

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Wydział Mechaniczny Technologiczny
Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

PRACA DOKTORSKA

*Wpływ składu chemicznego materiałów proszkowych na bazie żelaza na właściwości
elementów spiekanych*

mgr inż. Agnieszka Stanula

Dyscyplina: Inżynieria Materiałowa

Promotor:

dr hab. inż. Wirginia Pilarczyk, prof. PŚ

Gliwice, 2023 r.

Streszczenie poszerzone

TEMAT

Wpływ składu chemicznego materiałów proszkowych na bazie żelaza na właściwości elementów spiekanych

TEZA

Skład chemiczny materiałów proszkowych na bazie żelaza, gęstość wypraski oraz rodzaj materiału pochodzącego z różnych procesów technologicznych wpływa na twardość oraz wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie elementów spiekanych.

CEL

Celem naukowym rozprawy doktorskiej jest zbadanie wpływu składu chemicznego materiałów proszkowych, Fe-C, Fe-C-Cu na właściwości mechaniczne elementów spiekanych.

Na podstawie sformułowanej tezy określono następujące cele wdrożeniowe rozprawy:

1. Dobór materiału proszkowego w celu wyznaczenia właściwości wytrzymałościowych elementów spiekanych.
2. Redukcja dużej ilości badań prowadzonych w laboratorium poprzez zbudowanie odpowiedniej bazy wiedzy naukowej oraz weryfikacja wdrażania nowych produktów.
3. Koncepcja *Digital Twin* – porównanie parametrów rzeczywistych i literaturowych użytych do analizy elementów skończonych MES.
4. Stworzenie odpowiedniego stanowiska badawczego w celu badania gęstości elementów spiekanych.

ZAKRES

Zakres tematyczny rozprawy doktorskiej, w tym określenie problemu badawczego, obejmuje zdefiniowanie zależności pomiędzy zawartością miedzi i węgla a parametrem gęstości dla elementów spiekanych będących podzespołem zawieszenia pojazdu. Stosując odpowiedni skład chemiczny oraz proces technologiczny istnieje możliwość znalezienia zależności pomiędzy składem chemicznym, gęstością a właściwościami mechanicznymi komponentów (wytrzymałość na rozciąganie oraz ściskanie, granica plastyczności, wydłużenie oraz twardość).

Badania metalograficzne dostarczają informację o wpływie pęknięcia w elemencie spiekany na potencjalną awarię w całym zawieszeniu samochodu. Obliczenie oraz określenie strat węgla w procesie produkcyjnym umożliwia obniżenie kosztów produkcji.

Zakres badań naukowych wymaga sprawdzenia:

1. Właściwości materiałów proszkowych
2. Struktury wytworzonych elementów spiekanych
3. Właściwości mechanicznych elementów spiekanych

W tym celu użyty został mikroskop optyczny, skaningowy oraz transmisyjny mikroskop elektronowy.

Badania właściwości mechanicznych wymagają sprawdzenia twardości, wytrzymałości na rozciąganie i ściskanie oraz gęstości.

Zakres obejmował kompleksowe badanie kompaktu zbudowanego z materiału FC-0208 (22). Sprawdzona została wytrzymałość na rozciąganie oraz ściskanie dla różnych kombinacji. Dane z testów dały wyniki prób ściskania i rozciągania dla testów prowadzonych w temperaturze 23°C oraz 120°C, dla elementów spiekanych o różnej gęstości oraz dla procesu spiekania wraz z dodatkową obróbką cieplną oraz bez niej. Przełomy przeanalizowano przy użyciu mikroskopii SEM oraz TEM. Zbudowano model matematyczny Druckera-Pragera w celu symulacji zachowania się kompaktów podczas prób ściskania i rozciągania oraz pojawienia się potencjalnego pęknięcia.

Zakres pracy obejmował także sprawdzenie zachowania się elementów spiekanych wytworzonych z materiału proszkowego na bazie żelaza Fe-C oraz materiału proszkowego na bazie żelaza z domieszką miedzi Fe-C-Cu.

Sprawdzono ich wytrzymałość na próbę ściskania oraz rozciągania. Sprawdzono również ich mikrostrukturę dla różnych prób gęstości elementu spiekanego.

WNIOSKI

1.

W pracy przeprowadzono badania na 6 różnych rodzajach materiałów proszkowych. Każdy materiał miał określony skład chemiczny pochodzący bezpośrednio od dostawcy proszku. Materiały te poddano konwencjonalnej metodzie spiekania. Połowa wyprasek została dodatkowo poddana obróbce utleniającej. Celem badań było sprawdzenie wpływu składu chemicznego na właściwości mechaniczne wyprodukowanej wypraski. Ze względu na dużą liczbę próbek do badań przyjęto, że na próby wytrzymałościowe wpływ może mieć:

- rodzaj proszku spiekanego,
- segregacja miedzi, będąca składnikiem mieszaniny proszkowej,
- czas przechowywania proszku, zanim zostanie on użyty do procesu zagęszczania/spiekania,
- czystość procesu produkcyjnego,
- wielkość ziarna materiału proszkowego,
- porowatość,
- mikrostruktura ferryt/perlit.

Wyniki prób ściskania oraz rozciągania były rozproszone z racji porowatości materiału. Aby określić zależności danych i wyników rozdzielono badania na analizę elementów spiekanych z materiału proszkowego 22 oraz analizę elementów spiekanych z pozostałych materiałów proszkowych Fe-C-Cu i Fe-C.

2.

Kompleksowe badania przeprowadzono na materiale FC-0208 (Fe-C-Cu), ponieważ jest to nowy materiał wykorzystywany w tym konkretnym konwencjonalnym procesie produkcyjnym. Zauważono też, iż wiele wyprasek wyprodukowanych z tego materiału pęka w użyciu aplikacyjnym. Elementy spiekane poddano testom wytrzymałości na ściskanie oraz na rozciąganie. Zauważono, iż próbki podczas próby rozciągania pękały wokół szczęk, a nie w połowie długości próbki, poza długością pomiarową. Ponowne wykonanie testów – z użyciem tej samej próbki, lecz innej aparatury – potwierdziło, iż badania przeprowadzono prawidłowo.

Podczas próby ściskania nastąpiło wyboczenie próbki, co jest normalnym zjawiskiem w czasie próby wytrzymałościowej ściskania. Ze względu na porowatość próbki testowej zauważono, że granica plastyczności różni się w próbie ściskania i rozciągania.

Próba rozciągania wypraski z proszku 22 wykazała, iż temperatura nie ma wpływu na parametry wytrzymałości na rozciąganie, czyli zdolności badanej próbki do przeciwstawienia się pękaniu, gdy siła ciągnąca jest przykładana w kierunku równoległym do jej osi wzdłużnej. Temperatura także nie ma wpływu na wartość Modułu Younga, czyli wielkość określającą sprężystość materiału przy rozciąganiu. Różnice w wynikach nie były widoczne w przypadku próbki z dodatkowym utlenianiem lub bez niego. Zaobserwowano zależność, iż wraz ze wzrostem gęstości wzrasta wytrzymałość na rozciąganie oraz moduł Younga.

Próba ściskania również wykazała, iż temperatura 23°C oraz 120°C nie ma wpływu na różnicę w wyniku testu. Wraz ze wzrostem gęstości wzrasta twardość elementów spiekanych. Także wraz ze wzrostem gęstości oraz twardości wzrasta wytrzymałość na ściskanie, granica plastyczności oraz moduł Younga.

Do modelowania zachowania się elementu spiekane go w pracy wykorzystano model Druckera Pragera. Wyniki różniły się pomiędzy danymi literaturowymi, normami a rezultatami z testów rzeczywistych. Zaobserwowano także, iż w normach nie ma informacji o rodzaju materiału proszkowego, tzn. w jakim procesie produkcyjnym materiał ten został wytworzony.

Stworzono prototypowy model elementu spiekane go, bazując na analizie elementów skończonych w programie Abaqus. Model ten wskazał dalsze kierunki badań dotyczących właściwości elementów spiekanych.

Symulacja prób wytrzymałościowych oraz szeroki zakres badań umożliwiły opracowanie bazy materiałowej. Wiedza zdobyta podczas badań ułatwi standaryzację używanych materiałów do produkcji elementów spiekanych.

Porowatość badanych elementów spiekanych mieści się w przedziale (0,02-25)%. Dla tego samego rodzaju materiału porowatość różni się o około 10%.

Fraktografia przelomów pęknięć po teście wykazała, że w tych miejscach pojawia się segregacja miedzi oraz zawyżona ilość tlenków. Czystość badanych elementów także nie wykazywała wymaganej jakości; wiele zanieczyszczeń pojawiło się na powierzchni struktury.

3.

Badaniom wytrzymałościowym poddano także elementy spiekane wyprodukowane z materiału Fe-C-Cu (FC-0205 oraz FC-0208) próbki 18,4.26 oraz Fe-C (F-0005) próbki 2,17. Jednakże nie wykonano na tych materiałach tak kompleksowych badań jak w przypadku próbki 22.

Obserwacja z użyciem mikroskopu optycznego wykazała strukturę ferrytu oraz perlitu. Jest to typowy składnik fazowy dla badanych elementów. Struktura ta nie jest zależna od gęstości badanego kompaktu.

Próba rozciągania dla próbek Fe-C-Cu nie wykazała granicy plastyczności. Jednakże wraz ze wzrostem gęstości wzrasta wytrzymałość na rozciąganie. Dla gęstości $5,9 \text{ g/cm}^3$ zawiera się ona w przedziale 150-250 MPa, przy czym dla gęstości $6,9 \text{ g/cm}^3$ – w przedziale 260-480 MPa.

Dla próbek 4 oraz 18 wytrzymałość na rozciąganie mieści się w przedziale 150-500 MPa. Natomiast dla próbki 26 – w przedziale 150-350 MPa (wyniki leżą w mniejszym przedziale). Temperatura pokojowa i podwyższona nie zmienia własności materiału. Nie ma ona wpływu na wynik testu. Dane z testów próbek z dodatkową powłoką są bardziej skumulowane, czyli zbliżone – występujące w węższym zakresie wartości.

Próba ściskania dla próbek Fe-C-Cu wykazała, iż wraz ze wzrostem gęstości wzrastają parametry wykazujące wytrzymałość na ściskanie. Zakres dla PN 26 jest największy, wytrzymałość na ściskanie leży w zakresie 580-910 MPa, podczas gdy pozostałe próbki PN wykazują zakres wartości wyników 270-780 MPa.

Wytrzymałość na ściskanie jest wyższa dla próbek bez dodatkowej obróbki cieplnej. Natomiast moduł Younga jest wyższy dla próbek z dodatkową obróbką cieplną.

Dla próbek wyprodukowanych z materiału proszkowego Fe-C (F-0005), podobnie jak dla próbek Fe-C-Cu, próba rozciągania nie wykazała granicy plastyczności. Test w podwyższonej temperaturze 120°C nie indukuje różnicy wyników. Natomiast wraz ze wzrostem gęstości wzrasta wytrzymałość na rozciąganie, nawet dwukrotnie. Próbki poddane procesowi utleniania generują wyniki o węższym zakresie.

Próba ściskania próbek wyprodukowanych z materiału proszkowego Fe-C (F-0005) również wykazała wzrost Modułu Younga oraz wytrzymałości na ściskanie. Proces z dodatkową obróbką cieplną charakteryzuje się zdecydowanie wyższymi wartościami aniżeli

Wpływ składu chemicznego materiałów proszkowych na bazie żelaza na właściwości elementów spiekanych

Agnieszka Stanula

proces bez dodatkowej obróbki cieplnej. Próbki wyprodukowane z materiału 17 dają bardziej spójne wyniki w obrębie serii powtórzeń (próby) aniżeli próbki wyprodukowane z materiału proszkowego 2.

W toku badań zauważono, iż największy wpływ na wynik prób wytrzymałościowych ma rodzaj materiału proszkowego (gąbczasty lub rozpylony). Fakt ten potwierdza wiele źródeł literaturowych oraz zachowanie elementów spiekanych wytworzonych z proszku gąbczastego 2 oraz 26. Próbki te nie pękały przed zakończeniem testu i były w stanie zachować większość parametrów z próby ściskania oraz rozciągania.

4.

W ramach prac wdrożeniowych powstało stanowisko pracy umożliwiające wyznaczenie gęstości i porowatości metodą Archimedesesa. Badania te są wykonywane przy zatwierdzaniu elementu spiekane do produkcji seryjnej. Badania mikroskopowe stworzyły bazę wiedzy o strukturze elementów spiekanych wyprodukowanych z różnych materiałów proszkowych. Wdrożono także analizę utraty węgla podczas procesu produkcyjnego. Badania wykazały utratę węgla w badanym procesie konwencjonalnym na poziomie 0,1 % zgodnie z testem ASTM E1019. Zawartość procentowa węgla dostarczanego w materiale proszkowym powinna być równa zawartości procentowej węgla w wyprodukowanym elemencie spiekany. Utracony węgiel przelicza się na koszty oraz straty w procesie produkcyjnym.

W ramach prac wdrożeniowych stworzono model do symulacji elementów spiekanych. Wstępne badanie metodą elementów skończonych zobrazowało *status quo* oraz pokazało dalsze możliwe kierunki badań. Powinny się one koncentrować na tworzeniu modeli MES (Metoda Elementów Skończonych) głównie procesu zagęszczania, tworzenia wypraski. Wcześniejsza analiza etapu produkcyjnego jest w stanie wykazać potencjalne obszary późniejszych pęknięć dużo wcześniej aniżeli analiza ostatecznych elementów spiekanych.

Badania wykazały, iż najodpowiedniejszy dla badanego konwencjonalnego procesu spiekania jest rodzaj materiału, w tym przypadku – materiał gąbczasty. Skład chemiczny oraz gęstość elementu spiekane ma mniejszy wpływ oraz znaczenie na właściwości elementów spiekanych.

Słowa Kluczowe: metalurgia proszków, konwencjonalna metoda spiekania, gęstość, właściwości mechaniczne