

# Załącznik 3

## Autoreferat dotyczący działalności naukowo-badawczej, dydaktycznej i organizacyjnej

### Zawartość:

- |      |   |        |
|------|---|--------|
| 1.   | Imię i nazwisko   | str.1  |
| 2.   | Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej  | str.1  |
| 3.   | Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych  | str.1  |
| 4.   | Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz wynikające z Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dn. 30 października 2015 r. | str.2  |
| 4.a. | Tytuł osiągnięcia naukowego   | str.2  |
| 4.b. | Publikacje lub inne prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego   | str.2  |
| 4.c. | Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania   | str.4  |
| 5.   | Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych  | str.12 |
| 6.   | Działalność dydaktyczna   | str.16 |
| 7.   | Działalność organizacyjna, współpraca naukowa i popularyzacja nauki   | str.17 |

## **1. Imię i nazwisko**

Michał Nitka

## **2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej**

1. Magister inżynier, 16.12.2004r., kierunek: budownictwo, specjalność: konstrukcje budowlane i inżynierskie. Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej. Temat pracy dyplomowej „Pałac sportu w Tbilisi: przykrycie kopułą”. Promotor: prof. dr hab. inż. Tadeusz Godycki - Ćwirko.

2. Doktor inżynier, 09.11.2010r., dziedzina: nauki techniczne, dyscyplina: inżynieria materiałowa, mechanika, inżynieria lądowa oraz elektrochemia. Uniwersytet Grenoble I, Francja. Tytuł pracy doktorskiej: „Multi-scale modelling of granular media” (fr: *“Modelisation multi-echelles des milieu granulaires”*, pol: *„Dwuskalowe modelowanie gruntów ziarnistych”*). Promotorzy pracy doktorskiej: prof. Jacques Desrues, prof. Cristian Dascalu i dr Gaël Combe; recenzenci: prof. Jean-Noël Roux i prof. Jean Sulem.

## **3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych**

1. 01.02.2007-30.04.2010: Uniwersytet Grenoble, Laboratorium 3S-R – stypendium rządu francuskiego (urlop bezpłatny na Politechnice Gdańskiej).

2. 01.07.2010-30.06.2011: Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska – asystent (pełny etat).

3. Od 01.07.2011: Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska – adiunkt z tytułem doktora (pełny etat).

#### **4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki**

##### **a. Tytuł osiągnięcia naukowego**

Model betonu na poziomie mezo-skali w metodzie elementów dyskretnych (DEM).

##### **b. Publikacje lub inne prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego**

1. **Nitka M.**, Tejchman J. 2013. Modelling of behaviour of plain concrete using DEM. *Particle-based methods III: Fundamentals and Applications*, 649-658 (publikacja w bazie Web of Science, pkt. MNiSW<sup>(2016)</sup>: 15).

2. **Nitka M.**, Tejchman J. 2014. Discrete modeling of micro-structure evolution during concrete fracture using DEM. *Euro-C, Computational modelling of concrete structures (1)*, 345-354 (publikacja w bazie Web of Science, pkt. MNiSW<sup>(2016)</sup>: 15).

3. **Nitka M.**, Tejchman J. 2014. Zastosowanie metody elementów dyskretnych do opisu procesu pęknięcia w betonie podczas jednoosiowego ściskania i rozciągania. *Inżynieria Morska i Geotechnika 5*, 527-536 (pkt. MNiSW<sup>(2016)</sup>: 6).

4. **Nitka M.**, Tejchman J. 2015. Modelling of concrete behaviour in uniaxial compression and tension with DEM. *Granular Matter 17(1)*, 145-164 (czasopismo z listy JCR, IF: 1.740, pkt. MNiSW<sup>(2016)</sup>: 30).

5. Skarżyński Ł., **Nitka M.**, Tejchman J. 2015. Modelling of concrete fracture at aggregate level using FEM and DEM based on x-ray microCT images of internal structure. *Engineering Fracture Mechanics 147*, 13-35 (czasopismo z listy JCR, IF: 2.024, pkt. MNiSW<sup>(2016)</sup>: 35).

6. **Nitka M.**, Tejchman J. 2015. Modelling of concrete at aggregate level using DEM based on x-ray microCT images of internal structure. *Particle-based methods IV – Fundamentals and Applications*, 343-354 (publikacja w bazie Web of Science, pkt. MNiSW<sup>(2016)</sup>: 15).

7. **Nitka M.**, Skarżyński Ł., Tejchman J. 2015. Simulations of Fracture in concrete beams under bending using a continuum and discrete approach. *Computational plasticity XIII: Fundamental and Applications*, 1065-1076 (publikacja w bazie Web of Science, pkt. MNiSW<sup>(2016)</sup>: 15).
8. Suchorzewski J., **Nitka M.**, Tejchman J. 2015. Modelowanie jednoosiowego rozciągania i ściskania betonu na poziomie kruszywa. *Przegląd Budowlany* 11, 22-25 (pkt. MNiSW<sup>(2016)</sup>: 5).
9. **Nitka M.**, Tejchman J. 2017. DEM analysis of effect of interfacial transitional zones on fracture in concrete. *Particle-based methods – Fundamentals and Applications*, 249-260 (publikacja w bazie Web of Science, pkt. MNiSW<sup>(2016)</sup>: 15).
10. Suchorzewski J., **Nitka M.**, Tejchman J. 2018. Discrete elements method simulations of fracture in concrete under uniaxial compression based on its real internal structure. *International Journal of Damage Mechanics* 27(4), 578-607 (czasopismo z listy JCR, IF: 1.761, MNiSW<sup>(2016)</sup>: 35).
11. **Nitka M.**, Tejchman J. 2018. A three-dimensional meso-scale approach to concrete fracture based on combined DEM with x-ray CT images. *Cement and Concrete Research* 107, 11-29 (czasopismo z listy JCR, IF: 5.430, pkt. MNiSW<sup>(2016)</sup>: 45).
12. Suchorzewski J., **Nitka M.**, Tejchman J. 2018. Experimental and numerical investigations of concrete behaviour at meso-level during quasi-static splitting tension. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 96, 720-739 (czasopismo z listy JCR, IF: 2.215, pkt. MNiSW<sup>(2016)</sup>: 30).
13. Suchorzewski J., Tejchman J., **Nitka M.**, Bobiński J. 2019. Meso-scale analyses of size effect in brittle materials using DEM. *Granular Matter* 21 (9), <https://doi.org/10.1007/s10035-018-0862-6> (czasopismo z listy JCR, IF: 1.658, pkt. MNiSW<sup>(2016)</sup>: 30).
14. **Nitka M.**, Tejchman J. 2018. Effect of interfacial transitional zones on concrete behaviour in DEM analyses. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> European Conference on Computational*

*Mechanics (Solids, Structures and Coupled Problems)*, 1534-1543 (publikacja zgłoszona do bazy Web of Science, pkt. MNiSW<sup>(2016)</sup>: 5).

**Dla powyższych publikacji sumaryczny Impact Factor wynosi: 14.828 (zgodnie z rokiem opublikowania). Sumaryczna liczba punktów MNiSW (wg 2016r.): 296 pkt. (udział własny to 120,10 pkt.).**

**c. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania**

Pękanie jest najbardziej istotnym procesem mechanicznym wewnątrz elementów i konstrukcji betonowych. Jego zrozumienie jest ogromnie ważne dla bezpieczeństwa konstrukcji betonowych i optymalizacji zachowania się betonu. Jego przebieg charakteryzuje się złożonymi procesami mechanicznymi takimi jak: powstanie i rozwój oraz łączenie mikro-rys, które prowadzą później do lokalizacji odkształceń i makro-rys. Pękanie powoduje spadek wytrzymałości oraz sztywności i ostatecznie prowadzi do zniszczenia części, bądź całej konstrukcji. Jest to proces bardzo skomplikowany ze względu na niejednorodną strukturę betonu, zarówno w wytrzymałości i sztywności pojedynczych składników, jak i ich różną wielkość (od kilku nanometrów dla uwodnionego cementu do kilkunastu milimetrów dla kruszywa). Proces ten w dużym stopniu zależy np. od zagęszczenia, wielkości, kształtu i szorstkości kruszywa oraz porowatości zaprawy. Dlatego też do realistycznego opisu betonu z uwzględnieniem pękania, konieczne jest uwzględnienie jego mezo-struktury. Beton na poziomie mezo-skali może być opisany jako materiał 4-fazowy składający się z: kruszywa, zaprawy cementowej, makro-porów i warstw przejściowych między kruszywem a zaprawą cementową. Szczególnie istotne są strefy przejściowe, które są bardzo porowate i w których inicjowane są mikro-risy. Ich szerokość zależy od kształtu i szorstkości kruszywa, stosunku w/c zaprawy cementowej oraz kierunku betonowania.

Większość modeli betonu stosuje wiele uproszczeń w obliczeniach wytrzymałościowych, takich jak: jednorodność materiału, uproszczony model konstytutywny, brak efektu skali. Nawet bardziej zaawansowane modele naukowe zazwyczaj nie uwzględniają mikrostruktury betonu, która ma ogromny wpływ na globalną sztywność i wytrzymałość elementów. Zniszczenie konstrukcji inżynierskich wykonanych z betonu (lub żelbetu) jest konsekwencją ich zarysowań i pęknięć w mikro skali. Dlatego podczas realistycznego modelowania materiału należy wziąć pod uwagę jego heterogeniczność. Istnieją dwa główne sposoby

modelowania betonu na poziomie mezo-struktury: ciągłe i dyskretne. Pierwsza grupa jest oparta głównie na obliczeniach metodą elementów skończonych (MES) na bazie modeli konstytutywnych dla betonu, wzbogaconych o długość charakterystyczną. Druga grupa jest oparta na metodach dyskretnych (np. modele siatkowe i modele metody elementów dyskretnych (DEM)). W podejściu dyskretnym elementy modelowane są jako osobne bloki, które mogą się od siebie odrywać i przemieszczać, co w naturalny sposób pozwala modelować pęknięcia. Główną zaletą tych modeli jest fakt, że bezpośrednio symulują mikrostrukturę i mogą być stosowane do badania lokalnych zjawisk na poziomie mikro, takich jak mechanizm inicjacji, wzrostu i powstawania lokalizacji i pęknięć, które wpływają na zachowanie betonu w skali makro.

Moja działalność naukowa po uzyskaniu stopnia doktor koncentrowała się na stworzeniu wiarygodnego modelu betonu w ramach DEM do badania procesu pęknięcia na poziomie mezo-skali i optymalizacji właściwości betonu odnośnie sztywności, wytrzymałości i kruchości.

Nowe elementy mojej działalności naukowej obejmowały: a) zaimplementowanie autorskiego modelu betonu do metody elementów dyskretnych, b) dokładną analizę pęknięcia w betonie na poziomie kruszywa z uwzględnieniem różnych właściwości jego składników oraz c) rozbudowę modelu DEM o możliwość dokładnego odwzorowania rzeczywistej mezo-struktury betonu na podstawie zdjęć 3D wykonanych mikro-tomografem komputerowym najnowszej generacji. Wykonałem obszerne symulacje numeryczne 2D i 3D dla elementów betonowych podczas ściskania, rozciągania, rozłupywania i zginania, które zostały następnie porównane z odpowiadającymi im doświadczeniami (własnymi i z literatury). Elementy betonowe zostały obciążane monotonicznie w obszarze statycznym. Do obliczeń numerycznych wykorzystano otwartą platformę do obliczeń dyskretnych YADE (stworzoną na Uniwersytecie Grenoble, Francja).

Moje badania naukowe zostały podzielone na trzy (omówione niezależnie) zagadnienia:  
A) implementacja modelu DEM dla betonu na poziomie mezo-skali do platformy YADE,  
B) odwzorowanie rzeczywistej mezo-struktury betonu w modelu DEM na podstawie badań doświadczalnych z użyciem mikro-tomografu komputerowego najnowszej generacji,  
C) analiza różnych zjawisk mezo-strukturalnych zachodzących podczas pęknięcia betonu.

## A) Implementacja modelu DEM dla betonu na poziomie mezo-skali do platformy YADE

Moim celem była implementacja nowego modelu dla betonu na poziomie kruszywa z uwzględnieniem jego mezo-struktury i 4 różnych faz (kruszywa, zaprawy cementowej, makro-porów i stref przejściowych). Modele betonu w literaturze światowej skupiają się na 1-fazowym prawie materiałowym, jednocześnie zupełnie pomijając jego wewnętrzną strukturę. Moim zadaniem było numeryczne odwzorowanie wewnętrznej mikrostruktury betonu z implementacją prostych praw materiałowych (np. zmodyfikowane prawo Mohra-Coulomba). Obecny model 4-fazowy betonu wymaga tylko pięciu stałych materiałowych: modułu Younga kontaktu, współczynnika Poissona kontaktu, kąta tarcia pomiędzy elementami, maksymalnej siły kohezji i minimalnej siły rozciągającej między elementami. Zachowanie betonu zależy więc w głównej mierze od przyjętej geometrii i struktury próbki (wielkości i ilość kruszywa, zagęszczenia zaprawy cementowej, wielkości i ilość makroporów itp.). Model dla betonu nie zawiera osłabienia materiałowego. Obliczenia 2D i 3D wykonano dla materiału 1, 3 i 4-fazowego. Zbadano szczegółowo wpływ stałych materiałowych oraz wielkości elementów dyskretnych (kruszywo i zaprawa cementowa) na wyniki pęknięcia. Opracowałem dodatkowo autorski sposób przygotowywania dowolnej wstępnej porowatości betonu. Wprowadzone modyfikacje na platformie YADE wykraczały poza standardowe jej użytkowanie. Efektywność modelu DEM została sprawdzona podczas jednoosiowego ściskania i jednoosiowego rozciągania betonu. Porównałem zarówno wyniki makroskopowe, jak i sposób zarysowania się elementów betonowych. Szczególnie istotne dla zwiększenia zgodności z badaniami laboratoryjnymi okazało się wprowadzenie stref przejściowych do modelu (ITZ – ang. interfacial transition zones).

Wyniki tej części pracy zostały opublikowane w artykułach: I.B.1-4, I.B.8 (zał. 5) oraz zaprezentowane na międzynarodowych konferencjach np. *FraMCoS* (2013), *Particle* (2013), *Euro-C* (2014) (zał. 5: II.L).

[4] **Nitka M.**, Tejchman J. 2015. Modelling of concrete behaviour in uniaxial compression and tension with DEM. *Granular Matter* 17(1), 145-164.

## **B) Odwzorowanie rzeczywistej mezo-struktury betonu w modelu DEM na podstawie badań doświadczalnych z użyciem mikro-tomografu komputerowego najnowszej generacji**

W pierwszym kroku badań wykonałem doświadczenia laboratoryjne obejmujące testy 3-punktowego zginania belek betonowych z nacięciem w środku. Dobrana mieszanka betonowa odpowiadała rzeczywistej używanej w budownictwie (kruszywo do 16 mm średnicy). Po wykonaniu doświadczeń, wycięto próbki ze zniszczonej, środkowej części belek a następnie wstawiono je do nowoczesnego mikro-tomografu komputerowego Skyscan 1173. W ten sposób otrzymano przestrzenną mezo-strukturę betonu (położenie i kształt kruszywa oraz makro-porów, mikroporowatość, położenie i kształt rys). W DEM zamodelowałem kruszywa o nieregularnym kształcie jako grona złożone ze sztywnych kul. Pod mikroskopem elektronowym Hitachi TM3030 pomierzono szerokości stref przejściowych (ITZ) na powierzchni betonu oraz ich porowatość. Stworzyliśmy specjalny algorytm pozwalający odczytać wartość porowatości na podstawie zdjęcia z mikroskopu elektronowego. Średnia ich szerokość wynosiła 20-50  $\mu\text{m}$ , a porowatość 10-25% (porowatość zaprawy cementowej określona na podstawie wyników uzyskanych z mikro-tomografu komputerowego określona została na poziomie od 3 do 5%).

Wykonałem obliczenia 2D dla belek zginanych. Dodatkowo założyłem, że tylko środkowa część belki będzie modelowana z pełną mikrostrukturą (pozostałą część zamodelowałem z większych, jednofazowych elementów). Przyspieszyło to znacznie obliczenia, nie wpływając na ostateczne wyniki. Stałe materiałowe w obliczeniach numerycznych DEM przyjęto na podstawie doświadczeń jednoosiowego ściskania i jednoosiowego rozciągania. Otrzymano bardzo dobrą zgodność wyników DEM z doświadczeniami odnośnie krzywej siła-CMOD (rozwarcie rysy – ang. Crack Mouth Opening Displacement) oraz położenia i krzywizny makro-rysy. W obliczeniach zbadano również wpływ parametrów strefy przejściowej na krzywą wytrzymałościową oraz kształt makro-rysy.

Wyniki przedstawiono w artykułach I.B.5-7 (zał. 5) oraz podczas międzynarodowych konferencjach np. *CFRAC* (2015), *Particles* (2015), *FraMCoS* (2016), *EMMC15* (2016), *ECCOMAS* (2017) (zał. 5: II.L).



[5] Skarżyński Ł., **Nitka M.**, Tejchman J. 2015. Modelling of concrete fracture at aggregate level using FEM and DEM based on x-ray microCT images of internal structure. *Engineering Fracture Mechanics* 147, 13-35.

Następnie wykonano obliczenia DEM dla ściskania i rozłupywania betonu w oparciu o własne badania doświadczalne dla kostek sześciennych (ściskanie) i walców (rozłupywanie). Zbadano także wpływ kształtu kruszywa na wyniki (m.in. zastosowaliśmy okrągłe kruszywa z dna morza „Baltex”, które charakteryzowało się gładką powierzchnią). W badaniach pod mikroskopem elektronowym stwierdziliśmy, że strefa przejściowa jest znacznie węższa niż przy zastosowaniu zwykłego kruszywa łamanego. Zbadano także wpływ warunków brzegowych i wielkości próbek. Bezpośrednie porównanie wyników laboratoryjnych i obliczeń numerycznych z ziarnami modelowanymi jako kule lub grona (o kształtach na podstawie zdjęć z mikro-tomografu komputerowego) pozwoliły jednoznacznie stwierdzić, że kształt ziaren ma znaczny wpływ zarówno na krzywą siła-przemieszczenia i na kształt makro-rysy. W doświadczeniach i obliczeniach rozłupywania sterowano rozwarciem rysy (w tym celu napisałem specjalny algorytm numeryczny umożliwiający takie sterowanie w DEM). Wyniki numeryczne wykazały ponownie bardzo dobrą zgodność z doświadczeniami.

Wyniki z badań laboratoryjnych i obliczeń numerycznych DEM zamieszczono w I.B.10, I.B.12 i I.B.13 (zał. 5) i przedstawiono na międzynarodowych konferencjach (zał. 5: III.B).

[10] Suchorzewski J, **Nitka M.**, Tejchman J. 2018. Discrete elements method simulations of fracture in concrete under uniaxial compression based on its real internal structure. *International Journal of Damage Mechanics* 27(4), 578-607.

[12] Suchorzewski J, **Nitka M.**, Tejchman J. 2018. Experimental and numerical investigations of concrete behaviour at meso-level during quasi-static splitting tension. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 96, 720-739.

[13] Suchorzewski J., Tejchman J., **Nitka M.**, Bobiński J. 2019. Meso-scale analyses of size effect in brittle materials using DEM. *Granular Matter* 21 (9), <https://doi.org/10.1007/s10035-018-0862-6>.

Wykonałem następnie obliczenia numeryczna w warunkach 3D dla zginania. Kruszywa modelowałem jako kule lub grona na podstawie skanów z mikro-tomografu. Do automatycznego przenoszenia obrazów kruszywa 3D po rekonstrukcji skanów z mikro-tomografu napisaliśmy specjalny program, który tworzył mapę gęstości próbki betonowej i

zamieniał ją na mapę wokseli o danych współrzędnych. Następnie woksele o takiej samej gęstości zastępowałem elementami dyskretnymi, połączonymi w sztywne grona. Dzięki temu stworzyłem możliwość szybkiej implementacji rzeczywistej mezo-struktury betonu w warunkach 3D. Przestrzenny kształt rysy w belce zginanej został odwzorowany w sposób bardzo dokładny w porównaniu z badaniem laboratoryjnym (przebieg przestrzenny po szerokości i wysokości próbki). Obliczenia 3D z uwzględnieniem rzeczywistej mezo-struktury mogą w przyszłości zastąpić drogie i czasochłonne badania laboratoryjne.

Wyniki z badań laboratoryjnych i obliczeń numerycznych DEM zamieściłem w artykułach I.B.11, I.B.14 (zał. 5) i zaprezentowałem na międzynarodowych konferencjach np. *Eccomas* (2017), *Particle* (2017), *Euro-C* (2018) i *ECCM-ECFD* (2018) (zał. 5: II.L).

[11] **Nitka M.**, Tejchman J. 2018. A three-dimensional meso-scale approach to concrete fracture based on combined DEM with x-ray CT images. *Cement and Concrete Research* 107, 11-29.

Obecnie model DEM dla betonu został rozszerzony o obecność stref przejściowych między kruszywem a zaprawą o określonej szerokości z większą porowatością. Stworzyłem program, który umożliwia tworzenie próbek numerycznych o różnym stopniu porowatości w sąsiedztwie kruszywa, zachowując mikro-porowatość zaprawy cementowej. Porowatość strefy przejściowej została określona na podstawie zdjęcia powierzchni betonu z mikroskopu elektronowego (z użyciem autorskiego kodu). Obecny model będzie zastosowany do obliczania przepływów wilgoci i ciepła w betonie po sprzężeniu z Computational Fluid Dynamics (CFD).

Wyniki numeryczne DEM zaprezentowałem na konferencji *ECCM-ECFD* (2018) (Zał.5: I.B.14).

### **C) Analiza różnych zjawisk mezo-strukturalnych podczas pęknięcia betonu**

Metoda elementów dyskretnych (DEM) pozwala na bardzo dokładną analizę pęknięcia, obejmująca powstawanie i rozwój mikro-rys, powstawanie makro-rys itp. Podczas pęknięcia różne zjawiska mezo-strukturalne były badane, takie jak: łańcuchy sił, normalne siły kontaktu, styczne siły kontaktu, pęknięte kontakty, obroty ziaren, lokalne porowatości, lokalne energie, szerokości rys i lokalizacji itp. W obliczeniach numerycznych otrzymałem, zaobserwowane również w laboratorium w trakcie eksperymentu, łączenie się ze sobą mikro-

rys (ang. bridging) i rozgałęzianie się rys, na przykład na około jednego kruszywa (ang. branching). W modelu numerycznym zaobserwowałem również blokowanie się elementów w rysie (ang. interlocking), który powodował powstawanie znacznych sił ścinających na brzegach rysy.

Wyniki zaprezentowane były w artykułach I.B.1-12 (zał. 5) i na międzynarodowych konferencjach (zał. 5: III.L).

[4] **Nitka M.**, Tejchman J. 2015. Modelling of concrete behaviour in uniaxial compression and tension with DEM. *Granular Matter* 17(1), 145-164.

[10] Suchorzewski J, **Nitka M.**, Tejchman J. 2018. Discrete elements method simulations of fracture in concrete under uniaxial compression based on its real internal structure. *International Journal of Damage Mechanics* 27(4), 578-607.

[11] **Nitka M.**, Tejchman J. 2018. A three-dimensional meso-scale approach to concrete fracture based on combined DEM with x-ray CT images. *Cement and Concrete Research* 107, 11-29.

[12] Suchorzewski J, **Nitka M.**, Tejchman J. 2018. Experimental and numerical investigations of concrete behaviour at meso - level during quasi - static splitting tension. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 96, 720-739.

Obliczenia energii zostały wykonane dla całych elementów betonowych lub z podziałem na obszary pękania i sąsiednie obszary odciążenia. Algorytm stworzony przeze mnie pozwalał na obliczaniu energii tylko z obszaru przyszłej lokalizacji (i osobno poza nią), a nie z całego elementu. Obliczenia pozwoliły na lepsze zrozumienie efektu skali w betonie związanego ze spadkiem wytrzymałości i ciągliwości w dużych elementach.

Wyniki przedstawiłem w artykule I.B.13 (zał. 5) i na międzynarodowych konferencjach (zał. 5: III.L).

[13] Suchorzewski J., Tejchman J., **Nitka M.**, Bobiński J. 2019. Meso-scale analyses of size effect in brittle materials using DEM. *Granular Matter* 21 (9), <https://doi.org/10.1007/s10035-018-0862-6>.

Wyniki DEM pokazały możliwość wczesnego przewidywania położenia makro-rys na podstawie analizy wytrzymałości kontaktów oraz aktualnych sił i przemieszczeń wykorzystując np. kryterium minimalnej energii powierzchniowej Griffitha.

Wyniki numeryczne zostały zaprezentowane w artykułach oraz na międzynarodowych konferencjach *Powder and Grain* (2017) i *Euro-C* (2018) (zał. 5: II.E.14, II.E.16).

### **Podsumowanie:**

Wyniki symulacji numerycznych elementów betonowych pokazały zdolność modelu dyskretnego DEM opartego na rzeczywistej mezo-strukturze betonu do wiarygodnego opisu zachowania się elementów betonowych pod obciążeniem na poziomie makro-skali i meso-skali. Model uwzględnia 4 fazy betonu: kruszywo, zaprawę cementową, makro-pory oraz strefy przejściowe między kruszywem a zaprawą. Weryfikacja modelu DEM została przeprowadzona dla różnych problemów brzegowych (jednoosiowe ściskanie, jednoosiowe rozciąganie, rozłupywanie, zginanie), a wyniki zostały bezpośrednio porównane z wynikami własnych badań doświadczalnych i wynikami badań doświadczalnych znalezionych w literaturze. Otrzymano bardzo dobrą zgodność wyników DEM z doświadczeniami odnośnie wytrzymałości, ciągliwości i pęknięcia betonu. Tak zaawansowane obliczenia, oparte na wewnętrznej geometrii próbek betonowych, nie są dostępne w żadnym komercyjnym programie.

Do najważniejszych osiągnięć badań naukowych należą:

- zaproponowanie nowatorskiego modelu w metodzie elementów dyskretnych do opisu betonu na poziomie mezo-skali z uwzględnieniem pęknięcia. Model uwzględnia 4 podstawowe fazy betonu: kruszywo, zaprawę cementową, makro-pory i strefy przejściowe,
- zaproponowanie metody tworzenia zagęszczonych próbek i implementacja kodu do platformy YADE,
- obszerne obliczenia numeryczne DEM z rzeczywistą mezo-strukturą betonu, opartą na zdjęciach przestrzennych z mikrotomografu komputerowego,
- szczegółowe analizy zjawiska pęknięcia w betonie na poziomie kruszywa,
- stworzenie autorskiego programu tworzącego różne 3D kształty ziaren kruszywa na podstawie zdjęć z mikrotomografu komputerowego (wykorzystując woksele o podobnych gęstościach).

Uzyskane wyniki DEM mogą być zastosowane do:

- ulepszenia praw konstytutywnych dla betonu w ramach mechaniki ośrodków ciągłych (np. odnośnie modelu ewolucji uszkodzeń, długości charakterystycznej, momentu powstania makro-rys),
- optymalizacji mieszanki betonowej odnośnie sztywności, wytrzymałości i ciągliwości w zależności od wielkości, zagęszczenia, kształtu, szorstkości kruszywa oraz obecności różnych dodatków podczas prostych testów doświadczalnych,
- przewidywania pęknięcia w betonie.

W następnym etapie pracy naukowej, model DEM dla betonu zostanie rozszerzony o pęknięcie kruszywa, strefy przejściowe o danej szerokości, stalowe włókna i dodatki w formie mikro-sfer. Model DEM zostanie sprzężony z Computational Fluid Dynamics (CFD) do modelowania przepływu wilgoci i ciepła w betonie.

## **5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych**

### **Przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora**

Po ukończeniu kursu doktoranckiego w Politechnice Gdańskiej rozpocząłem moją działalność naukowo-badawczą w laboratorium 3S-R na Uniwersytecie Grenoble we Francji, otrzymując stypendium doktoranckie ministerstwa Francji (od 02.2007). Na początku zapoznałem się z prowadzonymi pracami naukowymi oraz literaturą dotyczącą modelowania materiałów granulowanych metodą elementów skończonych (MES) i metodą elementów dyskretnych (DEM). Pod kierownictwem prof. C. Dascalu uczyłem się numerycznej homogenizacji materiałów oraz MES, dr. G. Combe zapoznał mnie z DEM oraz programowaniem (FORTRAN, Matlab i C++), a prof. J. Desruese pomógł mi ze zrozumieniem zagadnień dwuskalowych i eksperymentów geotechnicznych.

Tematem mojej pracy doktorskiej było dwuskalowe modelowanie materiałów ziarnistych, polegające na połączeniu obliczeń DEM na poziomie ziaren z obliczeniami MES na poziomie globalnym. Macierz sztywności na poziomie globalnym została wyznaczona na podstawie obliczeń DEM. Razem z moim promotorem zmodyfikowałem jego autorski dyskretny kod numeryczny, aby nadawał się do współpracy z MES. Zaimplementowałem periodyczne warunki brzegowe, co wyeliminowało problem wielkości próbki (mogłem

stosować mniejsze próbki obliczeniowe, otrzymując równoważne wyniki). W obliczeniach DEM przeprowadziłem również szczegółową analizę stabilności tensora akustycznego. Po przeprowadzeniu homogenizacji numerycznej, dane ze skali DEM przenieśliśmy do MES. Na poziomie makro wykorzystaliśmy otwarty kod FlagShyp, który wymagał jednak znacznych modyfikacji w celu połączenia go z DEM. Prawa konstytutywne wraz z macierzą sztywności były obliczane bezpośrednio z poziomu ziaren. Obliczenia DEM były przeprowadzone w każdym z punktów całkowania. W MES obliczono odkształcenia węzłów siatki, które przenoszone były skalę niżej do DEM.

Obie metody DEM i MES zostały połączone w jeden program obliczeniowy. Dzięki zastosowaniu własnego, autorskiego algorytmu obliczeniowego, możliwe było zrównoleglenie obliczeń na wiele procesorów, co znacznie przyspieszyło obliczenia. Wykonałem obliczenia numeryczne dla typowych testów geotechnicznych (edometr, ścinanie, dwu-osiovego ścinanie z i bez zmiany objętości) i porównałem je z innymi obliczeniami numerycznymi jednoskalowymi. Rozprawa doktorska o temacie „*Dwuskalowe modelowanie gruntów ziarnistych*” (fr. „*Modelisation multi-echelles des milieus granulaires*”) została napisana po angielsku i obroniona w dniu 09.11.2010r. w Grenoble.

Uzyskane wyniki zostały zamieszczone w artykule z listy JCR II.A.1 (zał. 5) i zaprezentowane na krajowych i międzynarodowych konferencjach np. *Powder and Grains* (2009), *ComGeo* (2009), *Multiscale Modeling* (2010), *IWBBDG* (2011).

[Zał. 5, II.A.1] **Nitka M.**, Combe G., Dascalu C., Desrues. J. 2011. Two-scale modeling of granular materials: a DEM-FEM approach. *Granular Matter* 13 (3), 277-281.

### **Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora**

W lipcu 2010r. rozpocząłem pracę w Politechnice Gdańskiej na stanowisku asystenta (pełen etat) w Katedrze Budownictwa i Inżynierii Materiałowej, a następnie od lipca 2011r. kontynuowałem pracę na stanowisku adiunkta (pełen etat). Moja główna działalność naukowa polegała na modelowaniu zjawisk na poziomie mezo-skali zachodzących w betonie stosując metodę elementów dyskretnych (DEM). Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze po uzyskaniu stopnia doktora stanowiły uzupełnienie lub rozszerzenie podstawowej działalności naukowej. Prace badawcze można podzielić na cztery główne grupy:

- A. kontynuacja prac nad modelem dwuskalowym dla materiałów ziarnistych i betonu,
- B. numeryczna analiza stref ścinania w materiałach granulowanych stosując DEM,

- C. metody wczesnego wykrywania rys w betonie,
- D. modelowanie pęknięcia skał pod wpływem ciśnienia hydraulicznego w procesie hydroszczelinowania stosując sprzężone podejście DEM/CFD.

### **Ad.A. Kontynuacja prac nad modelem dwuskalowym dla materiałów ziarnistych i betonu**

Po zakończeniu doktoratu, kontynuowałem rozwój modelu dwuskalowego. Szczególny nacisk położyłem na kod dyskretny, który udoskonalałem. Z uwagi na to, że moje zainteresowania naukowe skierowały się na modelowanie betonu, zmodyfikowałem kod dyskretny, aby był w stanie opisywać ten materiał. Wyniki dwuskalowe przedstawiłem w artykułach (zał.5: II.E.6-7, II.E.10) oraz na konferencjach krajowych i międzynarodowych np. *FraMCoS* (2013), *Euro-C* (2014).

### **Ad.B. Numeryczna analiza strefy ścinania w materiałach granulowanych stosując DEM**

Wykonałem obszerne obliczenia metodą elementów dyskretnych dla przemieszczającej się ścianki w materiale granulowanym. Otrzymałem dobra zgodność z wynikami doświadczalnymi i wynikami metodą elementów skończonych. Metoda dyskretna pozwoliła na uzyskanie wielu interesujących informacji dzięki bezpośredniemu modelowaniu mikrostruktury materiału (dot. między innymi obecności naprzemiennej lokalnej dylatacji i kontrakcji oraz wirów w strefach ścinania). Wirami nazwaliśmy obrót sztywny grupy ziaren wokół jednego punktu, które mogłem obserwować dzięki zastosowaniu algorytmu do zobrazowania średnich przemieszczeń (ang. displacement fluctuation). Wiry okazały się być świetnym wskaźnikiem do wczesnego wykrywania stref ścinania. Dalszą analizą wyników zajmował się prof. Kozicki, który opracował metodę rozkładu pola przemieszczeń Helmholtz'a-Hodge'a.

Wyniki zaprezentowałem w artykule z listy JCR (zał. 5: II.A.2) oraz na krajowych i międzynarodowych konferencjach np. *Particles* (2013, 2015), *Powders and Grains* (2013), *IWBDG* (2015), *Geomechanics from Micro to Macro* (2015).

[Zał. 5, II.A.2] **Nitka M.**, J. Tejchman J., Kozicki J., Leśniewska D. 2015. DEM analysis of micro-structural events within granular shear zones under passive earth pressure conditions. *Granular Matter* 17 (3), 325-343.

Praca nad problemem ścianki w materiale ziarnistym zaowocowała ścisłą współpracą z prof. D. Leśniewską (Politechnika Koszalińska) i uczestnictwem w grantie NCN pod jej kierunkiem (zał.5: II.J.2). Obecnie wykonuję symulacje DEM dla parcia aktywnego sztywnej ściany na materiał ziarnisty. Nacisk jest położony na rozkład sił kontaktów w ziarnach. Własny algorytm do tworzenia próbek, pozwala mi uzyskać porowatości identyczne jak w doświadczeniach (wskaźnik porowatości poniżej 0.5). Wyniki numeryczne zostały porównane z wynikami doświadczeń, gdzie użyto techniki światła spolaryzowanego.

Wyniki porównawcze doświadczenia i obliczeń numerycznych zaprezentowałem na konferencji *IWBGD* (2017).

#### **Ad.C. Metody wczesnego wykrywania rys w betonie**

Wspólnie z Uniwersytetem w Melbourne, Australia (prof. A. Tordesillas) opracowujemy metodę wczesnego wykrywania zarysowania w betonie na podstawie rozkładu i ewolucji sił kontaktowych z uwzględnieniem wytrzymałości kontaktów i aktualnych sił kontaktowych w modelu DEM. Metoda ta została poszerzona o kryterium minimalnej energii powierzchniowej w przekrojach wg teorii Griffitha.

Wyniki obliczeń dla betonu zostały zaprezentowane na międzynarodowych konferencjach: *Powder and Grains* (2017) i *Euro-C* (2018).

#### **Ad.D. Modelowanie pękania skał pod wpływem ciśnienia hydraulicznego w trakcie hydro-szczelinowania stosując sprzężone podejście DEM/CFD**

Najnowszym obszarem mojego naukowego zainteresowania jest modelowanie pękania skał naturalnych pod wpływem ciśnienia hydraulicznego w trakcie procesu hydro-szczelinowania. Praca naukowa rozpoczęła się 2 lata temu od współpracy z Państwowym Instytutem Geologicznym w Warszawie w ramach grantu BLUE GAS - POLISH SHALE GAS. Razem z kolegami z katedry pod kierownictwem prof. J. Tejchmana rozszerzyliśmy program elementów dyskretnych o obecność płynu na bazie CFD. Nowością programu było dokładne odzwierciedlenie zmian geometrycznych i topologicznych skał w celu dokładnego śledzenia zmian ciśnienia w porach. Przeprowadziłem szereg obliczeń modelem sprzężonym DEM/CFD dla skał o różnej strukturze wewnętrznej. Następnie kontynuowaliśmy program badawczy, poszerzając i ulepszając model obliczeniowy (np. dodana została dodatkowa faza



gazu). Nasza praca zaowocowała uzyskaniem grantu NCN w 2019r. przez prof. J. Tejchmana (zał.5: II.J.5), w którym teraz uczestniczę.

Wyniki z hydro-szczelinowania zostały omówione w artykule z list JCR, który jest w recenzji oraz na konferencjach międzynarodowych np. *YADE Workshop* (2018), *ComGeo* (2018), *ECCM-ECFD* (2018).

*W czasie mojej pracy naukowej byłem w sumie współautorem 8 artykułów w czasopismach z listy JCR: Granular Matter (4), Engineering Fracture Mechanics (1), International Journal of Damage Mechanics (1), Theoretical and Applied Fracture Mechanics (1) and Cement and Concrete Research (1).*

## **6. Działalność dydaktyczna**

Od początku mojego zatrudnienia na Politechnice Gdańskiej w lipcu 2010r. prowadzę zajęcia dydaktyczne dla studentów na studiach stacjonarnych kierunków: Budownictwo, Inżynieria Środowiska i Geodezja i Kartografia. W ostatnich latach prowadziłem zajęcia ze studentami z następujących przedmiotów (zał.5: III.J):

- Materiały Budowlane (budownictwo, studia I stopnia jednolite) – laboratorium,
- Budownictwo Ogólne I (budownictwo, studia I stopnia) – ćwiczenia i projektowanie,
- Budownictwo Ogólne II (budownictwo, studia I stopnia) – ćwiczenia i projektowanie,
- Podstawy Budownictwa (budownictwo, studia I stopnia) – wykład i projektowanie (osoba odpowiedzialna za przedmiot),
- Wzmacnianie Konstrukcji Budownictwa Ogólnego (budownictwo, studia II-stopnia) – projektowanie,
- Budowle Komunalne i Przemysłowe (geodezja i kartografia, studia I-stopnia) – wykład i ćwiczenia (osoba odpowiedzialna za przedmiot),
- Seminarium dyplomowe (budownictwo, studia II stopnia),
- Seminary (budownictwo, studia II stopnia) – przedmiot w języku angielskim.

Od roku 2010 byłem promotorem 36 i recenzentem 39 prac dyplomowych inżynierskich oraz promotorem 7 i recenzentem 20 prac dyplomowych magisterskich na studiach stacjonarnych i niestacjonarnych (zał.5: III.J).

## **7. Działalność organizacyjna, współpraca naukowa i popularyzacja nauki**

Podczas mojej pracy naukowej pracowałem nie tylko z Uniwersytetem Gdańskim czy Grenoble I. Współpracowałem z Uniwersytetem Koszalińskim (z prof. D. Leśniewską) w ramach grantu naukowego NCN (zał.5: II.J.2). Wynikiem współpracy był artykuł w czasopiśmie z bazy JCR (zał.5: II.A.1) i prezentacje konferencyjne np: *Powder and Grains* (2013); *Geomechanics from Micro to Macro* (2014), *IWBBDG* (2017) (zał.5: II.L i III.B). Od stycznia 2016 roku rozpocząłem również współpracę z Uniwersytetem w Melbourne (prof. A. Tordesillas) w temacie wczesnego wykrywania zarysowania w elementach betonowych. Wyniki pokazano w artykułach i na konferencjach *Powder and Grains* (2017) and *Euro-C* (2018).

Po zakończeniu stypendium we Francji uczestniczyłem/uczestniczę jako wykonawca (przez cały okres trwania) w 3 grantach naukowych Narodowego Centrum Nauki NCN (w jednym pod kierunkiem prof. D. Leśniewskiej w latach 2013-2016 i w dwóch pod kierunkiem prof. J. Tejchmana w latach 2018-nadal i 2019-nadal). Ponadto uczestniczyłem przez dziewięć miesięcy w grantie NCBiR Blue-Gas (2017), przez 2 lata w grantie NCN dot. efektu skali (2015-2016) i w grantie europejskim dot. poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych (2011-2014) (zał.5: II.J.1-6).

Od listopada 2016r. jestem odpowiedzialny za prowadzenie i uaktualnianie strony internetowej Katedry Budownictwa i Inżynierii Materiałowej. Jestem także współodpowiedzialny za serwery obliczeniowe wykorzystywane przez wszystkich pracowników naukowych katedry do obliczeń numerycznych.

Od początku działalności naukowej biorę aktywny udział w konferencjach naukowych (zał.5: II.L oraz III.B). Uczestniczyłem w 14 krajowych konferencjach (francuskich i polskich) oraz 16 międzynarodowych konferencjach, na których wygłosiłem (łącznie) 25 referaty. Do znanych konferencji międzynarodowych, w których uczestniczyłem po uzyskaniu stopnia doktora można zaliczyć: “Computational Modelling of Concrete and

Concrete Structures” *EURO-C* (2014, 2018), “Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures” *FraMCoS* (2013, 2016), “Particle-based Methods: Fundamentals and Applications” *Particles* (2013, 2015, 2017), “Computational Modelling of Fracture and Failure of Materials and Structures” *CFRAC* (2015) i “Powder and Grains” *P&G* (2017).

W maju 2016, 2017 i 2018 roku aktywnie uczestniczyłem w Bałtyckim Festiwalu Nauki, odbywającym się na Politechnice Gdańskiej, na którym przedstawiałem wykład „Wszystko składa się z kuleczek” (zał.5, III.A.1).

Od roku 2017 wykonałem 3 recenzje artykułów dla czasopism z listy Journal Citation Reports (JCR): *Engineering Fracture Mechanics*, *Cement and Concrete* i *Soils and Foundations* (zał.5: III.P).

Mój indeks Hircha i liczba cytowań na dzień 20.02.2019 wynosi:

Web of Science (*All Databases*): **h=5**, liczba cytowań - 130 (bez autocytowań - 107),

Web of Science (*Core Collection*): **h=5**, liczba cytowań - 125 (bez autocytowań - 102),

Scopus: **h=6**, liczba cytowań - 177.