

Gliwice, 16.10.2024

R E C E N Z J A
pracy doktorskiej
Pana mgra inż. Przemysława Sucheckiego
pod tytułem
„Synteza i właściwości kompozytów o osnowie geopolimerowej”
opracowana na zlecenie Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa
Politechniki Warszawskiej – pismo z dnia 31.07.2024 roku

Autor opiniowanej pracy doktorskiej pod tytułem: ” Synteza i właściwości kompozytów o osnowie geopolimerowej”, zajął się szczególnymi aspektami opracowania kompozycji stosunkowo nowej klasy materiałów inżynierskich jakimi są geopolimery oraz materiały kompozytowe na ich osnowie z potencjalnym ich wykorzystaniem w tych obszarach gdzie naturalna ich niepalność tworzy przewagę w stosunku do materiałów kompozytowych o osnowie syntetycznych żywic polimerowych. Tematyka pracy jest aktualna i atrakcyjna, opisuje zagadnienia nowe, dotychczas nie w pełni wyjaśnione i bez wątplenia mieści się w zakresie dyscypliny naukowej **Inżynieria Materiałowa**.

Materiały kompozytowe o osnowie geopolimerowej są grupą syntetycznych, nieorganicznych polimerów glinokrzemianowych wzmacnianych różnego rodzaju fazą zbrojącą pozwalającą na uzyskanie specyficznych własności często nieosiągalnych dla innych grup materiałowych. Właściwości te, to wysoka wytrzymałość na ściskanie i zginanie przy niskiej gęstości materiału osnowy, wysoka kwasoodporność oraz odporność na chlorki i siarczany, odporność na działanie czynników atmosferycznych, mrozoodporność, a także doskonała adhezja do stalowego zbrojenia oraz innych materiałów fazy zbrojącej. Wydawać się może, że otrzymanie materiału geopolimerowego jest proste, jednak w rzeczywistości wszystko zależy od surowców wejściowych wykorzystanych w jego syntezie, zawartość i stosunek tlenków krzemu i glinu w pierwszej mierze decydują o postaci tworzonych łańcuchów w procesie polimeryzacji, to z kolei decyduje o własnościach końcowych podobnie jak pozostałe

parametry technologiczne procesu, czas mieszania, temperatura syntezy, zastosowany utwardzacz oraz temperatura procesu utwardzania. Nie wystarczy zatem do bogatego w tlenki glinu i krzemu surowca dodać silnie zasadowego związku aby aktywowane chemicznie glinokrzemiany w reakcji poliaddycji zaczęły formować się w długie łańcuchy, ze względu na konieczność kształtowania własności końcowych wymagane jest precyzyjne określenie warunków syntezy.

Starania dotyczące poprawy własności użytkowych geopolimerów są rozwijane przede wszystkim pod kątem ich wykorzystania w budownictwie, jako beton nowej generacji jednak materiały kompozytowe na ich podstawie przez dobór składu chemicznego mieszaniny składników i fazy wzmacniającej stanowią obszar zainteresowania wielu ośrodków badawczych. Wynika to z ich doskonałych właściwości mechanicznych, które pozwalają konkurować materiałom geopolimerowym z tymi opartymi na cemencie portlandzkim lub innymi materiałami kompozytowymi o podstawie polimerowej. Nie bez znaczenia jest fakt, że proces wytwarzania geopolimerów umożliwia redukcję emisji CO₂ (zastępując cement portlandzki) oraz umożliwia wykorzystania bogatych w glinokrzemiany odpadów/produktów ubocznych z innych gałęzi przemysłu, takich jak mikrokrzemionka, popioły lotne, czy powstający przy wytwarzaniu aluminium z boksytów czerwony szlam. W sporym uproszczeniu można przyjąć, że własności użytkowe materiałów kompozytowych o podstawie geopolimerowej zależą przede wszystkim od składu chemicznego i fazowego osnowy, zastosowanej do jej wytworzenia technologii oraz własności materiału fazy wzmacniającej. Zależą one również od mikrostruktury, jej jednorodności, budowy morfologicznej, wytworzonej strefy przejściowej pomiędzy fazą wzmacniająco a osnową. Badania realizowane w zakresie materiałów geopolimerowych dotyczą głównie określenia warunków, nowych procesów ich wytwarzania oraz opracowania składu chemicznego i fazowego nowych materiałów, a materiały kompozytowe zwłaszcza ze wzmocnieniem o wysokiej ogniotrwałości charakterystycznej również dla materiału osnowy stanowią dodatkowo obszar zainteresowani przemysłu motoryzacyjnego, lotniczego i innych środków transportu.

Głównym celem naukowo-badawczym o charakterze poznawczym pracy jest opracowanie warunków syntezy wytworzonych przez Doktoranta materiałów geopolimerowych z zapewnieniem wysokiego stosunku atomowego krzemu Si do glinu Al, jako materiału osnowy dla materiałów kompozytowych o wysokiej niepalności i ogniotrwałości, a także określenie wpływu tych zabiegów na własności użytkowe w porównaniu do konwencjonalnych kompozytów polimerowych o podstawie żywicy epoksydowej.

Opiniowana praca doktorska mgra inż. Przemysław Sucheckiego złożona jest z zasadniczo dwóch części – studiów literaturowych oraz badań własnych, w których łącznie wydzielono 8 rozdziałów, po czym zamieszczono spis literatury, streszczenie w

języku polskim i angielskim zamieszczono na początku pracy. Doktorant zacytował 127 pozycji literaturowych, w tym większość prac obcojęzycznych i opublikowanych w ostatnim dziesięcioleciu. W pierwszej części przedstawiono wprowadzenie, ogólną charakterystykę materiałów kompozytowych oraz zalety wynikające z zastosowania osnowy geopolimerowej. W dalszej części dokonano ogólnej charakterystyki materiałów polimerowych pochodzenia organicznego i nieorganicznego. Tej drugiej grupie poświęcono więcej miejsca. Podano definicję geopolimerów, zwracając uwagę na podobieństwo strukturalne tych materiałów do materiałów polimerowych oraz dokonano klasyfikacji tych materiałów ze względu na budowę łańcucha geopolimerowego. Omówiono właściwości osnowy geopolimerowej oraz opisano obszary zastosowań tej grupy materiałów inżynierskich. Metody wytwarzania zarówno w ujęciu historycznym jak i w zaawansowanych technologiach zostały omówione w dalszej części rozprawy doktorskiej. Na zakończenie studiów literaturowych omówiono żywice epoksydowe i dokonano podsumowania tej części wskazując na umiejscowienie badań zawartych w pracy w kontekście badań naukowych zrealizowanych i opisanych w literaturze, wskazując że, kompozyty geopolimerowe mogą stanowić alternatywę dla materiałów kompozytowych opartych na żywicach epoksydowych. Cel i zakres pracy przedstawiono w rozdziale czwartym.

Badania własne rozpoczyna rozdział piąty opisujący metodykę badawczą przyjętą dla realizacji postawionych celów. Przedstawiony został opis technik badawczych wykorzystanych do oceny poprawności realizacji syntezy oraz badań mikrostrukturalnych, własności mechanicznych i fizycznych. W dalszej części Autor przedstawia przebieg procesu wytwarzania materiału geopolimerowego z uwzględnieniem zastosowanych materiałów i środków technicznych. W następnych podrozdziałach opisuje materiały wykorzystane jako faza wzmacniająca do wytworzenia kompozytów, charakteryzując w kolejności włókna bazaltowe, włókna lniane, płatki bawełniane oraz granulaty szklane pochodzący z recyklingu. Na koniec tej części opisuje sposób przygotowania referencyjnych próbek z żywicy epoksydowej. Rozdział szósty zawiera wyniki badań oraz omówienie wyników badań własnych, program tych badań obejmuje dobór czasu mieszania i parametrów utwardzania żywicy geopolimerowej, oraz porównanie własności wytworzonego materiału geopolimerowego z komercyjną żywicą epoksydową. Przedstawione w tej części wyniki obejmują badania jakości powierzchni, skurcz linowy, wytrzymałość na ścislenie, stabilność cieplną, badania termogravimetryczne, przewodnictwa cieplnego oraz mikrokalorymetrię. Kolejne podrozdziały przedstawiają wyniki badań nad wpływem rodzaju fazy wzmacniającej na własności kompozytów o osnowie geopolimerowej, i podobnie jak poprzednio dla materiałów bez wzmocnienia obejmują badania zmierzające do charakteryzacji tych materiałów. Część drugą rozprawy zamyka podsumowanie, w którym syntetycznie omówione zostały wyniki wykonanych badań i analiz, wyniki te zostały odniesione do

danych literaturowych. W ostatnim ósmym rozdziale zostały sformułowane wnioski wynikające z analizy uzyskanych wyników prowadzonych badań. Uważam, że Doktorant prawidłowo zaplanował i zastosował odpowiednie metody badawcze, które umożliwiły osiągnięcie założonych celów pracy.

Na podstawie wykonanych badań i uzyskanych wyników ustalono i zoptymalizowano warunki technologiczne wytwarzania materiału geopolimerowego o wysokim stosunku Si:Al w celu wykorzystania go jako materiału osnowy materiału kompozytowego o wysokiej odporności na zapłon i ogniotrwałości.

Doktorant udowodnił cel wykazując, że dobór odpowiednich składników bogatych w krzem Si i glin Al aktywowanych alkalicznie i utwardzanych w obecności najlepiej fosforanu glinu $AlPO_4$ jako utwardzacza, pozwala na przygotowanie żywicy geopolimerowej (w badanym przez Autora zakresie) o wymaganych własnościach. Wykorzystanie tego utwardzacza pozwalało na uzyskanie wytrzymałości na ściskanie podobnej do komercyjnej żywicy epoksydowej, a czas utwardzania powinien wynosić 10 minut przy 10% udziale utwardzacza i utwardzaniu w temperaturze 90 °C. Wykazano, że opracowane w tych warunkach żywice geopolimerowe charakteryzują się własnościami mechanicznymi zbliżonymi do odpowiedników epoksydowych pomimo niewielkiej porowatości zmierzonej w trakcie badań mikrotomograficznych. Niewątpliwie ogromną przewagą wytworzonych przez Doktoranta żywic geopolimerowych są ich własności cieplne wyznaczone w trakcie badań. Natura wytworzonych materiałów geopolimerowych gwarantuje niepalność i wysoka odporność na działanie ognia, potwierdzone zostało to zarówno w trakcie badań mikrokalorymetrycznych, badań termogravimetrycznych jak również w testach palności i stabilności cieplnej. Stworzono więc możliwość wytworzenie nowych materiałów kompozytowych do zastosowań wymagających ogniotrwałości i niepalności. Badania tych kompozytów wykazały ponadto, że dla uzyskania odpowiednich własności wymagana jest optymalizacja zarówno postaci jak również udziału objętościowego fazy wzmacniającej, jej zmienna zawartość decydowała o zmianach własności wytrzymałościowych nie wpływając jednak na ognioodporność i ogniotrwałość. Badania własności fizycznych potwierdziły wyniki z testów palności.

Praca pod względem edytorskim nie budzi zastrzeżeń, jest wykonana starannie, świadczy to o tym, że Autor w wystarczającym stopniu opanował techniki komputerowej edycji prac naukowych. Warte podkreślenia jest też to, że praca ma wyraźny charakter aplikacyjny i może przynieść wymierne korzyści w przypadku wykorzystania jej wyników w zastosowaniach przemysłowych.

W pełni pozytywnie oceniam opiniowaną pracę doktorską mgra inż. Przemysława Sucheckiego pod tytułem „**Synteza i właściwości kompozytów o osnowie geopolimerowej**”. Doktorant osiągnął postawione cele badawcze opiniowanej pracy doktorskiej. Uzyskane wyniki badań są wartościowe poznawczo, oryginalne i mogą mieć

znaczenie aplikacyjne. Praca cechuje się wystarczająco wysokim poziomem merytorycznym. Niestety, jak to zwykle bywa, zauważyłem pewne błędy edycyjne i niedociągnięcia o charakterze językowym w opiniowanej pracy doktorskiej, które nie wpływają jednak na znaczące obniżenie jej ogólnej pozytywnej oceny, a niektóre z nich mają być może jedynie charakter dyskusyjny. Uwagi te zostały przekazane Doktorantowi.

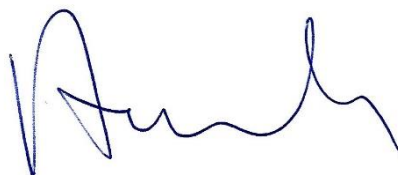
Podsumowując niniejszą recenzję opiniowanej pracy doktorskiej mgra inż. Przemysława Suheckiego pod tytułem „**Synteza i właściwości kompozytów o osnowie geopolimerowej**” wykonanej pod opieką promotorską prof. dr hab. inż. Małgorzaty Lewandowskiej, oceniam pozytywnie całokształt dokonań Doktoranta, jak również chcę zauważyć to, że w opiniowanej pracy Autor wykazał się:

- dobrą orientacją w poruszanej w literaturze problematyce geopolimerów i materiałów kompozytowych na ich osnowie,
- umiejętnością stawiania problemów badawczych i właściwego doboru komplementarnego i szerokiego zestawu metod badawczych oraz ich pełnego opanowania praktycznego,

ponadto,

- uzyskał wartościowe i oryginalne wyniki badań, o istotnym znaczeniu poznawczym i o walorach aplikacyjnych, oraz osiągnął założony cel naukowy,
- w wystarczającym stopniu opanował umiejętności opracowania wyników wykonanych badań oraz prezentowania osiągniętych rezultatów badawczych.

Z pełnym przekonaniem stwierdzam, że opiniowana praca doktorska spełnia wszelkie wymagania określone w odpowiednich przepisach prawa stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora i wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Warszawskiej w Warszawie o dopuszczenie Pana mgra inż. Przemysława Suheckiego do publicznej obrony.



Dr hab. inż. Marcin Adamiak, prof. PŚ