

Naprężenia, odkształcenia, przemieszczenia to nie tylko abstrakcyjne tensory

Słuchając jako student Wydziału Budownictwa Lądowego Politechniki Krakowskiej wspaniałych wykładów pana prof. inż. Stefana Piechnika z wytrzymałości materiałów [1], nie miałem świadomości, jak istotnych problemów, dla codziennej praktyki inżyniera budownictwa, dotyczą równania fizyczne - „Zależność deformacji bryły od przyłożonych sił zewnętrznych narzuca istnienie zależności odkształceń od sił wewnętrznych” [1].

Ograniczając rozważania do stanu sprężystego, można te zależności wyrazić poprzez równania Hooke’a [1]:

$D\sigma = 2G D\varepsilon$, czyli prawo zmiany postaci

$A\sigma = 3K A\varepsilon$, czyli prawo zmiany objętości

Dla przypomnienia:

$D\sigma$ – dewiator naprężeń

$D\varepsilon$ – dewiator odkształceń

$A\varepsilon$ – aksjator odkształceń

$A\sigma$ – aksjator naprężeń

$1/2G = (1 + \nu)/E$

$3K = E/(1 - 2\nu)$

Gdzie:

E – moduł Younga

ν – współczynnik Poissona

Jednak elegancka i stosunkowo prosta forma rachunku tensorowego dla stanu sprężystego w praktyce musi uwzględnić bardziej skomplikowaną formę zapisu deformacji bryły. Wtedy naprężenia, odkształcenia i przemieszczenia stają się funkcją także czasu, skurczu (a w zasadzie skurczów), temperatury, więzów wewnętrznych, pęczania itp. [1], [2], [3], [4].

Moja praca w biurze projektów była w oczywisty sposób skorelowana z równaniami podanymi powyżej, poszerzonymi oczywiście o zdanie powyżej, które zwraca uwagę na kwestie reologiczne. Jednak to w długoletniej praktyce wykonawczej byłem i jestem świadkiem konsekwencji zapominania o bezwzględności i nieuchronności równań fizycznych, rozszerzonych oczywiście o czas, skurcz, temperaturę, więzy wewnętrzne itp.

Wszyscy, pracując w realnej przestrzeni budowlanej, popełniamy błędy, jednak zapominanie o nieuchronnej konsekwencji fizycznych relacji: naprężeń, odkształceń i przemieszczeń niestety często prowadzi do kosztownych usterek.

W niniejszym artykule nie będę opisywał tragicznych rezultatów zapominania o tych podstawowych dla wytrzymałości materiałów równaniach. Nie będę więc pisał o katastrofach, utracie życia lub zdrowia użytkowników budynków lub obiektów inżynierskich. Skupię się natomiast na mniej dramatycznych, ale bardzo uciążliwych szkodach, zwłaszcza tych, które są związane z zapominaniem o kwestii reologii, czyli czynnika czasu w życiu budynku, budowli i elementu budowlanego.

Często nawet ci, co pamiętają zależności pomiędzy naprężeniami, odkształceniami i przemieszczeniami, ograniczają się do pola sił grawitacji, oddziaływania wiatru i bardzo rzadko niektórych rodzajów skurczu. Pole sił grawitacji i wiatr to niewątpliwie

dla konstruktora bardzo istotne pola sił, ale zapominanie o innych polach sił bywa bardzo kosztowne, nawet w dosłownym tego słowa znaczeniu.

Na początek weźmy górną powierzchnię tarasu, wystawioną na działanie wielu pól sił. Jednym ze sposobów ograniczenia rezultatów działania tych sił jest właściwe dylatowanie nawierzchni i spodnich warstw tarasu. Niestety w praktyce, zarówno projektanci, jak i wykonawcy, zapominają o nawet najprostszych zasadach dylatowania nawierzchni tarasu. Na dodatek nie pamiętają, że zwłaszcza w polskim klimacie działanie pola sił od temperatur ma charakter zmęczeniowy i to zarówno latem, jak i zimą [2]. Polecam pracę pana Zbigniewa Rusina [2], w której między innymi autor uświadamia czytelnikom, że lokalnie zewnętrzny element budowlany może podlegać zimą nawet stu kilkudziesięciu przejściom przez 0°C. Woda zawarta w porach materiału budowlanego przy jej zamrożeniu zwiększa swoją objętość [2] o około 10%. Powstające w ten sposób pole sił bywa bardzo destrukcyjne. Z kolei latem, kiedy temperatura na powierzchni tarasu dochodzi nawet do 70°C, woda w porach paruje, wywołując w elemencie budowlanym stan naprężeń, także o charakterze zmęczeniowym.

Jak więc widać pole sił od temperatur jest w tym przypadku bardzo nieprzyjemnie skorelowane z polem sił od wilgoci. Rezultaty współdziałania tych pól są tym bardziej destrukcyjne w czasie dla tarasu, im częściej zapominamy o regułach, które należy stosować, aby tych niekorzystnych rezultatów uniknąć. Należy pamiętać, że z punktu widzenia mechaniki górna warstwa płytek na tarasie jest niejednorodną płytą (płytki i na połączeniach zaprawa wypełniająca fugi między płytkami), położoną na dość sprężystym podłożu (przypominam, że minimalna klasa kleju do płytek to C2 S1). Najsilniej widać to w przypadku płytek wielkoformatowych położonych na elastycznym kleju. Zapominanie, że niejednorodna płyta z płytek wielkoformatowych ma być dylatowana już w pierwszym sezonie, prowadzi do powstania włoskowatych rys, co widać na załączonym zdjęciu, wykonanym podczas sporządzanej przeze mnie ekspertyzy – patrz zdj. nr 1.

Rysy są tym większe, im mniejsza od zalecanej grubości 5 mm (dla płytek wielkoformatowych) jest zastosowana fuga pomiędzy płytkami wielko-



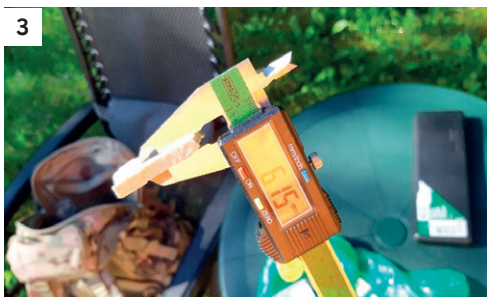


formatowymi. Te niewinne rysy włoskowate będą z czasem prowadzić do wykruszania fug i wnika-
nia coraz większej ilości wody w przestrzeń pod
płytkami. Wypełnienie w całości klejem przestrzeni
pod płytką wielkoformatową, chociaż wymagane
warunkami technicznymi, jest trudne i często nie-
przeprzeganie – patrz zdj. nr 2.

Wprowadzona pod warstwę płytek w ten sposób
woda rozchodzi się stopniowo pod całą powierzch-
nią płytek. Wtedy już na całą niejednorodną płytę
(czyli nawierzchnię z płyt wielkoformatowych),
położoną na sprężystym podłożu, działa od strony
tegoż podłoża niejednorodne pole naprężeń o cha-
akterze zmęczeniowym.

Czyli mamy sytuację, w której niejednorodna (płytki
i fugi z zaprawy), bardzo cienka płyta rzędu 6
mm grubości – patrz zdj. nr 3 – bywa jednocze-
śnie:

- obciążona od góry, np. obciążenie zmienne od
tłumu i stałe od np. donic z kwiatami
- poddana polom sił działających w jej płaszczyz-
nie, np. od temperatury
- wystawiona na wpływy od bardzo podatnego
podłoża, np. przemieszczenie, wilgoć.



O ile sama płytką, pod warunkiem że właściwie
dobrana, często przetrzyma bez pęknięć pierwszy
pełny roczny sezon klimatyczny, to nawet najlepiej
dobrana zaprawa na fugę już naprężeń wywołanych
polami sił jak wyżej bez zarysowań nie prze-
trwa. W następnych rocznych sezonach klimatycznych
oddziaływania na rozważaną płytę ulegną
wzmocnieniu.

Chciałbym zwrócić jeszcze uwagę na praktykę ryn-
kową polegającą na tym, że zamiast elastycznych
klejów, zawierających cement o klasie C2 S1 coraz
częściej stosuje się kleje do płytek, które nie za-
wierają cementu i są złożone jedynie z tworzywa
sztucznego (taki klej widać w odkrywce na zdjęciu
nr 2, nr 4 i nr 5). Niby dobrze z punktu widzenia
układania nawierzchni z płyt wielkoformatowych.
Jednak wtedy niejednorodna płyta złożona z płytek



wielkoformatowych i fug o grubości rzędu 6 mm
jest położona na bardzo podatnym, sprężystym
podłożu o grubości rzędu 4 mm i więcej – patrz
zdj. nr 4 i 5.

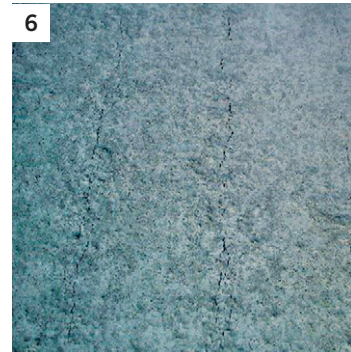
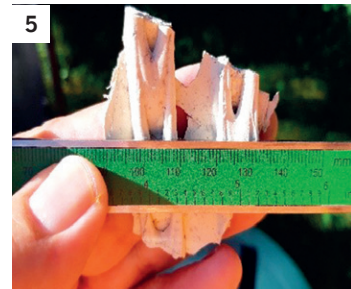
Co prawda warunki techniczne wykonania i od-
bioru oraz karty techniczne klejów, całkowicie wy-
konanych z tworzyw sztucznych, wymagają, aby
powierzchnia pod płytką była w pełni wypełniona
klejem, to w praktyce wygląda i będzie wyglądać
to tak jak na zdjęciu nr 2, nr 4, nr 5.

Nasuwa się więc pytanie, jak w dłuższym okresie
użytkowania tarasu mechanicznie zachowa się
rozważana niejednorodna płyta złożona z płytek
wielkoformatowych i fug grubości rzędu 6 mm,
ułożona na bardzo podatnym podłożu z tworzywa
sztucznego o grubości rzędu 5 mm? Dodatkowo
praktyka pokazuje, że podatne podłożo z tworzy-
wa sztucznego będzie złożone z następujących po
sobie pasków kleju i pustki powietrznej o szeroko-
ściach rzędu 1 cm – patrz zdjęcie nr 5.

Myślę, że może być to ciekawy temat do analizy
obliczeniowej za pomocą równań fizycznych. Jeżeli
ktoś z Szanownych Czytelników będzie chciał taką
analizę przeprowadzić, to chętnie się zapoznam
z wynikami. Ja jednak jako rzeczoznawca nie rezy-
gnowałbym tak łatwo z zapraw klejowych opartych
na cementie, bo obawiam się, że opisany powyżej
problem, niejednorodnej płyty na podatnym pod-
łożu, w przypadku zastosowania kleju z tworzywa
sztucznego może tworzyć zbyt podatne podłożo.
Zainteresowanych informuję dodatkowo, że klej
z prezentowanego przypadku jest z poliuretanu.

Pod rozważaną powyżej cienką, niejednorodną płytą
nawierzchni tarasu znajduje się, przy tradycyj-
nym układzie warstw, płyta jastrychu cementowe-
go, której grubość powinna wynosić przynajmniej
6 cm, a jeszcze niżej pod termoizolacją zazwyczaj
żelbetowa, monolityczna płyta konstrukcji stropu.
Oczywiście w przypadku konstrukcji żelbetowych
„piekto” lub „piękno”, jak kto woli, równań fizycz-
nych zaczyna się już w momencie wiązania betonu
[3] w obu grubszych płytach. Skurcz plastyczny
mieszanki betonowej (plastic shrinkage w [3]),
który rozpoczyna się już po kilku godzinach po
umieszczeniu betonu w szalunku, potrafi spowodo-
wać wystąpienie rys skurczowych o grubości 2 mm
(w skrajnych przypadkach nawet 1 cm) i długości
rzędu 400 mm i głębokości rzędu 45 mm [3]. We-
dług [4] 0,1 do 3 mm szerokości i nawet 1 m dłu-
gości. Ważną cechą rys od skurczu plastycznego
jest fakt, że jeżeli już wystąpią, to zamykają się
one z trudnością [4] – patrz zdj. nr 6.

Rysy spowodowane skurczem plastycznym przed-
stawione na zdjęciu nr 6 pojawiły się na płycie
żelbetowego stropu, w jego części monolitycznej,
powyżej filigranów. Jak widać, powstałe rysy są



równoległe, co jest charakterystyczne dla skurczu plastycznego, trzeba także pamiętać, iż pęknięcia będące rezultatem skurczu plastycznego są drogą dojścia wody i ewentualnie innej cieczy do zbrojenia, co doprowadza do jego rdzewienia [3].

Obecnie przy niskich wartościach współczynnika w/c, czyli poniżej 0,42, coraz większy udział w sumarycznych efektach dojrzewającej mieszanki betonowej zaczyna odgrywać autogeniczny (samoczynny) skurcz betonu (autogenous shrinkage w [3], skurcz samoczynny w [4]). Waga tego rodzaju skurczu rośnie wraz z postępowaniem w technologii projektowania i wytwarzania mieszanki betonowej, czyli między innymi stosowaniem superplastyfikatorów. Skurcz samoczynny (autogeniczny) przy bardzo niskim w/c jest bardzo wysoki – „W przypadku betonu o stosunku wodno-cementowym 0,17 stwierdzono wartość 700×10^{-6} [4].” Samoczynny skurcz rośnie także przy stosowaniu do mieszanki betonowej pyłów krzemionkowych [3] i jest wynikiem reakcji chemicznych zachodzących zwłaszcza do jednego dnia po ułożeniu w szalunku [3].

Istnieją oczywiście i inne rodzaje skurczu, pęczanie a także pęcznienie [4] betonu, ale nie będę ich tu omawiał. Należy jednak pamiętać, że właśnie ze względu na to, iż procesy zachodzące najpierw w mieszance betonowej, świeżym betonie i stopniowo dojrzewającym betonie mają wpływ na ostateczną pracę żelbetu w konkretnej konstrukcji, w funkcji czasu. W zaznaczonym na rysunku przeglądanej projektu dowolnej konstrukcji B30 należy widzieć nie tylko kwestię czysto mechaniczną, ale także technologiczno-chemiczną. Innymi słowy, ewentualne przyszłe problemy z konstrukcją, której elementem jest beton, mogą i często się zaczynają na nieuczynnym doborze składu mieszanki betonowej, czyli jej projektu technologicznego. Niemniej istotnym jest związany z tym także odpowiedni dobór zbrojenia, wynikający z przesłanek fizykochemicznych, zarówno rozproszonego jak i zbrojenia prętami stalowymi. Zgodnie z [4] – „Wydużony okres pielęgnacji na mokro opóźnia wystąpienie skurczu. Wpływ pielęgnacji na wartość skurczu jest jednak niewielki, jakkolwiek charakter tego wpływu jest złożony.” Tak więc widząc spekania betonu, należy uważać z przesądzeniem, że jest to wina niewłaściwej pielęgnacji betonu przez wykonawcę robót.

Odpowiednia pielęgnacja betonu ułożonego w szalunku jest oczywiście bardzo ważna, ale może się okazać, że już w mieszance betonowej tkwił taki problem, który pielęgnacją nie da się już wystarczająco zniwelować. Skurcz przy wysychaniu [4] betonu, związane z nim pęcznienie i zmiana kształtu elementu betonowego jest uzależnione między innymi od stosunku w/c mieszanki betonowej, pielęgnacją się tego nie zmieni.

Opisane powyżej procesy fizyczne i chemiczne, które zachodzą w dojrzewającym betonie, wpływają na ostateczną formę przestrzenną elementu betonowego. Na dodatek zmiany te i ich przestrzenne rezultaty są zmienne w czasie, czyli mają charakter reologiczny.

Brak przeciwdziałania ewentualnym rezultatom tych procesów fizycznych już na etapie projektowania kończy się często dużymi kosztami usuwa-

nia usterek lub nawet koniecznością rozebrania elementów z betonu i wykonania ich ponownie. Niestety do niedawna, zarówno na poziomie projektu budowlanego, jak i projektu wykonawczego, **w praktyce projektowej nie istniała osoba, która poczuwałaby się do wykonania zintegrowanego projektu technologiczno-konstrukcyjnego żelbetowego elementów budowli, szczególnie narażonego na rezultaty oddziaływań fizykochemicznych, występujących na etapie wczesnego i późniejszego dojrzewania betonu.**

W stanie prawnym na 19.09.2020 pojawił się w art. 34 PRAWA BUDOWLANEGO „projekt techniczny”, który ma być składnikiem „projektu budowlanego” [5].

W art. 34 ust. 3 p. 3) czytamy – „projekt techniczny obejmujący:

- a) Projektowane rozwiązania konstrukcyjne obiektu wraz z wynikami obliczeń statyczno-wytrzymałościowych
- b) Charakterystykę energetyczną – w przypadku budynków
- c) Projektowane niezbędne rozwiązania techniczne oraz materiałowe
- d) W zależności od potrzeb – dokumentację geologiczno-inżynierską lub geotechniczne warunki posadowienia obiektów budowlanych
- e) Inne opracowania projektowe.

Patrząc na podpunkty c) i e) można uznać, że Prawo budowlane po ostatnich zmianach [5] daje prawną możliwość inwestorowi, aby żądał przedstawienia przez projektanta zintegrowanego projektu technologiczno-konstrukcyjnego niektórych betonowych elementów budowli. Wiele będzie zależało od poziomu merytorycznego służb technicznych inwestora. Ze strony dużej części biur projektów spodziewam się znacznego „oporu materii”, ponieważ do tej pory prawie nigdy takich opracowań projektowych nie robiono, a na dodatek duża część, zwłaszcza najmłodszych konstruktorów nie projektuje konstrukcji budowlanych, a jedynie „liczy je programem”. Oczywiście są biura projektów, które bez problemów przygotowują kompleksowe rozwiązania konstrukcyjno-technologiczne. Będą to zwłaszcza te biura projektów, które są realnie częścią stosunkowo dużych firm wykonawczych, realizujących kontrakty w trybie zaprojektuj i wybuduj. Poza nielicznymi wyjątkami, rola nomen omen projektowa w tym zakresie do tej pory spadała w praktyce na kierownika budowy i inspektora nadzoru. Jednak pierwszy problem w tym, że zwyczaj w trakcie trwania procesu budowlanego jest wystarczająco dużo innych trudności, które kierownik budowy i inspektor nadzoru muszą na bieżąco pokonywać. Drugi to fakt, że nie jest rolą ani kierownika budowy, ani inspektora nadzoru wypełnianie roli projektanta. Trzeci, że inwestorzy zazwyczaj bardzo nie lubią płacić nadzorowi sensownych pieniędzy, czego rezultatem jest nadzorowanie kilku budów przez inspektora nadzoru jednocześnie, a i najczęściej jeden kierownik budowy także prowadzi kilka budów.

Na szczęście bywa tak, że wszystkie osoby pełniące samodzielne funkcje techniczne siadają przy jednym stole i w rezultacie wydają stosowaną dokumentację techniczną, np. w postaci notatki z narady. Miałem szczęście i przyjemność współ-



pracować jako inspektor nadzoru z taką grupą osób, która na naradzie technicznej, przeprowadzonej z udziałem projektantów, kierownika budowy, kierownika robót wykonała pełny projekt technologiczno-konstrukcyjny posadzki żelbetonowej w reprezentacyjnym obiekcie użyteczności publicznej. Wydany w ten sposób zbiór uzgodnień określał między innymi: ramy technologiczne dla projektu technologicznego mieszanki betonowej, rodzaj zbrojenia rozproszonego mieszanki betonowej, dokładny opis zbrojenia siatkami zbrojeniowymi płyty posadzki, kształt, grubość i rozmieszczenie dylatacji posadzki żelbetonowej, sposób pielęgnacji płyty żelbetonowej, parametry techniczne kleju, na którym miała być ułożona posadzka z marmuru. Jak na razie posadzka spełnia swoje funkcje – patrz zdjęcia nr 7, 8.

W ostatniej części niniejszego artykułu pokażę, jak w badanym przeze mnie budynku na jego stan wpłynął fakt niestosowania się do warunków projektowych wydanych przez projektanta w sprawie dylatacji. Badany obiekt jest budynkiem mieszkalnym kilkunastokondygnacyjnym. Podczas wizji lokalnych w jednym z mieszkań stwierdziłem rysy na ścianach – patrz zdjęcia nr 9 do 11.

Na zdjęciu nr 9 widać pęknięcia ściany pomiędzy korytarzem ogólnodostępnym, prowadzącym do mieszkań, a przedpokojem lokalu mieszkalnego, z lewej strony drzwi wejściowych do mieszkania, od strony mieszkania. Na zdjęciu nr 10 widać pęknięcie tej samej ściany widoczne w łazience mieszkania, na prawo od drzwi wejściowych. Z kolei zdjęcie nr 11 pokazuje stan spękań na korytarzu ogólnodostępnym.

Tak wygląda na parterze rezultat braku wykonania dylatacji pomiędzy stropami a ścianami działowymi w budynku. Nie wykonano także zbrojenia w spoinach poziomych ścian, co wpłynęłoby na zmniejszenie skali spękań ściany działowej. W projekcie projektant jednoznacznie podał konieczność

i sposób dylatowania ścian działowych od stropu. Zdarzyło się, że w mojej praktyce zawodowej jako inspektor nadzoru spotkałem się z panem prof. inż. Stefanem Piechnikiem, jako reprezentantem gremium inwestora na jednej z nadzorowanych przeze mnie budów. Dodatkowo miałem to szczęście, że Pan Profesor brał udział w naradach technicznych budowy. Nadzorowany obiekt o konstrukcji żelbetonowej monolitycznej, ze względu na wydłużony kształt i związane z tym duże wydłużone pola elementów betonowych, poprzez już samą formę był podatny na pole sił związane ze skurczem betonu. Ile razy na naradach jako inspektor nadzoru podnosiłem kwestię dozbrojenia, co próbowałem oprotestowywać obecny na naradzie projektant konstrukcji, wtedy Pan Profesor po spojrzeniu na fragment wskazanego przeze mnie rysunku mówił: „Tak, tutaj należy dozbroić”. W ten sposób zaoszczędziliśmy wiele czasu i uniknęliśmy wielu usterek. Niestety, zazwyczaj inspektor nadzoru nie ma tyle szczęścia.

mgr inż. Paweł Bałos
rzeczoznawca PZITB

Literatura

1. Stefan Piechnik – „Wytrzymałość materiałów dla wydziałów budowlanych” – Warszawa-Kraków 1980, Państwowe Wydawnictwo Naukowe
2. Zbigniew Rusin – „Technologia betonów mrozoodpornych” Polski Cement Sp. z o.o., Kraków 2002
3. Zongjin Li – „Advanced Concrete Technology”, Published by John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey 2011
4. A.M. Neville – „Właściwości betonu”, Polski Cement sp. z o.o., Kraków 2000
5. Magorzata Grzewka, Mariusz Okuń, Radostaw Sekunda – „Poradnik, Prawo Budowlane 2020, Uczmy się wspólnie, Stan prawny na 19.09.2020 r.” – PZITB Oddział Warszawski 2020

