

Kraków, 04.05. 2018 r.

Prof. dr hab. inż. Kazimierz Flaga, dr h.c.m.
Politechnika Krakowska

Recenzja
pracy doktorskiej mgr inż. Adama Zielińskiego pt. „Skurcz
autogeniczny betonów samozagęszczalnych”

Podstawa opracowania: Pismo Pani Dziekan Wydziału Budownictwa i Architektury Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, dr hab. inż. Marii Kaszyńskiej, prof. ZUT z dnia 19.03.2018r. – znak WB i A – SD/67/2018 zlecające opracowanie niniejszej recenzji.

1. Charakterystyka pracy

Opiniowana praca doktorska liczy 293 strony tekstu, w tym 296 rysunków i 47 tabel oraz 10 stronicowe zestawienie bibliografii, obejmujące 176 pozycji literatury technicznej przedmiotu pracy, 42 normy i standardy oraz 8 projektów badawczych. Do pracy dołączonych jest 10 załączników obejmujących charakterystykę (karty techniczne i deklaracje zgodności) materiałów składowych betonów zastosowanych w pracy, świadectwo kontroli zegarowych czujników elektronicznych – Schut oraz 2 patenty i 1 zgłoszenie patentu, związane bezpośrednio z recenzowaną pracą doktorską. Dokumentacja pracy jest więc obszerna i wyczerpująca.

Praca składa się ze streszczenia w językach polskim i angielskim, zestawienia symboli i skrótów oraz 13 rozdziałów obejmujących: Wprowadzenie (R1), Cel, tezę i zakres pracy (R2), Charakterystykę betonów samozagęszczalnych (R3), Skurczu betonu (R4), Zjawisk autogenicznych w kompozytach cementowych (R5), Modelowanie teoretyczne i algorytmy obliczeniowe (R6), Badania wstępne autora (R7), Badania zasadnicze autora (R8), Autorskie stanowiska pomiarowe (R9), Wyniki badań zasadniczych (R10), Analiza wyników badań (R11), Wnioski (R12) oraz Program dalszych badań (R13).

Część studialna pracy (rozdziały 3-6) jest obszerna i stanowi 37% jej objętości. Rozważano w niej w sposób przejrzysty i podsumowano stan wiedzy na tematy betonów samozagęszczalnych, skurczu betonu i zjawisk autogenicznych w kompozytach cementowych, zjawisk ściśle związanych z tematem pracy, ale rzadko traktowanych kompleksowo w literaturze technicznej przedmiotu.

Praca jest doświadczalna i dotyczy jednego z ważnych zagadnień współczesnej technologii betonu.

2. Ocena merytoryczna pracy

2.1. Cel i zakres pracy

Celem pracy było przeprowadzenie badań i analiz dotyczących rozwoju skurczu autogenicznego i jego wpływu na podatność na pękanie betonów samozagęszczalnych o niskim wskaźniku wodno-cementowym w/c. W szczególności przeanalizowano wpływ rodzaju, kompozycji i technologii przygotowania kruszywa, wpływ wartości wskaźnika w/c oraz podatność na pękanie betonów wywołaną skurczem autogenicznym.

2.2 Teza pracy

Teza pracy jest sformułowana jasno: „Istnieje możliwość kontrolowania odkształceń autogenicznych betonów samozagęszczalnych o niskim wskaźniku w/c poprzez dobór odpowiednich zabiegów technologicznych ograniczających występujący skurcz autogeniczny i ich podatność na pękanie”.

Teza ta jest oryginalna i świadczy o pilnym poszukiwaniu środków zaradczych na istotny mankament nowej generacji betonów wysokowartościowych, a to małej odporności na zarysowania i pęknięcia strukturalne, obniżające ich wodoprzepuszczalność i trwałość.

2.3. Ocena doboru tematu

Temat pracy wychodzi naprzeciw wymaganiom współczesnej technologii betonów, gdzie intensywnie rozwija się zastosowanie betonów wysokowartościowych HSC, HPC i betonów samozagęszczalnych SCC. Te dwie nowe generacje betonów cechują się niską wartością wskaźnika wodno-cementowego $w/c < 0,38$, co skutkuje niedoborem wody wewnętrznej do prawidłowego przebiegu procesu hydratacji cementu. Objawia się to przemieszczaniem się tej wody do coraz mniejszych porów i kanałków kopilarnych, podlegających ujemnemu ciśnieniu kopilarnemu w ich meniskach, co skutkuje ścisaniem fazy stałej tworzącej się struktury betonu i jej skurczem autogenicznym (samoczynnym, samorodnym).

Możliwość poprawienia tej sytuacji dostrzeżono przez zastosowanie do betonów samozagęszczalnych grubego kruszywa sztucznego (popiołoporytu, łupkoporytu) nasyconego wodą, które stanowi dodatkowy rezerwuuar wody wewnątrz struktury betonu, zdecydowanie poprawiając jego tzw. pielęgnacją wewnętrzną. Obecność tego kruszywa obniża jednak wytrzymałość betonu na ścisanie i rozciąganie, stąd poszukiwanie takiego jego dodatku, aby uzyskane rozwiązanie było optymalne, tzn. ograniczało lub wręcz eliminowało skurcz

autogeniczny przy nieznacznym obniżeniu cech wytrzymałościowych betonu. Taki cel przyświecał m.in. autorowi recenzowanej pracy doktorskiej.

2.4. Ocena wartości naukowej rozprawy

Praca jest typową pracą doświadczalną, przy wybitnym zaangażowaniu nowoczesnej, precyzyjnej aparatury badawczej, z szerokim wykorzystaniem techniki cyfrowej i informatycznej.

Ważną rolę w dysertacji odegrały badania wstępne autora. Polegały one na ocenie odporności na pękanie w wyniku odkształceń skurczowych 3 samozagęszczalnych betonów z kruszywem zwykłym i lekkim M1, M2 i M3. Mieszanka M1 zawierała tylko drobne kruszywo naturalne (0-2 i 2-8 mm), mieszanka M2 mieszaniny kruszywa naturalnego 0-2 mm i sztucznego Pollytag 4-8 mm, mieszanka M3 tylko kruszywo sztuczne 0-2 i 4-8 mm. Grube kruszywo sztuczne poddawano przed wykonaniem samozagęszczalnej mieszanki betonowej nasączeniu wodą do ponad 90% nasycenia porów kruszywa. W badaniach pękania autor zastosował metodę pierścieniową (pierścień stalowy) znormalizowaną w USA. Betonowe próbki pierścieniowe poddano badaniu na skurcz autogeniczny (do 24 godzin od momentu zarobienia mieszanek wodą) oraz łącznemu skurczowi autogenicznemu i od wysychania bocznej powierzchni pierścieni z betonu (po 24 godzinach tężenia).

Wyniki tych badań pozwoliły na ocenę wpływu kompozycji kruszywa na ograniczenie podatności na pękanie betonu w wyniku wczesnych odkształceń skurczowych, ocenę wpływu pielęgnacji wewnętrznej przez zastosowanie kruszywa lekkiego w różnych stanach wilgotnościowych oraz na ocenę wpływu domieszki antyskurczowej na pękanie betonów M1. Wykazano ewidentnie, że beton z kruszywem naturalnym wykazuje znacznie większy skurcz autogeniczny niż beton z kruszywem lekkim wstępnie namoczonym. Wszystkie analizowane betony wykazały wysoką podatność na pękanie (głównie w wyniku skurczu od wysychania), ale namoczenie grubego kruszywa sztucznego spowodowało wydłużenie czasu pękania. Również znaczne wydłużenie czasu pękania (z 3 do 11 dni) stwierdzono dla betonów M1 z 1% domieszką przeciwskurczową SRA.

W badaniach wstępnych zastosował autor również analizę teoretyczną naprężeń obwodowych i promieniowych w pierścieniu stalowym i pierścieniu betonowym przy ciśnieniu działającym na pierścień stalowy w momencie pęknięcia pierścienia betonowego równym 1,25 MPa, według równań fizycznych zaproponowanych przez wielu autorów. Dodatkowo w celu weryfikacji wartości teoretycznych naprężeń zastosowano analizę komputerową modelu symulującego odkształcalność pierścienia stalowego pod zadaniem ciśnieniem według programu Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2013. Analizę

przeprowadzono 3. niezależnymi metodami (odkształcenia w metodzie MES, odkształcenia wg równań fizycznych i odkształcenia rzeczywiste) wykazała całkowitą ich zgodność. Stanowi to dodatkowy wkład naukowy autora dysertacji do analizy pęknięcia betonów w próbie pierścieniowej.

Autor jednak nie zadowolili się tą analizą, przeprowadził jeszcze ocenę podatności zbadanych kompozytów na pęknięcie według wskaźnika potencjalnego pęknięcia CPI (Cracking Potential Indicator) oraz przewidywanie pęknięcia betonu metodą Monte Carlo. W metodzie CPI skurcz swobodny ϵ_{cs} mierzony po 28 dniach od rozformowania próbek metodą Amslera (skurczu swobodnego betonu metodą pierścieniową nie da się określić) stał się podstawą do oceny klasy potencjalnego pęknięcia dla betonów M1, M2 i M3 jako wysoką. Uwaga autora recenzji dotyczy niefortunnego określenia przez autora dysertacji ilorazu f_{ct}/E_{cm} jako nominalna pojemność odkształceń przy rozciąganiu.

W mechanice betonu jest to po prostu odkształcalność graniczna betonu rozciąganego, wynosząca około $1 \cdot 10^{-4}$.

W metodzie Monte Carlo do przeprowadzenia symulacji komputerowych oceniających prawdopodobieństwo pęknięcia betonu w czasie wykorzystywano oprogramowanie @Risk. Określono przewidywany czas pęknięcia, współczynnik pęknięcia i histogram czasu pęknięcia. Wyniki tych symulacji pod względem prawdopodobieństwa badanych betonów pokryły się z analizami wg ASTM i CPI.

Poświęciłem w recenzji więcej uwagi badaniom wstępnym autora, bo świadczą one o kompleksowym i wnikliwym podejściu doktoranta do przeprowadzonych badań.

Zasadnicze badania autora, z wykorzystaniem doświadczeń z badań wstępnych, wykonał na 8-miu samozagęszczalnych mieszankach betonowych o różnych kompozycjach kruszyw i różnym stopniu nasycenia kruszyw sztucznych wodą. Dodatkowy cel jaki sobie autor postawił to nie tylko ocena odporności na pęknięcie badanych pod wpływem skurczu autogenicznego ale także określenie wielkości tego skurczu. W tym celu zmodyfikował metodę pierścieniową wg ASTM tworząc autorski zestaw pomiarowy do rejestracji skurczu autogenicznego w metodzie pierścieniowej. Zastąpił w nim pierścień stalowy, wiotkim pierścieniem silikonowym, nie stawiającym oporu zaciskaniu go przez kurczący się beton. Stanowisko pomiarowe zostało dopracowane w szczegółach, łącznie z pomiarami skurczu przy pomocy czujników laserowych i czopików pomiarowych, ale jak to stwierdza autor na stronie 185 swojej rozprawy, wyniki pomiarów swobodnych odkształceń uzyskane z zmodyfikowanej metodzie pierścieniowej pominięto (w końcowej) analizie, gdyż nie odpowiadały one

odkształceniom liniowym uzyskanym z badania próbek prostopadłościennych. A szkoda, bo metoda ta została objęta zgłoszeniem patentowym.

Drugą z autorskich metod opracowanych przez doktoranta jest zestaw pomiarowy do rejestracji liniowego skurczu autogenicznego. Zestaw złożony z liniowych próbek betonowych o przekroju 32x150 mm (nigdzie w pracy nie podano szerokości próbki) i długości 1150 mm, formowanych między sztywnymi płytami bocznymi dociskowymi do antyadhezyjnej podstawy, elastycznych silikonowych bloków kończących oraz uchylnych czujników stalowych i czujników zegarowych o dokładności pomiarowej do 4 μm , pozwalał na rejestrację odkształceń autogenicznych próbek betonowych począwszy praktycznie od chwili zaformowania betonu. Rejestracja pomiarów była cyfrowa, złożona z modułu czasowego (zegar cyfrowy z konwerterem sygnału pomiarowego), komunikacyjnego oraz systemu komputerowej rejestracji danych i pomiarów. Ostatecznie wyniki tych badań oraz wyniki badań pęknięcia na pierścieniach stalowych wg ASTM stały się podstawą do wnioskowania.

W badaniach zasadniczych zastosowano 8 rodzajów samozagęszczalnych mieszanek betonowych: B0, B1, B2, B3, B4, B5, B6 i B7. W mieszance B0 o $w/c=0,42$, $C=725 \text{ kg/m}^3$, $f_{cm,15 \times 15}=63,1 \text{ MPa}$, zastosowano tylko kruszywo naturalne 0-2 mm; w mieszance B1 o $w/c=0,28$, $C=794 \text{ kg/m}^3$, $f_{cm}=93,8 \text{ MPa}$ zastosowano też tylko kruszywo naturalne 0-2 mm; w mieszance B2 o $w/c=0,28$, $C=794 \text{ kg/m}^3$, $f_{cm}=61,0 \text{ MPa}$ zastosowano tylko kruszywo lekkie Pollytag 0-4 mm; w mieszance B3 o $w/c=0,28$, $C=458 \text{ kg/m}^3$, $f_{cm}=93,0 \text{ MPa}$ zastosowano tylko kruszywo naturalne 0-2 i 2-8 mm; w mieszance B4 o $w/c=0,34$, $C=450 \text{ kg/m}^3$, $f_{cm}=90,4 \text{ MPa}$ zastosowano tylko kruszywo naturalne 0-2 i 2-8 mm; w mieszance B5 o $w/c=0,34$, $C=450 \text{ kg/m}^3$, $f_{cm}=48,5 \text{ MPa}$ zastosowano kruszywo naturalne 0-2 mm i sztuczne 4-8 mm; w mieszance B6 o $w/c=0,34$, $C=450 \text{ kg/m}^3$, $f_{cm}=42,7 \text{ MPa}$ zastosowano tylko kruszywo sztuczne 0-4 i 4-8 mm; w mieszance B7 o $w/c=0,34$, $C=450 \text{ kg/m}^3$, $f_{cm}=76,7 \text{ MPa}$ zastosowano kruszywo naturalne 0-2 i 2-8 mm oraz zastąpiono w 50% grube kruszywo naturalne 2-8 mm namoczonym kruszywem lekkim 4-8 mm.

Uzyskano w ten sposób całą panoramę wpływów różnych parametrów na badane zjawiska. Nie sposób tu przedstawić oceny wszystkich uzyskanych rezultatów. Ewidentnie stwierdzono – co jest głównym osiągnięciem naukowym recenzowanej pracy -że:

- obniżenie wskaźnika w/c wpływa na zwiększanie wartości skurczu autogenicznego,
- spadek wilgotności względnej betonu powoduje wzrost wartości skurczu autogenicznego,

- wzrost objętości kruszywa naturalnego wpływa na ograniczenie wielkości i rozwoju odkształceń autogenicznych kompozytów cementowych,
- namoczone kruszywo sztuczne wpływa w fazie wiązania cementu na wystąpienie pęcznienia autogenicznego,
- dochodzi do stabilizacji odkształceń autogenicznych w fazie twardzenia betonów na bazie grubego namoczonego kruszywa sztucznego,
- rozwój właściwości wytrzymałościowych jest proporcjonalny do rozwoju skurczu autogenicznego tylko w betonach na bazie kruszyw naturalnych,
- korelacja skurczu autogenicznego i odkształcalności pierścieni stalowych wg ASTM występuje tylko dla betonów na bazie kruszywa naturalnego o niskim wskaźniku w/c.

Uzyskane w badaniach autora wartości skurczu autogenicznego betonów na kruszywach naturalnych są wielokrotnie wyższe niż podawane w normie PN-EN 1992-1-1:2008 (Eurokod 2) czy też w metodzie CEB-FIB (MC 90-99) będącej podstawą normy amerykańskiej ACI 209.2R-08. Najlepszą zgodność z wynikami pomiarów dała metoda japońska Tazawy i Miyazawy. Sprawa ta nie znalazła dostatecznego wyjaśnienia w rozprawie (wpływ wymiarów próbek badawczych, rodzaju, ilości i frakcji zastosowanego kruszywa, rodzaju ilości cementu). Sądzę też, że ważną rolę odegrał tu tzw. efekt ściany, tzn. zaczyn cementowy przy śliskich ściankach obudowy próbek liniowych nie napotykał na skuteczny opór ziarn kruszywa, tak jak we wnętrzu struktury betonu. Przy cienkich próbkach liniowych wpływ tego efektu mógł być b. duży na co doktorant nie zwrócił uwagi w swoich badaniach. Stąd też uzyskane w badaniach wartości skurczu czy też pęcznienia autogenicznego należy uważać jako względne, a nie bezwzględne.

W/w metoda japońska jest kompletnie nieużyteczna przy zastosowaniu pozostałych kruszyw lekkich, dla których beton wykazuje pęcznienie autogeniczne.

Autor w pełni potwierdził zasadniczą tezę pracy, z której wynika, że

- oddziaływanie skurczu autogenicznego może spowodować mikrozarysowania w strukturze betonu,
- ważną rolę w dojrzewaniu samozagęszczalnych betonów wysokowartościowych odgrywa pielęgnacja wewnętrzna,
- namoczone kruszywo sztuczne zmienia tendencję odkształceniową ze skurczu na pęcznienie autogeniczne w fazie wiązania cementu, a tym samym minimalizuje skurcz autogeniczny,

- namoczone kruszywo sztuczne w fazie twardnienia kompozytu cementowego zapewnia stabilizację odkształcalności autogenicznej,
- częściowe zastąpienie kruszywa naturalnego ($1/3 - 1/2$) namoczonym kruszywem sztucznym wpływa nieznacznie na spadek parametrów mechanicznych kompozytów cementowych, zapewniając minimalny skurcz a nawet pęcznienie autogeniczne.

Biorąc powyższe czynniki pod uwagę, wysoko oceniam poziom naukowy rozprawy oraz wnikliwy sposób analizy uzyskanych wyników.

3. Metodyka badań i zastosowana aparatura pomiarowa

W rozprawie zastosowano metodykę badawczą opartą na aktualnych normach oraz w kilku przypadkach – na normach amerykańskich (metoda pierścieniowa rejestracji oddziaływania skurczu ASTM 1581) czy doświadczeniach japońskich (Okamury i wsp.). Do szczegółowych pomiarów skurczu i pęcznienia autogenicznego betonów samozagęszczalnych o niskim wskaźniku w/c opracował autor 2 własne metody badawcze, a to zestawy pomiarowe do rejestracji skurczu w metodzie pierścieniowej i do rejestracji liniowego skurczu autogenicznego. Wykorzystał przy tym czujniki laserowe 2x1 firmy Omron, z dokładnością 2 μm , cyfrowe czujniki zegarowe 909,998 ABS IP 54 firmy Schut, z dokładnością do 4 μm oraz cyfrową rejestrację pomiarową. Badania są przeprowadzone bardzo dokładnie i precyzyjnie, z zachowaniem wszelkich środków ostrożności dotyczących przyczepności mieszanek samozagęszczalnych do ścianek formy, izolacji przeciwwilgociowej zewnętrznych powierzchni badanych betonów, wymiarów geometrycznych pierścieni i próbek. Oprzyrządowanie i badawcza strona pracy nie budzi zastrzeżeń, a wręcz jest godna wyróżnienia.

4. Ocena strony formalnej pracy

Praca napisana jest dość starannie, dobrym językiem. Rysunki i tabele są czytelne i wzbogacają istotnie wartość rozprawy. Widać tu dużą dbałość autora o udokumentowanie wszystkich istotnych jej elementów. Nie oznacza to jednak, że nie ma w pracy drobnych usterek, tzw. literówek a również pomyłek technicznych czy językowych. Z zauważonych należy wymienić:

Str. 7¹⁸ – ma być: wewnętrznych,

Str. 17⁹ – źle napisane: to kapilary mają meniski, a nie meniski przekształcają się w kapilary,

Str. 21₅ – dodać: ten,

- Str. 25₄ – pominięto jeden czynnik, a mianowicie tendencję do przemieszczenia się ku górnej powierzchni dodatków mineralnych (pyłów), które są lżejsze od cementu i kruszywa.
Widoczne jest to zwłaszcza w słupach i ścianach z betonu samozagęszczalnego,
- Str. 35¹⁻³ – coś jest nie w porządku przy w/p=0,80-1,20, przy dużej zawartości pyłów,
- Str. 36 rys. 3.13 – niedokończona miana na osiach rzędnych,
- Str. 37₄ – dodać: tych,
- Str. 37₁₁ – dodać: tego,
- Str. 47 rys. 4.1 – niezrozumiały, co oznacza dolna linia ciągła?
- Str. 51₂ – zdanie na wyrost
- Str. 55 rys. 4.11 i 4.12 – czym się różnią mieszanki BFS i Mix? Mylące jest wprowadzenie innych skal na osiach rzędnych,
- Str. 59 rys. 4.15 – ma być: karbonatyzacji,
- Str. 59⁶⁻¹⁰ – zdanie niejasne,
- Str. 71¹ – co to znaczy: proporcjonalny układ brzegowych naprężeń rozciągających?
- Str. 73⁴ – ma być: Le Chatelier,
- Str. 74⁸ – czy rzeczywiście zachodzi tu spadek masy?
- Str. 75¹ – ma być: izotropowym,
- Str. 75¹⁹ – ma być: ówczesnie,
- Str. 77₁₀ – ma być: wyrównanie,
- Str. 77 – nigdzie autor nie wspomniał o hydrolizie spoiwa, jej fizyko-chemicznym „mieleniu” po kontakcie z wodą, gdy znacznie rośnie jego powierzchnia właściwa,
- Str. 91 rys. 5.19 – czy ma być: absorpcji, czy też: adsorpcji?
- Str. 98 rys. 5.25 – wartołoby wpisać skale pionowe,
- Str. 110 – w tekście jest mowa o punktach przegięcia, ale w rzeczywistości są to lokalne minima,
- Str. 113³ – podać: przez co?
- Str. 119⁶ – to nie jest takie oczywiste,
- Str. 125₅ – ma być: gęstości objętościowej, szybkości,
- Str. 126 tab. 7.2. – ma być: t_{500} ,
- Str. 128 rys. 7.8 – błąd w opisie wysokości J – pierścienia,
- Str. 161¹²⁻¹⁴ – zdanie nieściśle,
- Str. 164_{6,7} – ma być: gęstości objętościowej, szybkości,
- Str. 166⁸ – nie określono warunków przewidzianych do badań skurczu betonu,
- Str. 170 tab. 9.2 – czy nie przestawiono w wierszach 4 i 5 nazwy naprężeń?

Str. 172 rys. 9,3 – zły wykres naprężeń własnych, naprężenia te w przekroju się zerują,

Str. 172₁ – zdanie niejasne,

Str. 267 rys. 11.51 – błąd przy $f_{ctm,sp}$ (7),

Str. 277 rys. 11.61 – co oznaczają 2 linie niebieskie na rysunku?

Str. 278⁷ i rys. 11.64 – ma być: 7 dni,

Str. 279₆ – ma być: kompozyt B2,

Str. 279₇ – ma być: po 13,7 dniach.

5. Uwagi krytyczne

Kilka uwag krytycznych sformułowano w punkcie 2.4 recenzji. Należą do nich:

- nie podjęcie próby wyjaśnienia zbyt dużych różnic w wartościach skurczu autogenicznego uzyskanych w badaniu autora i wynikających ze wzorów powszechnie przyjętych w praktyce projektowej konstrukcji z betonów na kruszywach naturalnych (Eurokod 2, ACI 209.2R-08),
- niefortunnie określenie na odkształcalność graniczną betonu rozciąganego,
- nie sprecyzowanie grubości próbek liniowych do badań skurczu i pęcznienia autogenicznego.

Dodać tu należy również zbyt duży wysiłek włożony w opisy i opracowanie rysunków w analizie wyników badań, dotyczących rozwoju odkształcalności autogenicznej badanych betonów; wysiłek nie wykorzystany ani w analizie ani we wnioskach .

Główna uwaga krytyczna dotyczy stosunku autora do roli zjawisk kapilarnych w kreowaniu skurczu autogenicznego betonu. Na str. 81₆ stawia autor znak równości między wodą kapilarną a wodą wolną. Faktem jest, że usunięcie wody wolnej z dużych kapilar nie powoduje skurczu. Ale wartołoby w pracy przytoczyć wzór na wartość ciśnienia kapilarnego nad meniskiem i stwierdzić, że przy małej średnicy kapilary ciśnienie to wywołuje „podnoszenie menisku” przy ściankach kapilary i równoczesne „zawieszanie” się menisku na tych ściankach i ich ściskanie, objawiające się skurczem autogenicznym czy też przy wysychaniu. Według dawnych badań Łykowa następuje to już przy średnicy kapilary około 1 μm . W dalszej części pracy autor już nie poddaje w wątpliwość faktu, że główną przyczyną skurczu autogenicznego są ciśnienia strukturalne w kapilarach jego sieci strukturalnej (por. str. 104₁, str. 288³⁻¹⁰).

6. Wniosek końcowy

Opiniowaną pracę oceniam wysoko. Zarówno jej strona naukowa jak i formalna nie

budzą większych zastrzeżeń. Dodatkowo należy podkreślić duży wysiłek autora w opracowanie dwóch interesujących metod spełniających wymagania pomiarowe dotyczące rejestracji odkształceń autogenicznych betonów. W rozprawie autor wykazał się pasją, pracowitością, dużą innowacyjnością, precyzją w zapewnieniu wiarygodności badań i opracowaniu ich wyników. Wykazał przy tym uzdolnienia do samodzielnej pracy naukowej i rozwiązywania trudnych zagadnień badawczych. Praca wnosi istotny wkład w rozwój technologii nowoczesnych betonów, ze szczególnym uwzględnieniem betonów samozagęszczalnych o niskim wskaźniku wodno-cementowym w/c i wnioskuje o jej wyróżnienie.

W związku z tym uważam, że praca doktorska Pana mgr inż. Adama Zielińskiego spełnia wszystkie wymagania przewidziane przez Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14.03.2003r. (Dz. U. nr 65 poz. 595 z późn. zmianami) oraz Rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19.01.2018r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzenia czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 19.01.2018, poz. 261) i wnoszę o dopuszczenie Kandydata do jej publicznej obrony.

