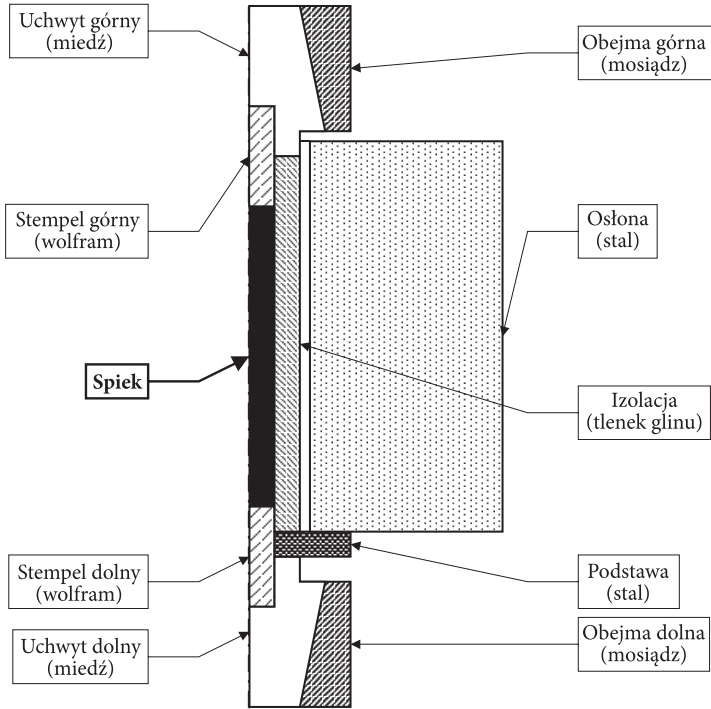
Analizy numeryczne realizowane były przy pewnych ograniczeniach. Podstawowym z nich był brak znajomości charakterystyk materiałowych spieku w analizowanym zakresie temperatury. Stąd też przyjęto uproszczenie, że rezystancja dla wstępnie sprasowanego proszku jest stała do temperatury topnienia, a następnie skokowo ulega zmniejszeniu przy przejściu materiału osnowy w stan ciekły.

3. Charakterystyka modelu

3.1. Opis układu rzeczywistego

Obiektem analizy numerycznej było urządzenie do wykonywania spieków metodą rezystancyjną, które znajduje się na wyposażeniu pracowni technologii metalurgii proszków w Zakładzie Wspomagania Projektowania Wykonania i Eksploatacji w Instytucie Techniki Uzbrojenia WMT. Analizowany układ w zasadniczej części jest osiowosymetryczny. Składa się on z zespołu dwóch obejm i uchwytów, będących zarazem przewodnikami prądu (rys. 2). W środku znajduje się cylindryczna tuleja ceramiczna (wykonana z tlenku glinu), w której umieszcza się wstępnie sprasowane proszki metali, poddawane następnie spiekaniu. Od zewnątrz tuleję otacza stalowa osłona, która w rzeczywistym układzie jest prostopadłościanem, a dla potrzeb analizy numerycznej przyjęto, że ma kształt cylindryczny. Oba elementy układu, tuleja ceramiczna i osłona, nie stykają się ze sobą. Rozdziela je warstwa powietrza, która w modelu numerycznym wynosi 1 mm.

W trakcie procesu wytwarzania spieku prąd elektryczny przepływa pomiędzy stemplami poprzez próbkę. Ponieważ proszki metali charakteryzują się największą, w porównaniu do innych przewodzących prąd elementów układu, rezystancją, toteż podczas przepływu prądu elektrycznego wewnątrz niej następuje najbardziej intensywne wydzielanie się ciepła.



Rys. 2. Schemat urządzenia do wytwarzania spieku metodą rezystancyjną — układ osiowoosymetryczny

Wymiary geometryczne modelu numerycznego odpowiadają wymiarom układu rzeczywistego. Modelowana numerycznie próbka-spiek w kształcie walca posiada średnicę równą 6 mm, a wysokość ok. 34 mm. Wymiary i kształt odpowiadają rzeczywistemu spiekowi po zakończeniu procesu wytwarzania.

3.2. Opis zagadnienia

Z punktu widzenia klasyfikacji zagadnień cieplnych w opisywanym modelu numerycznym rozpatrywano zagadnienie nieustalonego przewodzenia ciepła w ciele stałym, z występującym wewnętrznym, objętościowym źródłem ciepła i przy założeniu zmienności w funkcji temperatury ciepła właściwego $c_p = f(T)$ i współczynnika przewodzenia ciepła $\lambda = f(T)$. Zagadnienie tej klasy opisywane jest w ogólnym przypadku, dla prostokątnego układu współrzędnych, przez równanie różniczkowe Fouriera-Kirchhoffa:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \lambda}{\partial T} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] + q_v. \quad (2)$$

Wydajność źródła ciepła q_V w omawianym modelu jest funkcją rezystancji R , a ta z kolei zależy od temperatury T (3). Odpowiada to zmieniającej się w rzeczywistym modelu rezystancji, a wraz z nią wydajności wewnętrznego źródła ciepła.

$$q_V = f(R(T)). \quad (3)$$

Założono, że wymiana pomiędzy elementami konstrukcyjnymi układu oraz pomiędzy układem a otoczeniem odbywa się na trzy sposoby: na drodze przewodzenia, konwekcji lub promieniowania.

Dla przylegających do siebie elementów stałych układu przyjęto, że występuje idealny styk, wymiana ciepła dokonuje się przy warunku brzegowym czwartego rodzaju (4), a gęstość strumienia ciepła wynosi:

$$q_s = -\lambda_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial n} \right)_s = -\lambda_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial n} \right)_s, \quad (4)$$

gdzie indeksy 1 i 2 oznaczają odpowiednio właściwości obu pozostających w kontakcie elementów.

Wyjątkiem były dwie powierzchnie, styk stempli i spieku, gdzie założono występowanie oporu cieplnego wynoszącego $2000 \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}$.

Ponadto przyjęto, że w wąskiej szczelinie pomiędzy izolacją a osłoną dominującym sposobem wymiany ciepła jest promieniowanie, dla którego strumień ciepła Q_i przekazywany z powierzchni i jest różnicą pomiędzy ciepłem emitowanym Q_{em} a ciepłem pochłanianym Q_{ab} od otaczających powierzchnię i n -powierzchni. Jest on, przy pominięciu konwekcji i braku powierzchniowych źródeł ciepła, opisywany zależnością (5).

$$Q_i = Q_{em} - Q_{ab} = A_i e_i - \varepsilon \sum_{j=1}^n A_j h_j \phi_j, \quad (5)$$

gdzie e oznacza gęstość strumienia emisji, ε jest emisyjnością, A oznacza powierzchnię, h gęstości strumienia pochodzące od powierzchni n , natomiast przez ϕ oznaczono współczynniki konfiguracji, które w omawianym modelu były określane przez pakiet numeryczny automatycznie.

Natomiast na powierzchniach zewnętrznych układu do spiekania rezystancyjnego przekazywanie ciepła do otoczenia o temperaturze T_p odbywało się poprzez konwekcję (6), przy czym współczynnik przejmowania ciepła założony w modelu wynosił $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

$$-\lambda_1 \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_s = \alpha (T_s - T_p). \quad (6)$$

Jako warunek początkowy przyjęto jednorodny rozkład temperatury w całym układzie równy $T(t=0) = 293,15 \text{ K} = 20^\circ\text{C}$.

3.3. Opis modelu numerycznego

Model numeryczny opracowano i obliczenia numeryczne wykonano w środowisku COMSOL 3.4 firmy COMSOL MULTIPHYSICS. Do analiz wykorzystywano moduł wymiany ciepła (Heat Transfer Module).

Modelowano następujące procesy fizyczne:

- przewodzenie ciepła,
- przekazywanie ciepła na drodze konwekcji,
- przekazywanie ciepła przez promieniowanie,
- generowanie ciepła w objętościowym źródle ciepła,
- przemianę fazową — topnienie osnowy spieku.

Modelując wytwarzanie ciepła Joule'a, przyjęto, że jego odpowiednikiem w modelu numerycznym będzie objętościowe źródło ciepła o mocy proporcjonalnej do rezystancji i do kwadratu natężenia prądu. Wykorzystywana wersja pakietu COMSOL nie obejmowała licencji na moduł oddziaływań cieplno-elektrycznych „Elektro-Thermal Interaction”, dlatego wydzielanie się ciepła modelowano za pomocą modułu „Heat Transfer”.

Przy analizie numerycznej zaniedbano jako pomijalnie małe (różnica o dwa rzędy wielkości) ciepło Joule'a wydzielane w innych elementach układu przewodzących prąd, a wykonanych z miedzi i wolframu.

3.3.1. Modelowanie materiałów konstrukcyjnych układu

Właściwości cieplno-fizyczne elementów konstrukcyjnych modelu numerycznego przyjęto odpowiednio do budowy układu rzeczywistego przedstawionego na rysunku 1, na podstawie bibliotek własnych programu Comsol, a zestawienie tabelaryczne wartości przedstawiono poniżej (tab. 1).

TABELA 1

Właściwości cieplno-fizyczne elementów modelu numerycznego

Lp.	Element modelu numerycznego (materiał)	Gęstość	Ciepło właściwe	Przewodność cieplna
		[$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	[$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	[$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
1	Uchwyt (miedź)	8700	385	400
2	Oślona (stal)	7850	475	44,5
3	Stempel (wolfram)	19350	132	174
4	Izolacja (tlenek glinu)	3965	730	35

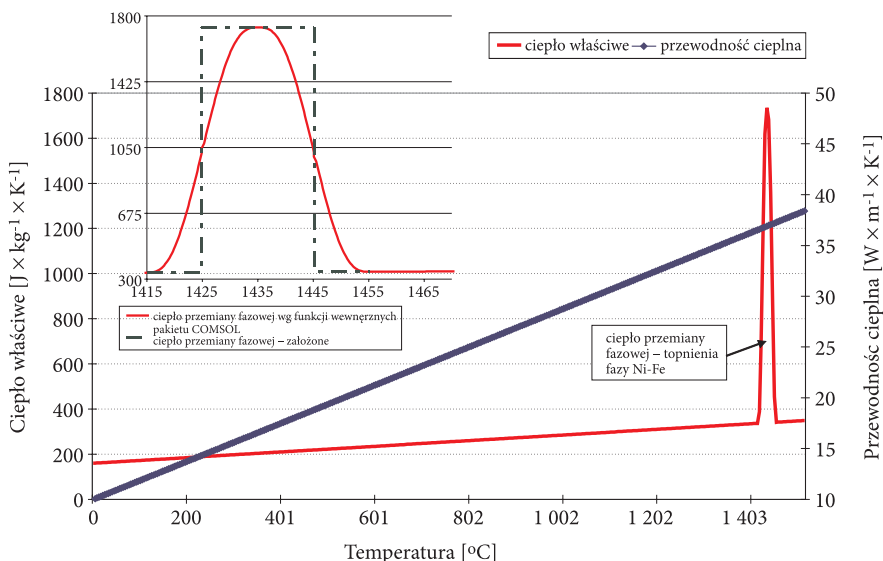
3.3.2. Materiał spieku

Właściwości cieplno-fizyczne i elektryczne spiekanej proszku przyjęto w oparciu o prowadzone wcześniej w Laboratorium Termodynamiki badania dyfuzyjności cieplnej metodą impulsową, rozszerzalności cieplnej na stanowisku dylatometrycznym interferencyjnym oraz pojemności cieplnej wyznaczanej metodą mikrokalorymetryczną [2, 5-8].

Niewyznaczone eksperymentalnie charakterystyki właściwości cieplno-fizycznych, w tym charakterystyki przewodności elektrycznej właściwej materiału osnowy i gotowego spieku, przyjęto na podstawie oszacowań. W oszacowaniach wykorzystano prawo Wiedemanna-Franza oraz znajomość udziałów masowych poszczególnych składników.

W strukturze spieku dominujący udział posiada wolfram, metal o bardzo wysokiej temperaturze topnienia. Natomiast dla pozostałych dwóch metali: niklu i żelaza, dla stosunku 7/3, faza Ni-Fe topi się w temperaturze 1435°C. Temperatura spiekania wynosi natomiast 1480°C.

Założono, że gęstość proszków metali pozostaje stała w funkcji temperatury. Przyjęto natomiast, że liniowo w funkcji temperatury zmienia się przewodność cieplna i ciepło właściwe (rys. 3). Ponadto zamodelowano, jako skokowy wzrost ciepła właściwego w przedziale od 1425°C do 1445°C ($\pm 10^\circ\text{C}$ względem temperatury przemiany), ciepło przemiany fazowej pierwszego rodzaju fazy Ni-Fe. Przebieg ten, oznaczony na rysunku 3 linią kropkowaną, z zachowaniem wielkości ciepła przemiany, został sprowadzony przez funkcję wewnętrzną pakietu numerycznego Comsol do przebiegu oznaczonego linią ciągłą.



Rys. 3. Ciepło właściwe i przewodność cieplna spieku 90W-7Ni-3Fe w modelu numerycznym

Pozostałe parametry modelu numerycznego spieku zestawiono poniżej:

- $6,73 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot m$ — opór właściwy elektryczny proszku sprasowanego wstępnie,
- $6,73 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$ — opór właściwy elektryczny spieku w temperaturze powyżej $1435^{\circ}C$ (osnowa w stanie ciekłym),
- $17150 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ — gęstość spieku.

4. Wyniki analizy

4.1. Wpływ wymuszenia cieplnego na odpowiedź układu

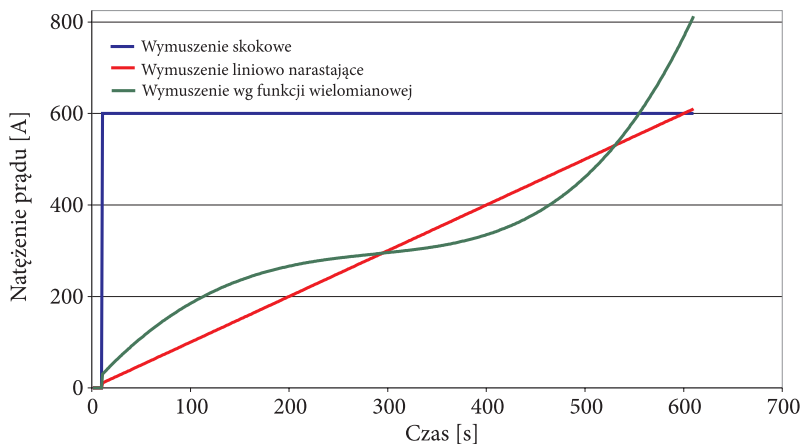
Z dokonanego powyżej opisu wynika, że wydzielanie się ciepła dokonuje się w małej objętości proszków metali poddawanych spiekaniu (objętość modelowanego spieku wynosi $9,613 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$). Materiał poddawany procesowi spiekania jest otoczony przez masywny układ zbudowany z dobrych przewodników elektrycznych i cieplnych. Jedynie wykonana z tlenku glinu tuleja jest izolatorem elektrycznym i średnim przewodnikiem ciepła.

Wzrost mocy objętościowego źródła ciepła w modelu numerycznym, odpowiadający wzrostowi natężenia prądu w układzie rzeczywistym, powoduje narastanie temperatury w spiekany proszku. Wobec przedstawionych wcześniej warunków wymiany ciepła, energia z próbki jest przekazywana do przylegających elementów konstrukcyjnych układu, a następnie, na drodze konwekcji, do otoczenia.

Duże rozmiary (znaczną pojemność cieplną) całego układu wobec rozmiarów próbki, duża powierzchnia odprowadzania ciepła do otoczenia powodują, że do zapewnienia warunków niezbędnych, by wystąpiła przemiana fazowa pierwszego rodzaju i uzyskanie fazy ciekłej osnowy, moc źródła ciepła w spieku musi sięgać kilowatów.

Jednym z zagadnień poddanych analizie numerycznej był sposób realizacji wymuszenia, czyli natężenia prądu przepływającego przez układ w funkcji czasu. Bezpośrednio znaczenie czasu wytwarzania spieku na jego jakość wykracza poza możliwości analizy numerycznej. Natomiast określenie, na drodze modelowania, pola temperatury w spieku oraz różnicy pomiędzy strefami temperatury najwyższej i najniższej może być przydatne dla wyboru optymalnego sposobu wymuszenia, mając na uwadze ryzyko dużych lokalnych przyrostów temperatury¹. W ramach analizy numerycznej symulowano trzy rodzaje wymuszenia natężeniem przepływającego przez układ prądu: skokowy przyrost, liniowe narastanie i wymuszenie opisane funkcją wielomianową (rys. 4).

¹ Poszczególne elementy stanowiska posiadają różne dopuszczalne temperatury pracy. Oszacowania ich wielkości dokonano w trakcie eksperymentów optymalizujących.

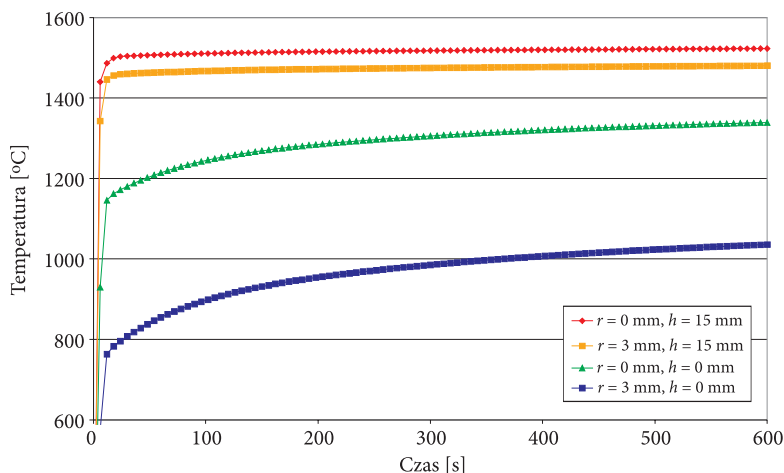


Rys. 4. Sposoby realizacji wymuszenia

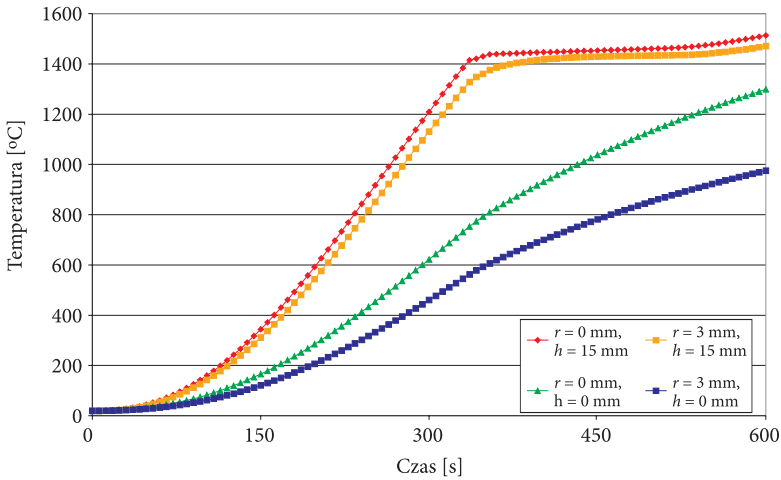
Odpowiedź układu (zmiana temperatury w funkcji czasu) dla skokowego, liniowego i wg funkcji wielomianowej sposobu realizacji wymuszenia została przedstawiona na rysunkach 5-7. Przedstawiono charakterystyki temperatury dla czterech wybranych punktów spieku — współrzędne promieniowa r i osiowa h wyrażone w mm:

- $r = 0, h = 15$ — oś symetrii podłużna, około połowy wysokości próbki,
- $r = 0, h = 0$ — oś symetrii podłużna, przy dolnym stemple,
- $r = 3, h = 0$ — krawędź zewnętrzna, przy dolnym stemple,
- $r = 3, h = 15$ — powierzchnia zewnętrzna, około połowy wysokości próbki.

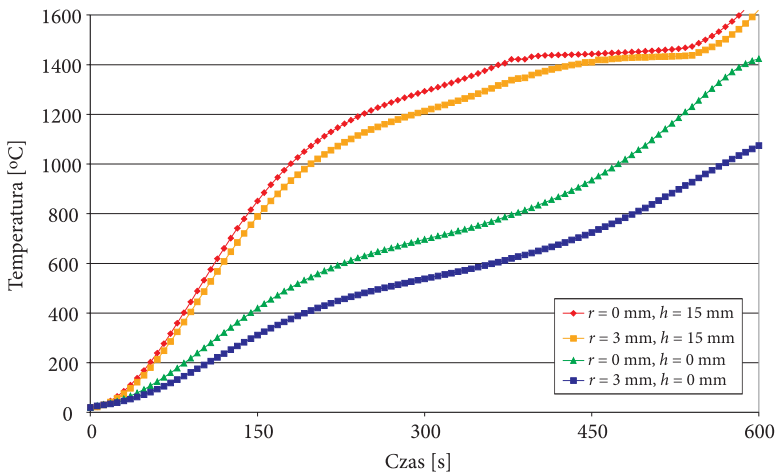
Skokowy wzrost natężenia prądu do 600 A skutkuje bardzo szybkim nagrzewaniem próbki, zwłaszcza części środkowej, do temperatury topnienia fazy



Rys. 5. Narastanie temperatury przy skokowym wymuszeniu natężeniem prądu elektrycznego



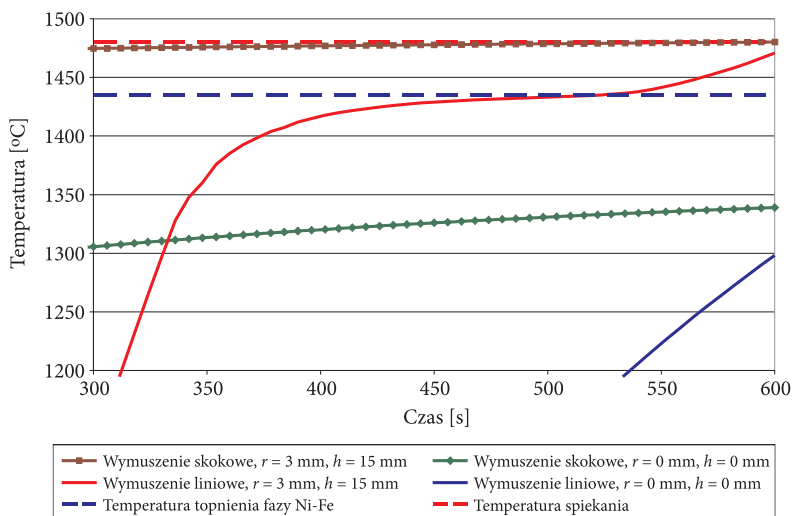
Rys. 6. Narastanie temperatury przy liniowym zwiększaniu mocy źródła ciepła



Rys. 7. Narastanie temperatury przy zwiększaniu mocy źródła ciepła wg funkcji wielomianowej

Ni-Fe. Następuje wówczas spadek rezystancji, a więc skokowe zmniejszenie mocy wewnętrznego źródła ciepła. Tym samym w części środkowej próbki następuje stabilizacja temperatury (rys. 5). Natomiast nagrzewanie proszków metali położonych w pobliżu stempli następuje wolniej. W bezpośrednim sąsiedztwie stempli warunki do stopienia fazy Ni-Fe nie występują.

Przy liniowym narastaniu natężenia prądu do natężenia 600 A w ciągu 10 minut w środkowej części próbki osiągnięta temperatura ma podobną wartość jak przy wymuszeniu skokowym. Temperatura topnienia fazy Ni-Fe osiągnięta jest wyraźnie później niż poprzednio, bo po około 5 minutach. Temperatury osiągnięte w bezpośrednim sąsiedztwie stempli są nieco niższe niż dla wymuszenia skokowego.



Rys. 8. Porównanie charakterystyk temperatury dla skokowego i liniowego wymuszenia

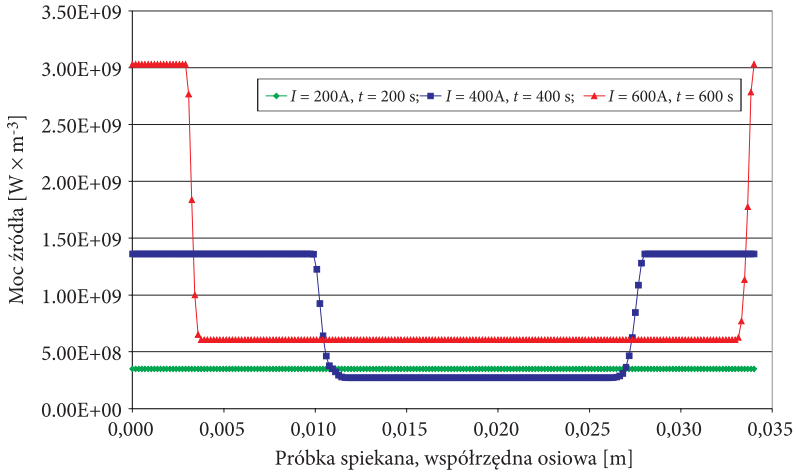
Wymuszenie wg funkcji wielomianowej (rys. 7), dzięki krótkotrwałemu, pod koniec procesu, wzrostowi natężenia prądu, spowodowało szybki przyrost temperatury w całej próbce i pozwoliło na osiągnięcie, przez niedługi okres, warunków do stopienia fazy Ni-Fe w pobliżu górnego stempla.

Poddając ocenie wyniki obliczeń numerycznych dla trzech wariantów realizacji wymuszenia prądem elektrycznym, wypada stwierdzić, iż żaden z nich nie stwarza warunków do zajścia przemiany fazowej w całej objętości próbki. W ogólnym przypadku najwyższa temperatura jest osiągana w strefie środkowej próbki, najslabiej nagrzewają się strefy przy powierzchniach czołowych, szczególnie przy krawędzi zewnętrznej.

4.2. Źródło ciepła

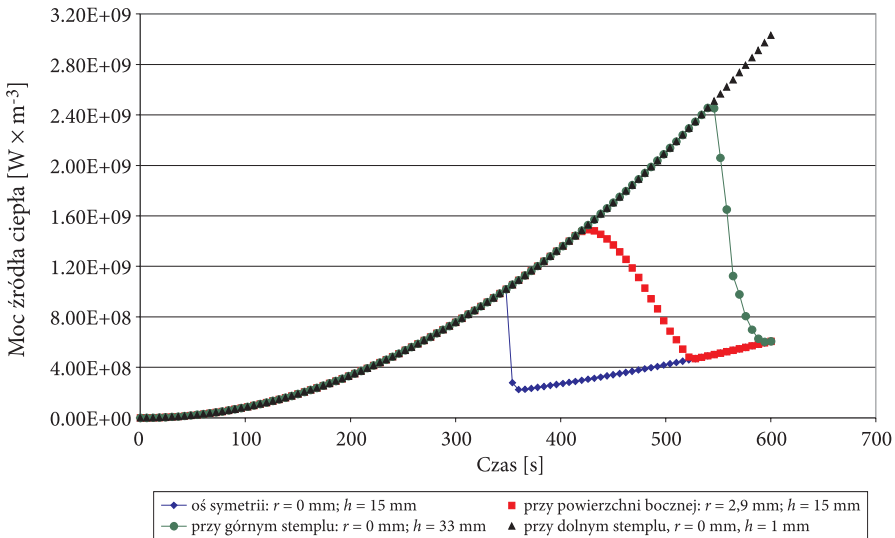
Najwyższa temperatura w modelu numerycznym występuje w środkowej strefie modelu próbki, toteż w tej strefie modelu najszybciej topi się faza Ni-Fe. W konsekwencji w środkowej części próbki najwcześniej występuje strefa, gdzie spada wydajność źródła ciepła Joule'a. Następnie, wraz z upływem czasu, strefa spieku ze stopioną fazą Ni-Fe powiększa się ku stemplom (rys. 9). Charakterystyczne spadki mocy źródła niosą zarazem informację o osiągnięciu temperatury przemiany fazowej.

Przy liniowym narastaniu natężenia prądu, dla czasu symulacji procesu wynoszącego 10 minut, na żadnej z powierzchni czołowych nie zostanie osiągnięta temperatura przemiany fazowej. Ponieważ warunki odprowadzania ciepła na obu końcach modelu spieku są niejednakowe, wobec tego strefy, gdzie warunki do wystąpienia przemiany fazowej nie wystąpiły, są różne (część próbki o temperaturze niższej niż 1435°C jest większa po stronie stempla dolnego niż górnego).

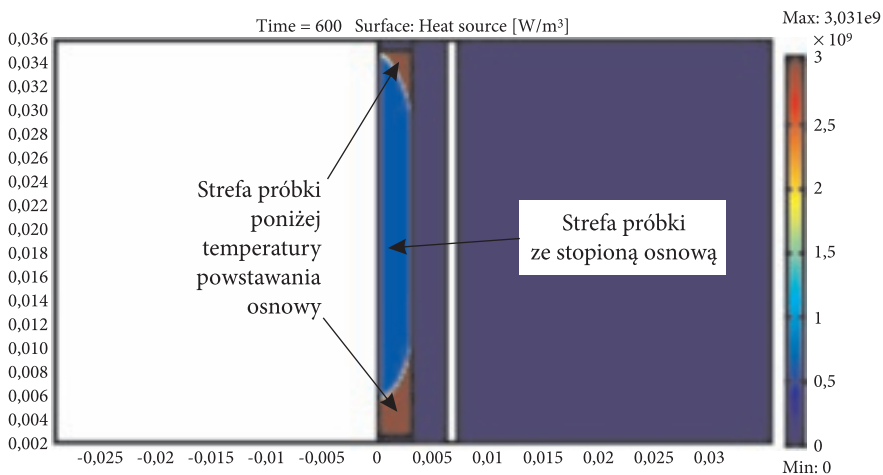


Rys. 9. Wymuszenie liniowe. Objętościowa moc źródła ciepła w funkcji wysokości próbki (oś symetrii próbki, $r = 0$) dla różnych czasów trwania wymuszenia

Charakterystyki na rysunku 10 obrazują objętościową moc źródła w funkcji czasu w wybranych czterech punktach modelu. Spowodowany osiągnięciem temperatury topnienia fazy Ni-Fe spadek mocy źródła następuje najszybciej w strefie środkowej próbki ($r = 0$, $h = 15$ mm). W punkcie $r = 0$ mm, $h = 1$ mm, gdzie strumień strat ciepła do obudowy układu jest bardzo duży, załamanie mocy źródła nie zachodzi. Kształt strefy modelu ze stopioną fazą Ni-Fe w sposób graficzny obrazuje rysunek 11.



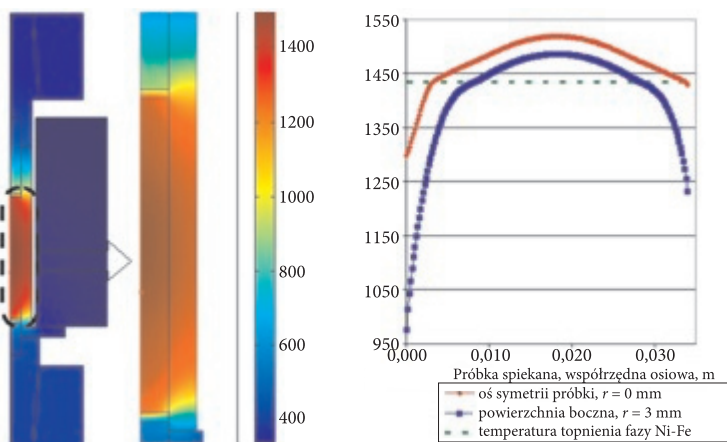
Rys. 10. Wymuszenie liniowe: gęstość objętościowa mocy źródła ciepła w funkcji czasu



Rys. 11. Wymuszenie liniowe. Moc źródła ciepła, końcowy etap grzania, $t = 600$ s

4.3. Pole temperatury

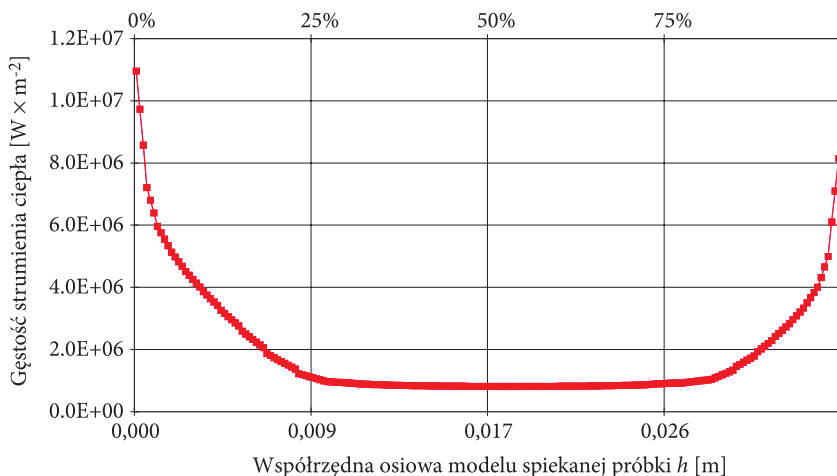
Na rysunku 12 przedstawiono graficzny rozkład pola temperatury dla liniowego narastania natężenia prądu, w chwili $t = 600$ s. Przedstawiono dwie charakterystyki temperatury w funkcji wysokości próbki, w osi symetrii próbki ($r = 0$) i na powierzchni bocznej ($r = 3$ mm). Obliczenia pola temperatury dla prezentowanego modelu numerycznego dowodzą, że rozpiętość temperatury w próbce przekracza pod koniec symulowanego procesu spiekania 500°C .



Rys. 12. Wymuszenie liniowe. Pole temperatury w modelu numerycznym, $t = 600$ s

4.4. Straty ciepła

Na rysunku 13 przedstawiono rozkład gęstości strumienia ciepła wzdłuż powierzchni bocznej modelu spieku. Wyraźnie widoczne jest, że największą gęstość strumień ciepła przyjmuje w pobliżu stempli wolframowych, na końcach spiekane materiału. Tam występują największe gradienty temperatury, tam też ciepło jest odprowadzane najbardziej intensywnie. Następnie przez elementy układu wykonane z miedzi i mosiądzu, będące bardzo dobrymi przewodnikami ciepła, przekazywane jest do otoczenia.



Rys. 13. Wypadkowa gęstość strumienia ciepła na powierzchni bocznej spiekanej próbki. Wymuszenie liniowe

Na uwagę zasługuje fakt, że w środkowej strefie próbki (stanowi to około 50% jej wysokości), gdzie straty ciepła wynikają przede wszystkim z przewodzenia energii przez tuleję ceramiczną, strumień ciepła ma wartość ustabilizowaną w funkcji współrzędnej osiowej spieku, o rząd wielkości mniejszą niż w pobliżu stempli.

Podsumowując, warunki do powstawania spieku są bardzo zróżnicowane w poszczególnych częściach próbki. Około połowa objętości modelu spieku, w takim układzie konstrukcyjnym, charakteryzuje się stosunkowo jednorodnymi warunkami do spiekania. Natomiast szczególnie niesprzyjające uwarunkowania występują w pobliżu powierzchni czołowych.

Żaden z analizowanych sposobów realizacji wymuszenia nie pozwala na osiągnięcie w całej objętości modelu warunków pozwalających na przekroczenie temperatury przemiany fazowej. Pomimo wysokiej mocy objętościowej źródła ciepła, temperatura niezbędna do przekroczenia temperatury powstawania ciekłej osnowy osiągniata jest lokalnie. Różnice temperatury w próbce przekraczają $500^{\circ}C$.

Konsekwencją tego są duże gradienty temperatury, zarówno w modelu próbki, jak również w elementach układu bezpośrednio sąsiadujących z próbką. W powiązaniu

z umiarkowanymi lub słabymi wskaźnikami izolacyjności cieplnej tulei ceramicznej, a zwłaszcza stempli, w układzie występują bardzo duże straty ciepła. Jest to pochodna wymagań konstrukcyjnych stawianych układowi. Elementy układu, szczególnie te przylegające do spieku, muszą charakteryzować się odpowiednią odpornością na oddziaływanie wysokich temperatur, rzędu 1500°C, i być dobrym izolatorem cieplnym. Te elementy układu, które są zarazem przewodnikami prądu (stemple, uchwyty), powinny dodatkowo stawiać stosunkowo niski opór elektryczny.

Spełnienie tak sprzecznych wymagań sprawia, że cały układ do wytwarzania spieku dobrze przewodzi ciepło i stosunkowo słabo izoluje spiekana próbkę przed wychładzaniem. Nie gwarantuje także jednorodności pola temperatury na takim poziomie, by można było osiągnąć temperaturę powstawania osnowy w całej objętości próbki, ale bez lokalnego, zwłaszcza w środkowej strefie próbki, przekroczenia bezpiecznej dla układu i korzystnej z punktu widzenia procesu wytwarzania spieku temperatury.

5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono wynik analizy numerycznej złożonej wymiany ciepła dla układu do wytwarzania spieków metodą rezystancyjną. Oceniając analizę, należy mieć na uwadze, że została ona dokonana przy kilku założeniach upraszczających. Na obecnym etapie nie uwzględniono bezpośrednio sprzężeń pola temperatury i pola elektrycznego. Zamodelowane zostało ono poprzez wewnętrzne objętościowe źródło ciepła. Z tego też powodu nie można było poddać analizie wpływu zmieniających się właściwości elektrycznych spiekanego materiału na gęstość ładunku elektrycznego i na lokalną objętościową moc źródła ciepła. Na obecnym etapie trudno stwierdzić, że uwzględnienie oddziaływań cieplno-elektrycznych stanowić będzie znaczący postęp i pozwoli uzyskać wiele ciekawych rezultatów. Jeżeli możliwe będzie sformułowanie takiego wniosku, będzie to argument za uzupełnieniem licencji pakietu COMSOL o moduł oddziaływań cieplno-elektrycznych.

Porównując ilość energii wydzielanej w efekcie Joule'a z ilością energii potrzebnej do ogrzania próbki i wywołania odpowiednich przemian fazowych w materiale spieku, nasuwa się wniosek, że ilość energii potrzebnej do ogrzania elementów konstrukcyjnych układu wielokrotnie przewyższa tę ilość, która jest niezbędna do wykonania spieku. Większa część ciepła źródła jest tracona do otoczenia. Bez poprawy izolacji strefy układu, gdzie powstaje spiek, optymalizacja wymuszenia cieplnego w szerszym zakresie nie jest możliwa.

Objętość, gdzie najwcześniej następuje przejście osnowy w stan ciekły, znajduje się w przybliżeniu w połowie wysokości próbki. Wraz ze wzrostem mocy źródła strefa rozwija się ku powierzchniom czołowym. W efekcie w poszczególnych strefach próbki temperatura maksymalna i czas utrzymywania osnowy w stanie ciekłym jest różny. W pobliżu powierzchni czołowych próbki straty ciepła są na tyle duże,

że w pewnych strefach próbki, zwłaszcza przy jej powierzchniach czołowych, stopienie osnowy spieku jest w ogóle trudne do uzyskania.

Jest to kolejny argument, że ograniczenie strumienia ciepła rozpraszanego do otoczenia poprawiłoby efektywność oddziaływania wymuszeniem na jakość wykonywania spieku oraz przyczyniłoby się do ujednorodnienia warunków powstawania spieku.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2006-2010 jako projekt badawczy rozwojowy nr R 00 024 02.

Artykuł wpłynął do redakcji 23.03.2010 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w czerwcu 2010 r.

LITERATURA

- [1] T. MAJEWSKI, *Badanie struktury spieku 90W-7Ni-3Fe wykonanego metodą rezystancyjną, odkształcanego plastycznie*, Kompozyty, 5, nr 2, 2005, 58-62.
- [2] A. J. PANAS, J. TERPIŁOWSKI, T. MAJEWSKI, *Investigation of thermophysical properties of 53Ni-23Fe-24W. Matrix phase component of WHA*, 18 ECTP, Pau, France, 2008.
- [3] T. MAJEWSKI, *Analiza wpływu parametrów spiekania rezystancyjnego na strukturę i właściwości spieków W-Ni-Fe*, rozprawa doktorska WAT, Warszawa, 2000.
- [4] E. WŁODARCZYK, J. MICHAŁOWSKI, J. PIĘTASZEWSKI, *Wpływ czasu spiekania z udziałem fazy ciekłej na niektóre właściwości spieku ciężkiego 90W-7Ni-3Fe*, Biul. WAT, 51, 3, 2002, 109-122.
- [5] A. J. PANAS, J. TERPIŁOWSKI, T. MAJEWSKI, *Badania rozszerzalności liniowej materiału fazy wiążącej spieku 90W-7Ni-3Fe*, Biul. WAT, 57, 3, 2008, 361-380.
- [6] J. TERPIŁOWSKI, A. J. PANAS, T. MAJEWSKI, *Badania dyfuzyjności cieplnej materiału fazy wiążącej spieku 90W-7Ni-3Fe*, Biul. WAT, 58, 2, 2009, 363-375.
- [7] M. TRZASKA, *Analiza zjawisk w procesie spiekania rezystancyjnego prętów wolframowych*, rozprawa habilitacyjna, Politechnika Częstochowska, Wydział Metalurgii i Inżynierii Materiałowej, 1998.
- [8] A. J. PANAS, J. TERPIŁOWSKI, T. MAJEWSKI, *Określanie właściwości cieplno-fizycznych spieku 90W-7Ni-3Fe*, opracowanie niepublikowane, WAT, Warszawa, 2009.
- [9] S. WIŚNIEWSKI, T. WIŚNIEWSKI, *Wymiana ciepła*, WNT, Warszawa, 2000.

J. SYPEK, T. MAJEWSKI, A. J. PANAS

Modelling of complex heat transfer in the 90W-7Ni-3Fe sinter production process

Abstract. Results of numerical analysis of 90W-7Ni-3Fe heavy alloy (WHA) production process were presented in the paper. Real system used for production of such material by resistance heating method was modelled applying Comsol Multiphysics FEM software. The analysis was focussed on complex, i.e., combined heat transfer phenomena including phase change effects. Despite some necessary simplifications, all the main phenomena were reconstructed in the numerical model. The numerical modelling enabled for qualitative and quantitative, in some aspect, analyses of the sintering processes and for identification of main technological problems. It also made possible optimisation of the analysed powder metallurgy production process.

Keywords: 90W-7Ni-3Fe sinter, WHA sintering, resistance heating, combined heat transfer at resistance sintering, numerical modelling, finite element method, Comsol Multiphysics