

Właściwości mechaniczne betonu drukowanego w technologii 3D – chińskie podejście normowe

Mechanical Properties of 3D-Printed Concrete – The Chinese Standard Approach



dr hab. inż. Paweł Sikora, prof. ZUT

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie,
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska;
Polskie Stowarzyszenie Druku 3D w Budownictwie (PL-3DPC)
pawel.sikora@zut.edu.pl
ORCID: 0000-0003-1092-1359



dr inż. Szymon Skibicki

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie,
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska;
Polskie Stowarzyszenie Druku 3D w Budownictwie (PL-3DPC)
szymon.skibicki@zut.edu.pl
ORCID: 0000-0002-2918-7759



prof. dr Guan Lin

Southeastern University of Science and Technology
Shenzhen, Chiny
ORCID: 0000-0003-3745-8675

Streszczenie

Artykuł przedstawia metody badania właściwości mechanicznych betonów stosowanych w technologii druku 3D zgodnie z chińską normą T/CBMF 183-2022. Omówiono sposób pobierania próbek bezpośrednio z wydrukowanych elementów kwalifikacyjnych oraz metody oznaczania ich cech mechanicznych. Zaprezentowano metodykę przygotowania próbek do badań w zależności od charakterystyki drukowanego elementu, procedury badań oraz kryteria akceptacji rezultatów. Zaproponowane

metody badań umożliwiają kompleksową ocenę kluczowych właściwości wpływających na pracę wydrukowanej konstrukcji, uwzględniając nie tylko szczepność międzywarstwową, lecz także parametry mechaniczne samej warstwy. Ze względu na brak krajowych norm i wytycznych związanych z tą tematyką metody badawcze przedstawione w normie mogą stanowić podstawę do adaptacji w celu prowadzenia wewnątrzlaboratoryjnej oceny drukowanych elementów.

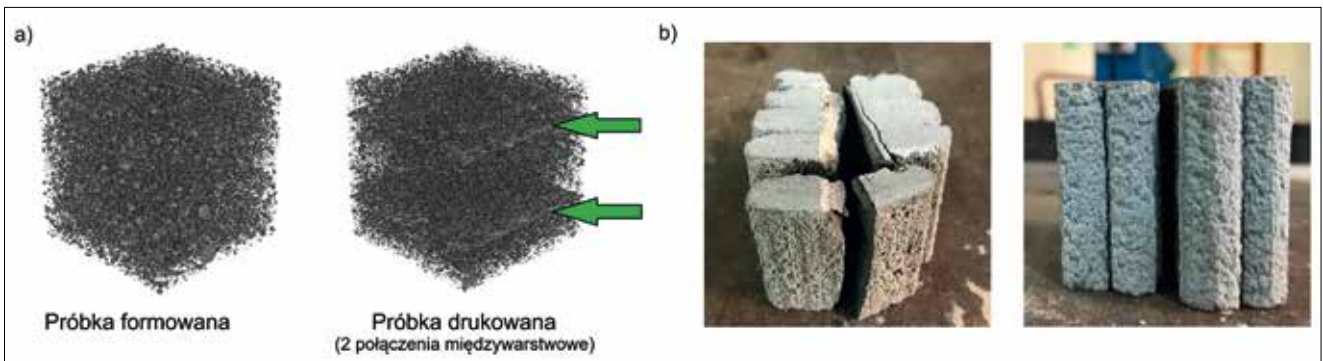
Słowa kluczowe budownictwo przyrostowe, druk 3D, beton, normy, wytwarzanie przyrostowe

Abstract

The article presents methods for testing the mechanical properties of concretes used in 3D printing technology in accordance with the Chinese standard T/CBMF 183-2022. It discusses procedures for sampling taken directly from printed qualification elements as well as methods for determining their mechanical characteristics. The methodology for specimen preparation is presented depending on the characteristics of the printed element, along with testing procedures and acceptance criteria of results.

The proposed testing methods enable a comprehensive assessment of key properties affecting the performance of printed structures, taking into account interlayer bonding as well as the mechanical parameters of individual layers. Due to the lack of national standards and guidelines related to this topic, the testing methods presented in the standard may serve as a basis for adaptation for the purpose of conducting in house laboratory evaluations of printed elements.

Keywords additive construction, 3D printing, concrete, standards, additive manufacturing



Fot. 1. a) Mikrotomografy rentgenowskie ($20 \times 20 \times 20$ mm) próbek formowanych i drukowanych [5], b) przykładowe modele zniszczenia próbki na połączeniu międzywarstwowym [6]

WPROWADZENIE

Pomimo znaczącego rozwoju technologii budownictwa przyrostowego (druku 3D) mieszankami betonowymi nadal brakuje odpowiednich wymagań technicznych i legislacyjnych związanych z jej zastosowaniem. Aktualny stan normalizacyjny został skrótowo omówiony m.in. w [1, 2]. Wśród kluczowych wyzwań dotyczących wykorzystania technologii druku 3D betonu w budownictwie – zwłaszcza najczęściej stosowanej metody ekstruzji, czyli wytłaczania – należy wskazać anizotropię właściwości mechanicznych wytwarzanych elementów. Zjawisko to wynika ze specyfiki produkcji elementów budowlanych tą metodą, czyli poprzez proces depozycji (nakładania) materiału w sposób warstwowy (tj. warstwa po warstwie). W rezultacie dochodzi pomiędzy nimi do tworzenia się stref szczepnych o lokalnie zwiększonej porowatości (fot. 1). Na skalę występującej anizotropii właściwości mechanicznych wydrukowanego kompozytu cementowego oddziałuje wiele czynników. Główny wpływ na to zjawisko mają [3, 4]:

- technika drukowania (m.in. typ zastosowanej drukarki, dyszy, głowicy czy ekstrudera);
- prędkość wydruku (m.in. szybkość poruszania się głowicy oraz czas, w jakim zostanie ułożona kolejna warstwa materiału na wcześniej wydrukowanym podłożu/warstwie);
- właściwości mieszanki (m.in. jej skład, parametry reologiczne i czas jej przydatności do drukowania, czyli czas, w którym

możliwe jest wytłoczenie materiału przy zachowaniu jego właściwości);

- szczepność międzywarstwowa (np. przerwy technologiczne i jakość połączeń międzywarstwowych), czyli czynnik powiązany z trzema poprzednimi właściwościami, zwłaszcza z czasem ułożenia kolejnej warstwy na wcześniejszej oraz parametrami samej mieszanki do druku 3D.

Na skutek procesów pompowania, a następnie ekstruzji kształt porów w elementach drukowanych jest znacznie wypłaszczony (wydłużony) w kierunku wytłaczania [5]. W wyniku tego zjawiska [5, 7–9] **różnica w wytrzymałości na ściskanie lub zginanie między próbkami formowanymi a drukowanymi może wynosić nawet 60%** [10] na niekorzyść tych ostatnich. W związku z tym w celu poprawnej oceny właściwości mechanicznych

powinno pomniejszonej skali. Podobne podejście jest prezentowane w omawianej w tym artykule chińskiej normie T/CBMP 183-2022. Test methods for basic mechanical properties of 3D printed concrete [12]. Odpowiada ono poniekąd prowadzeniu badań polowych obiektów budowlanych za pomocą próbek rdzeniowych (odwierty), lecz w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych.

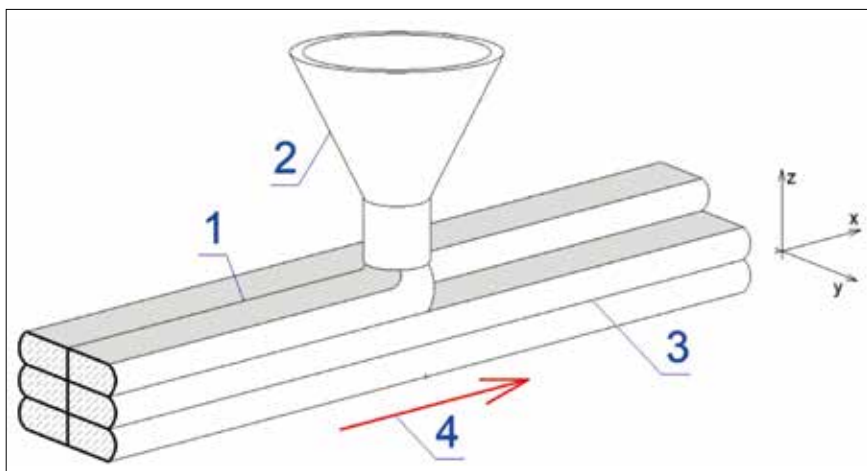
ZAKRES NORMY

Chińska norma [12] jest poświęcona metodom badania wybranych parametrów mechanicznych betonu wykonywanego w technologii przyrostowej. Została wydana wspólnie z normą T/CBMP 184-2022 Test Methods for Printability of 3D Printing Fresh Concrete [13], która dotyczy badania właściwości betonu w stanie

Zaproponowane metody badań umożliwiają kompleksową ocenę kluczowych właściwości wpływających na pracę wydrukowanej konstrukcji.

obiektów drukowanych zaleca się pobieranie próbek z wydrukowanych elementów testowych lub rzeczywistych. Według projektu opracowywanej amerykańskiej normy ICC 1150 Standard for 3D Automated Construction Technology for 3D Concrete Walls [11] próbki są pobierane z tzw. elementów kwalifikacji wstępnej wykonanych w technologii druku 3D w od-

świeżym [2], i podobnie jak ona nie przedstawia minimalnych wymagań wytrzymałościowych stawianych kompozytom cementowym, lecz opisuje jedynie metodologię prowadzenia prac badawczych. Istotnym zapisem w normie [12] jest zastrzeżenie, że w dokumencie zaprezentowano metodologię prowadzenia badań niszczących na wybranych kierunkach



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie procesu wydruku elementu wraz z osiami: 1) połączenie międzypasmowe, 2) głowica wraz z dyszą drukującą, 3) połączenie międzywarstwowo, 4) kierunek wydruku, X) kierunek ruchu głowicy drukującej, Y) kierunek międzypasmowy, Z) kierunek międzywarstwowo

druku (X, Y lub Z), a dobór badanego kierunku obciążenia próbki podczas badania powinien być zgodny ze schematem statycznym konstrukcji i kierunkiem jej obciążania. W rezultacie nie jest wymagane realizowanie badań anizotropii mechanicznej, tj. w każdym z kierunków wydruku.

Rys. 1 prezentuje typowy proces wydruku elementu metodą ekstruzji wraz z zaznaczonymi kierunkami (osiami). Oś X jest traktowana jako kierunek posuwu głowicy drukującej, prostopadła oś Y to kierunek między pasmami (ścieżkami) wydruku, a pionowa Z – między jego warstwami.

Tab. 1. Wymagane wymiary przekroju poprzecznego próbek w zależności od szerokości drukowanej warstwy

Szerokość drukowanej warstwy (ścieżki) (b) [mm]	Wymiar poprzeczny/średnica próbki [mm]
$b \leq 35$	70,7
$35 < b \leq 50$	100,0
$50 < b \leq 75$	150,0



Fot. 2. Przykład wydruku obiektu budowlanego jedną ścieżką szerokości 25 cm (h = 5 cm) [14]

PRZYGOTOWANIE PRÓBEK DO BADAŃ MECHANICZNYCH

Wydrukowany element próbny (wykonany przy zachowaniu tożsamyh parametrów wydruku jak element rzeczywisty), z którego są pobierane próbki badawcze, powinien być pielęgnowany zgodnie z wymaganiami normy, a wytrzymałość mechaniczna jest oznaczana w temperaturze $20 \pm 5^\circ\text{C}$ przy wilgotności względnej nienizszej niż 50%. Dobór wymiarów próbek badawczych jest dokonywany w zależności od szerokości drukowanej ścieżki (tab. 2). Jeżeli nie przekracza ona 75 mm, wymiary przekroju poprzecznego/średnicy próbek należy dobrać zgodnie z tab. 1. Jednocześnie trzeba zadbać o to, by próbka badawcza zawierała przynajmniej trzy połączenia międzywarstwowe (kierunek Z – rys. 1) oraz dwa połączenia międzypasmowe (kierunek Y – rys. 1).

W przypadku gdy drukowany element betonowy jest obiektem niezawierającym połączeń międzypasmowych (wydruk odbywa się jedną ścieżką – fot. 2), badana próbka powinna zawierać co najmniej dwa połączenia międzywarstwowe. Jeżeli drukowany element nie spełnia opisanych parametrów (np. wydruk elementów dwupasmowych warstwami szerokości > 75 mm), istnieje wymóg, aby szerokość/średnica przekroju poprzecznego próbki wynosiła 150 mm i zawierała minimum po jednym połączeniu międzywarstwowym oraz międzypasmowym.

Bardzo istotne jest to, aby połączenia międzywarstwowe były rozmieszczone w próbce lub – w przypadku występowania jednego połączenia – w jej środku, w miarę możliwości symetrycznie. Norma dopuszcza prowadzenie badań na próbkach rdzeniowych (cylindrycznych). W razie zaistnienia w przygotowanych próbkach zauważalnych niedoskonałości można zastosować masy naprawcze o odpowiednich parametrach mechanicznych.

BADANIA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH

Oznaczenie parametrów mechanicznych próbek jest prowadzone na ich minimalnej

liczbie, którą przedstawiono w tab. 2. Jeżeli różnica między wartością maksymalną lub minimalną w zmierzonych wartościach a wartością średnią przekracza 15% (dla modułu Younga 20%) wartości średniej, należy wyeliminować odpowiednią próbkę i ponownie wyznaczyć średnią arytmetyczną. Wynik uznaje się za wiarygodny wtedy, gdy jest możliwe wyznaczenie średniej wytrzymałości z przynajmniej trzech oznaczeń:

1. Wytrzymałość na ściskanie

W zależności od badanego kierunku obciążenia oznaczenie wytrzymałości na ściskanie próbek sześciennych (wariant 1) odbywa się według schematu przedstawionego na rys. 2. W przypadku wariantu 2, w którym oznaczenie wytrzymałości na ściskanie jest przeprowadzane na próbkach belkowych, stosuje się podejście zgodne z rys. 2, a próbki są umiejscowione w pozycji „stojącej” o odpowiednich polach przekroju, czyli 100×100 lub 150×150 mm (tj. najdłuższy wymiar próbki zlokalizowany prostopadle do kierunku przykładania obciążenia).

Wytrzymałość na ściskanie oblicza się w MPa (z dokładnością do 0,1 MPa) podobnie jak w przypadku klasycznego testu wytrzymałości na ściskanie, czyli dzieląc wartość siły niszczącej [N] przez pole powierzchni badanej próbki [mm²]. Rezultatem badania jest średnia arytmetyczna spełniająca kryteria opisane w artykule w części, która była poświęcona przygotowaniu próbek do badań mechanicznych.

2. Statyczny moduł sprężystości podłużnej (moduł Younga) przy ściskaniu

Do oznaczenia statycznego modułu sprężystości przy ściskaniu mogą być stosowane próbki rdzeniowe lub cylindryczne (formowane) o wymiarach odpowiadających wymaganiom podanym w tab. 2, a badanie jest realizowane zgodnie ze schematami prezentowanymi na rys. 2. Wykonuje się 12 próbek, z których połowa służy do wyznaczenia osiowej wytrzymałości na ściskanie, a pozostałe do oznaczenia modułu sprężystości.

Tab. 2. Wymiary próbek w zależności od badanej cechy mechanicznej

Typ badania	Opis badania	Wymiary próbek [mm]	Minimalna liczba próbek w teście
Wytrzymałość na ściskanie (wariant 1)	punkt 1	$70,7 \times 70,7 \times 70,7$ $100,0 \times 100,0 \times 100,0$ $150,0 \times 150,0 \times 150,0$	6
Wytrzymałość na ściskanie z uwzględnieniem stateczności (wariant 2)	punkt 1	Próbki prostokątne $100 \times 100 \times 300$ $150 \times 150 \times 300$ Próbki cylindryczne $\varnothing = 100$ i $h = 200$ $\varnothing = 150$ i $h = 300$	6
Stacyjny moduł sprężystości podłużnej (moduł Younga)	punkt 2	Próbki prostokątne $100 \times 100 \times 300$ $150 \times 150 \times 300$ Próbki cylindryczne $\varnothing = 100$ i $h = 200$ $\varnothing = 150$ i $h = 300$	12
Wytrzymałość na zginanie	punkt 3	$70,7 \times 70,7 \times 300,0$ $100,0 \times 100,0 \times 400,0$ $150,0 \times 150,0 \times 550,0$	6
Wytrzymałość na rozciąganie przez rozłupywanie	punkt 4	$70,7 \times 70,7 \times 70,7$ $100,0 \times 100,0 \times 100,0$ $150,0 \times 150,0 \times 150,0$	6
Wytrzymałość na ścinanie	punkt 5	$70,7 \times 70,7 \times 200,0$ $100,0 \times 100,0 \times 300,0$ $150,0 \times 150,0 \times 450,0$	6

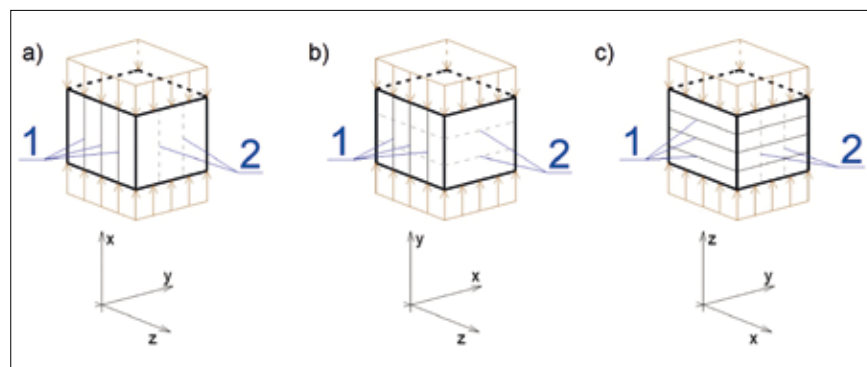
Analogicznie do normy europejskiej EN 12390-13:2014-02. Testing hardened concrete – Determination of secant modulus of elasticity in compression [15] metoda badania polega na cyklicznym obciążeniu próbki w zakresie naprężeń od 0,5 MPa do 1/3 osiowej wytrzymałości próbki na ściskanie. Do obliczeń przyjmuje się odkształcenia zarejestrowane podczas ostatniego cyklu obciążenia. Wartość modułu Younga jest

obliczana na podstawie przyrostu naprężeń i odpowiadających im odkształceń, z uwzględnieniem długości bazy pomiarowej według wzoru:

$$E_c = \frac{F_a - F_0}{A} \cdot \frac{L}{\Delta n} \quad (1)$$

gdzie:

E_c – statyczny moduł sprężystości przy ściskaniu betonu drukowanego 3D [MPa] z zaokrągleniem do 100 MPa,



Rys. 2. Schematyczny diagram kierunku obciążenia w badaniu wytrzymałości na ściskanie sześciannu: 1) połączenie międzywarstwowe, 2) połączenie międzypasmowe

F_a – obciążenie odpowiadające naprężeniu równemu 1/3 osiowej wytrzymałości na ściskanie [N],

F_0 – początkowe obciążenie odpowiadające naprężeniu 0,5 MPa [N],

A – pole powierzchni ściskanej próbki [mm²],

3. Wytrzymałość na zginanie

Badanie wytrzymałości na zginanie jest prowadzone w teście zginania czteropunktowego zgodnie ze schematami statycznymi, które przedstawiono na rys. 3. W tab. 3 zestawiono rozstaw wałków podpierających oraz obciążających w zależności

gdzie:

f_f – wytrzymałość na zginanie betonu drukowanego 3D [MPa] z dokładnością do 0,1 MPa,

F – maksymalne obciążenie [N],

L – odległość między podporami [mm],

b, h – odpowiednio: szerokość i wysokość próbki [mm].

Kontrolą jakości przeprowadzonych badań jest ocena wizualna sposobu zniszczenia próbki. Jeżeli w badanej serii co najmniej trzy próbki ulegną zniszczeniu w przekroju znajdującym się pomiędzy dwiema liniami przyłożenia obciążeń liniowych, wartość wytrzymałości na zginanie należy obliczyć na podstawie wyników tych próbek. Jeżeli dolna krawędź przekroju zniszczenia w więcej niż trzech próbkach znajduje się poza obszarem pomiędzy dwiema liniami działania obciążeń liniowych, wyniki badania tej serii próbek uznaje się za nieważne.

4. Wytrzymałość na rozciąganie przez rozłupywanie

Istotnym aspektem wynikającym z warstwowej struktury próbek, omówionej we wprowadzeniu, jest podejście do zagadnienia wytrzymałości na rozciąganie. Norma wyróżnia dwa warianty badawcze, tj. wytrzymałość na rozłupywanie matrycy cementowej (obciążenie przykładane jest na środku drukowanej warstwy) oraz na rozłupywanie w przestrzeni międzywarstwowej (badanie szczepności międzywarstwowej). W efekcie jest wymagane przygotowanie odpowiednich próbek badawczych o określonym umiejscowieniu warstw.

W ramach badania podstawowej materiałowej wytrzymałości na rozciąganie betonu przy rozłupywaniu obciążenie jest przykładane w centralnej części próbki, z pominięciem styków międzywarstwowych. Schematy dopuszczalnych kierunków obciążenia w tym badaniu przedstawiono na rys. 4. Wartość wytrzymałości oblicza się zgodnie z klasyczną zależnością dla rozłupywania (według wzoru 3), analogiczną do tzw. metody brazylijskiej, szeroko stosowanej w badaniach betonu i opisanej m.in. w normie EN 12390-6:2009.

Rys. i tab. Szymon Skibicki

Wprowadzenie w normie oceny wizualnej kompozytów po zniszczeniu ułatwia potencjalnie niedoświadczonemu personelowi laboratorium identyfikację i kwalifikację próbek.

L – baza pomiarowa (długość pomiarowa) [mm],

$\Delta n = \delta_a - \delta_0$ – średnia wartość przemieszczeń obu boków próbki przy ostatnim cyklu obciążania od F_0 do F_a [mm],

δ_a – średnia wartość przemieszczeń obu boków próbki przy obciążeniu F_a [mm],

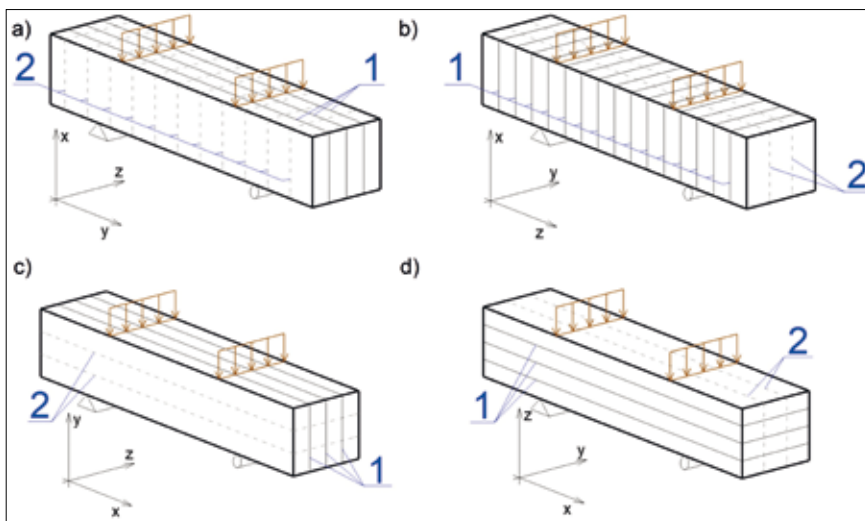
δ_0 – średnia wartość przemieszczeń obu boków próbki przy obciążeniu F_0 [mm].

od wymiaru próbki. Warunkiem wykonania testu jest zadbanie o to, by próbka pomiędzy wałkami obciążającymi nie miała defektów powierzchniowych o średnicy, która przekracza 5 mm, i głębokości większej niż 2 mm. Wytrzymałość na zginanie (f_f) próbki oblicza się według wzoru:

$$f_f = \frac{FL}{bh^2} \quad (2)$$

Tab. 3. Parametry badawcze wytrzymałości na zginanie oraz metoda obciążenia

Wymiar próbki [mm]	Metoda obciążenia	Rozstaw wałków podpierających (podpór) [mm]	Rozstaw wałków obciążających (sił) [mm]
70,7 × 70,7 × 300,0	czteropunktowa	212,1	70,7
100,0 × 100,0 × 400,0	czteropunktowa	300,0	100,0
150,0 × 150,0 × 550,0	czteropunktowa	450,0	150,0



Rys. 3. Schemat kierunków obciążenia w badaniu wytrzymałości na zginanie: a) obciążenie wzdłuż osi X – wariant 1, b) obciążenie wzdłuż osi X – wariant 2, c) obciążenie wzdłuż osi Y, d) obciążenie wzdłuż osi Z (1 – połączenie międzywarstwowe, 2 – połączenie międzypasmowe)

Testing hardened concrete – Part 6: Tensile splitting strength of test specimens [16].

$$f_{ts} = \frac{2F}{\pi S} = 0,637 \cdot \frac{F}{S} \quad (3)$$

gdzie:

f_{ts} – wytrzymałość na rozciąganie betonu drukowanego 3D [MPa] z dokładnością do 0,1 MPa,

F – maksymalne obciążenie [N],

S – pole powierzchni przekroju próbki [mm²].

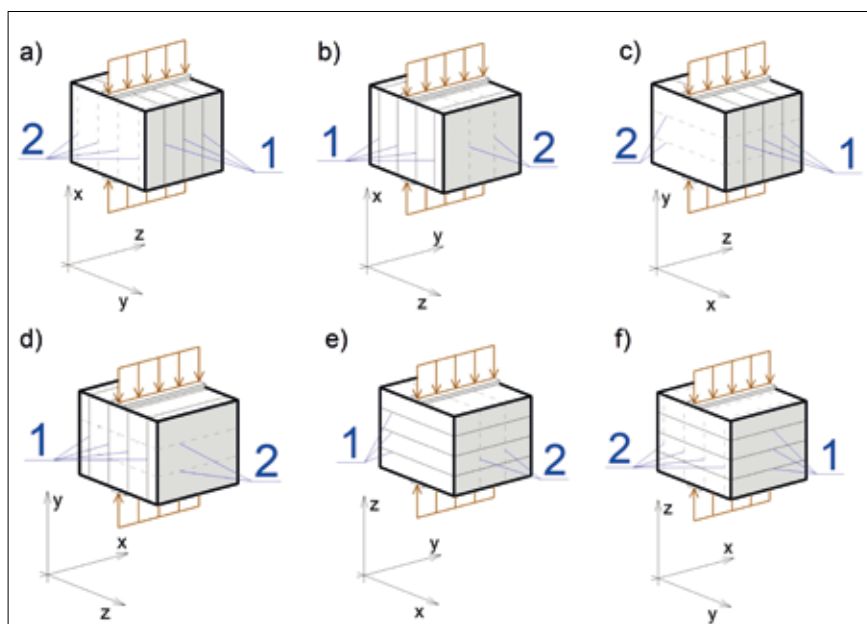
Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu dla połączenia międzywarstwowego jest wykonywane według tej samej procedury obciążania i obliczeń, jednak z celowym usytuowaniem płaszczyzny rozłupywania w obrębie połączenia międzywarstwowego lub międzypasmowego (rys. 5).

5. Wytrzymałość na ścinanie

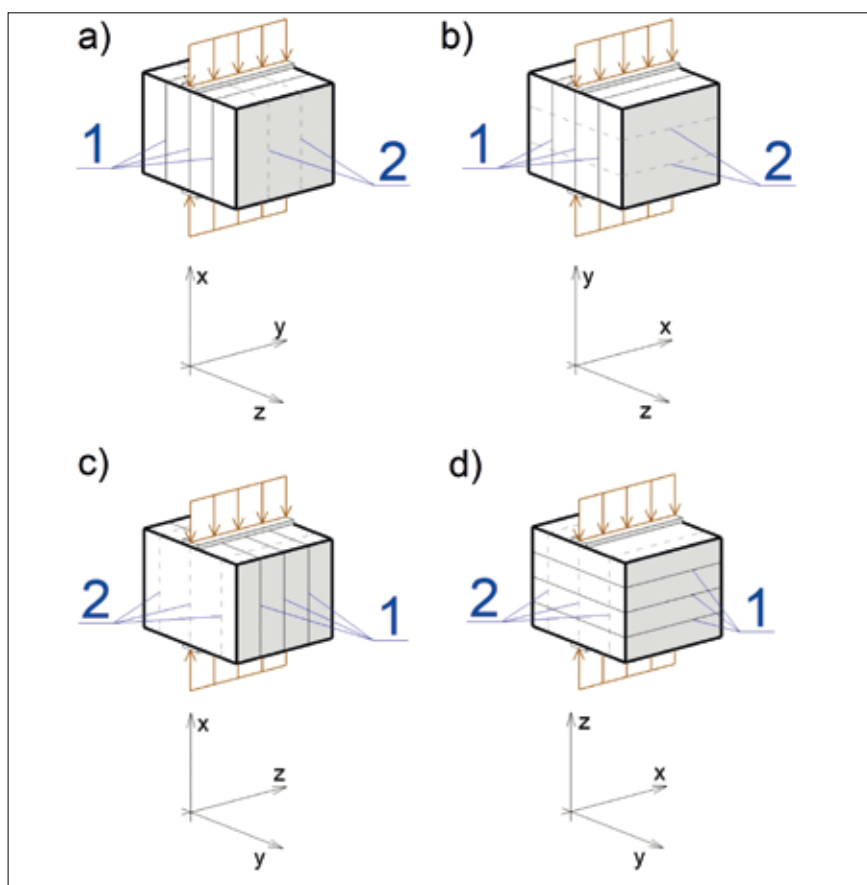
Podobnie jak w przypadku wytrzymałości na rozłupywanie oznaczenie wytrzymałości na ścinanie betonu oznacza się dwiema metodami, które polegają na wyznaczeniu wytrzymałości na ścinanie kompozytu oraz na ścinanie powierzchni międzywarstwowych.

Badania przeprowadza się przy użyciu prasy wytrzymałościowej oraz specjalnego stanowiska do podwójnego ścinania w postaci przekładki montowanej w prasie (rys. 6). Stanowisko to zapewnia współosiowe działanie siły oraz pionowy ruch elementów ścinających bez przemieszczeń bocznych. Norma zaleca zastosowanie przegubów powyżej i poniżej przekładki przedstawionej na rys. 6. Grubość elementu ścinającego H nie może być mniejsza niż 1/10 wysokości przekroju próbki h , rozstaw szczelin elementu ścinającego powinien spełniać warunek $W \geq h$, natomiast dopuszczalne przesunięcie osi elementu ścinającego a mieści się w zakresie od 0 do 1 mm.

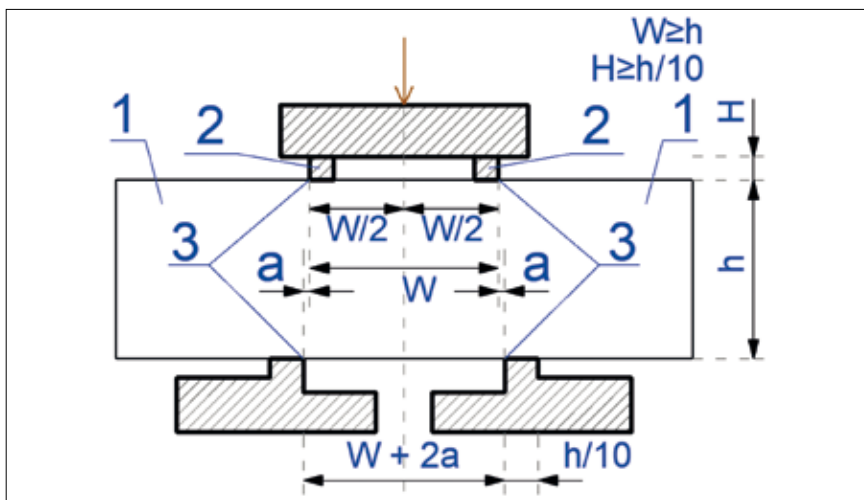
Do badań stosuje się próbki pryzmatyczne o wymiarach określonych w tab. 2. W badaniach kompozytu na spoiwie cementowym rozpatruje się różne orientacje obciążenia względem kierunku druku (rys. 7), a obciążenie przykłada się tak,



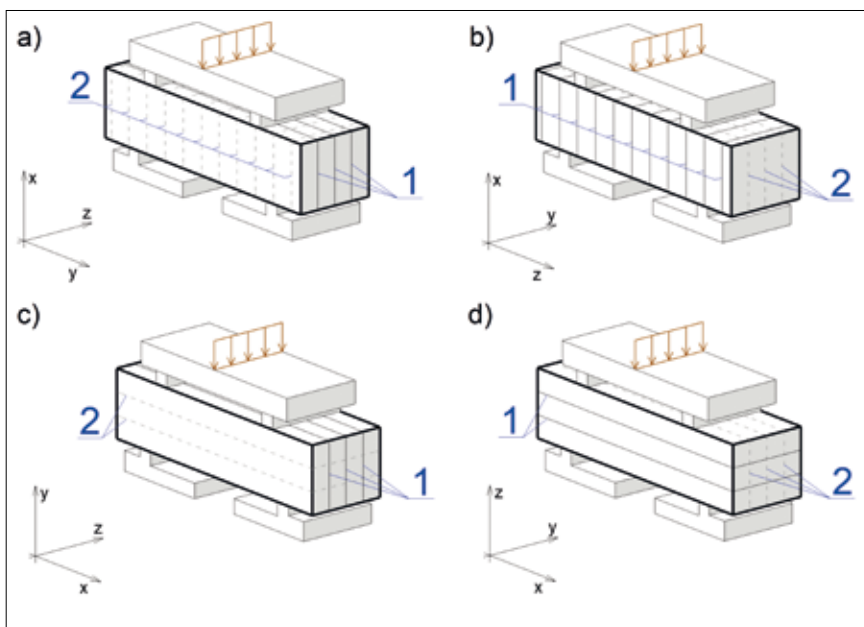
Rys. 4. Schemat kierunków obciążenia w badaniu wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu dla matrycy betonowej: a) obciążenie wzdłuż osi X – wariant 1, b) obciążenie wzdłuż osi X – wariant 2, c) obciążenie wzdłuż osi Y – wariant 1, d) obciążenie wzdłuż osi Y – wariant 2, e) obciążenie wzdłuż osi Z – wariant 1, f) obciążenie wzdłuż osi Z – wariant 2 (1 – połączenie międzywarstwowe, 2 – połączenie międzypasmowe)



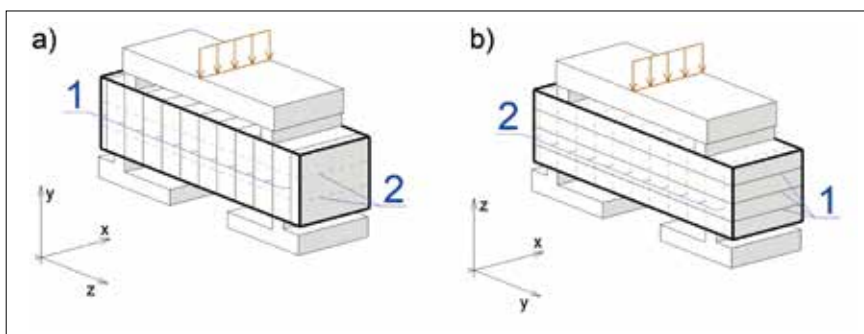
Rys. 5. Schemat kierunków obciążenia w badaniu wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu dla połączeń międzywarstwowych: a) obciążenie wzdłuż osi X – wariant 1, b) obciążenie wzdłuż osi Y, c) obciążenie wzdłuż osi X – wariant 2, d) obciążenie wzdłuż osi Z – wariant 2 (1 – połączenie międzywarstwowe, 2 – połączenie międzypasmowe)



Rys. 6. Schemat stanowiska do badania wytrzymałości na ścinanie (H, h, W, a – opis oznaczeń w tekście): 1) próbka, 2) pręt stalowy, 3) krawędź ścinająca pręta stalowego



Rys. 7. Schemat obciążenia w badaniu wytrzymałości na ścinanie kompozytu na spoiwie cementowym: a) obciążenie wzdłuż osi X – wariant 1, b) obciążenie wzdłuż osi X – wariant 2, c) obciążenie wzdłuż osi Y, d) obciążenie wzdłuż osi Z (1 – połączenie międzywarstwowo, 2 – połączenie międzypasmowe)



Rys. 8. Schemat obciążenia w badaniu wytrzymałości na ścinanie powierzchni międzywarstwowej: a) obciążenie wzdłuż osi Y, b) obciążenie wzdłuż osi Z (1 – połączenie międzywarstwowo, 2 – połączenie międzypasmowe)

żeby wnętrza pojedynczych warstw podlegały ścinaniu. Natomiast przy badaniu wytrzymałości strefy międzywarstwowej obciążenie przykłada się bezpośrednio w strefie styku warstw lub poszczególnych wydrukowanych pasm/ścieżek (rys. 8). Próbkę umieszcza się w urządzeniu tak, aby powierzchnia kontaktu stykała się z elementami ścinającymi, a oś przekładki pokrywała się z osią działania siły prasy.

Obciążenie zwiększa się w sposób ciągły i równomierny z prędkością 0,06–0,10 MPa/s lub równoważnie 0,06–0,10 mm/min. W końcowej fazie badania, gdy próbka zbliża się do zniszczenia i obserwuje się przyspieszenie odkształceń, nie należy zmieniać prędkości obciążania aż do momentu zniszczenia. Rejestrowana jest maksymalna wartość siły niszczącej, a następnie analizowana powierzchnia zniszczenia (rys. 9). Jeżeli odchylenie rzeczywistej płaszczyzny zniszczenia od płaszczyzny przewidywanej przekracza 3 mm, wynik badania uznaje się za nieważny. Ta analiza pozwala na odrzucenie próbek o dużych imperfekcjach technologicznych, które mogą wystąpić w przypadku ograniczenia kontroli wydruku elementów.

Wytrzymałość na ścinanie oblicza się według wzoru:

$$f_v = \frac{F}{2bh} \quad (4)$$

gdzie:

f_v – wytrzymałość na ścinanie betonu drukowanego 3D [MPa] z dokładnością do 0,1 MPa,

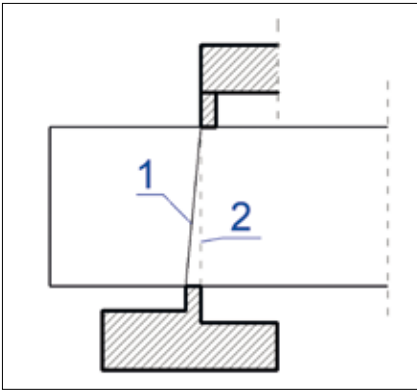
F – maksymalne obciążenie [N],

b, h – odpowiednio: szerokość i wysokość próbki [mm].

PODSUMOWANIE

Norma [12] przedstawia interesujące podejście, wprowadzając rozszerzone możliwości analizy materiałów anizotropowych, co czyni go **szczególnie przydatnym narzędziem badawczym w ocenie właściwości mechanicznych betonu wykonanego w technologii druku 3D**.

W przypadku podstawowych oznaczeń właściwości mechanicznych, tj. wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości



Rys. 9. Schemat do analizy powierzchni zniszczenia próbki w badaniu wytrzymałości na ścinanie: 1) możliwa do wystąpienia realna powierzchnia zniszczenia, 2) przewidywana powierzchnia zniszczenia (zgodnie z symulowanymi naprężeniami ścinającymi)

na zginanie oraz modułu Younga, metoda badawcza jest raczej oczywista i badania są wykonywane analogicznie do zaleceń w obowiązujących obecnie normach dla konwencjonalnych zapraw i betonów. Interesujące podejście zostało natomiast zaprezentowane w stosunku do pozostałych badań. Zaproponowane metody badania wytrzymałości na rozciąganie przez rozłupywanie oraz na ściskanie umożliwiają kompleksową ocenę kluczowych właściwości wpływających na pracę wydrukowanej konstrukcji, uwzględniając nie tylko szczepność międzywarstwową, lecz także parametry mechaniczne samej warstwy.

Warto zauważyć również bardziej liberalne podejście do sposobu kwalifikacji

uzyskanych rezultatów, np. w porównaniu z normą PN-EN 196-1:2016-07: Metody badania cementu – Część 1: Oznaczanie wytrzymałości [17]. Umożliwia to wyznaczanie średniej arytmetycznej wyników z trzech oznaczeń (pomimo badania aż sześciu próbek) oraz dopuszczalnej odchyłki od średniej pojedynczych rezultatów wynoszących 15%. Jest oczywiście, że norma została opracowana w oparciu o połowę doświadczenia związane z aspektami oraz trudnościami, które są skutkiem pewnej niedokładności ujawniającej się w trakcie procesu wydruku oraz samego sposobu preparatyki próbek. Znajduje to odzwierciedlenie w zapisach normy (np. ograniczenia w możliwości symetrycznego rozmieszczenia połączeń międzywarstwowych i międzypasmowych). Istotne jest również wprowadzenie oceny wizualnej próbek po zniszczeniu, dzięki czemu możliwe jest zakwalifikowanie odpowiednich próbek do wyznaczenia średniej arytmetycznej. W efekcie ich identyfikacja i kwalifikacja przez potencjalnie niedoświadczony personel laboratoryjny staje się łatwiejsza. ■

Badania zostały w całości sfinansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBR) w ramach projektu o nr. umowy ERAMIN3/140/Recycl3D/2022 [ERA-NET Cofund ERA-MIN3 (Joint Call 2021)].

Literatura

- [1] Sikora P. i in., „Pierwszy krok w kierunku normalizacji konstrukcji betonowych wykonywanych w technologii druku 3D” w: *Przegląd Budowlany*, nr 5, 2024, s. 146–52, <https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.7216>.
- [2] Sikora P., Skibicki S., Lin G., „Metody badania mieszanek betonowych stosowanych w technologii druku 3D w świetle chińskich norm” w: *Inżynier Budownictwa*, nr 9, 2025, s. 36–40.
- [3] Kolawole J.T. i in., „On the origins of anisotropy of extrusion-based 3D printed concrete: The roles of filament skin and agglomeration” w: *Cement and Concrete Research*, t. 192, 2025, nr 107817, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2025.107817>.
- [4] Skibicki S. i in., „The effect of interlayer adhesion on stress distribution in 3D printed beam elements” w: *Journal of Building Engineering*, t. 87, 2024, nr 109093, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109093>.
- [5] Sikora P. i in., „Insight into the microstructural and durability characteristics of 3D printed concrete: Cast versus printed specimens” w: *Case Studies in Construction Materials* 2022, t. 17, nr e01320, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01320>.
- [6] Joh C. i in., „Buildability and Mechanical Properties of 3D Printed Concrete” w: *Materials*, t. 21, 2020, <https://doi.org/10.3390/ma13214919>.
- [7] Hager I. i in., „Interlayer Bond Strength Testing in 3D-Printed Mineral Materials for Construction Applications” w: *Materials*, t. 15, 2022, <https://doi.org/10.3390/ma15124112>.
- [8] Korol E. i in., „Experimental investigation of concrete beams under bending, manufactured with 3D additive printing technology” w: *Construction Materials*, t. 11, 2025, s. 5–12, <https://doi.org/10.15199/33.2025.11.01>.
- [9] Lee H. i in., „Evaluation of the Mechanical Properties of a 3D-Printed Mortar” w: *Materials*, t. 24, 2019, <https://doi.org/10.3390/ma12244104>.
- [10] Skibicki S. i in., „Anisotropic mechanical properties of 3D printed mortar determined by standard flexural and compression test and acoustic emission” w: *Construction and Building Materials*, t. 452, 2024, nr 138957, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138957>.
- [11] ICC 1150 Standard for 3D Automated Construction Technology for 3D Concrete Walls (trzeci projekt) [dostęp: 9.09. 2025].
- [12] T/CBMF 183-2022. Test methods for basic mechanical properties of 3D printed concrete.
- [13] T/CBMF 184–2022 Test Methods for Printability of 3D Printing Fresh Concrete.
- [14] Sikora P., „Globally first 3D – printed concrete drinking water tank in Barczewko” w: *Structural Concrete*, 2025, <https://doi.org/10.1002/suco.70322>.
- [15] EN 12390-13:2014-02. Testing hardened concrete – Determination of secant modulus of elasticity in compression.
- [16] EN 12390-6:2009. Testing hardened concrete – Part 6: Tensile splitting strength of test specimens.
- [17] PN-EN 196-1:2016-07: Metody badania cementu – Część 1: Oznaczanie wytrzymałości.

