

dr inż. Szymon Skibicki<sup>1)\*</sup>

ORCID: 0000-0002-2918-7759

dr inż. Piotr Szewczyk<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0002-2707-5630

dr inż. Daniel Sibera<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0001-7542-8093

# Strain distribution analysis in multilayered 3D printed beam during 3-point bending process

## *Analiza stanu odkształceń wielowarstwowych drukowanych belek betonowych poddawanych 3-punktowemu zginaniu*

DOI: 10.15199/33.2024.09.02

**Abstract.** The paper presents the results of testing 3D concrete samples, aimed at determining the impact of the effectiveness of interlayer bonding on the mechanical properties of the samples and the failure pattern (electrical resistivity strain gauge technique and digital image correlation (DIC) method were used). The tests showed that limiting the interlayer area led to a reduction in flexural strength by 37.4% and splitting strength by 52.2%.

**Keywords:** 3D concrete; 3D concrete printing; 3DCP; interlayer adhesion; additive manufacturing.

**Streszczenie.** Artykuł przedstawia wyniki badań próbek betonowych, wykonanych w technologii druku 3D, mających na celu określenie wpływu efektywności zespolenia międzywarstwowego na właściwości mechaniczne próbek oraz mechanizmu ich zniszczenia (wykorzystano technikę tensometrii elektrooporowej oraz metodę cyfrowej korelacji obrazu (DIC)). Badania wykazały m.in., że ograniczenie pola szczepności międzywarstwowej doprowadziło do zredukowania wytrzymałości na zginanie o 37,4% oraz na rozłupywanie o 52,2%.

**Słowa kluczowe:** beton 3D; druk 3D betonu; szczepność międzywarstwowa; wytwarzanie przyrostowe.

The technology of 3D concrete printing has been developing very dynamically in recent years, with many research teams focusing on the material aspects of this process [1]. From a practical perspective, there is a need to develop computational methods for this type of construction. To achieve this, it is essential to conduct studies that allow for the description of the behavior of such structures. The research should cover both the properties of the fresh and hardened cementitious composite. Numerous research teams have conducted studies on fresh cement composites [2]. New testing methods have been developed to assess the printability of the mix, enabling the evaluation of the behavior of fresh concrete mixtures. Various methods have been used for this purpose, including rheometric and rheological tests [3], uniaxial unconfined compression tests [4, 5], and other methods analyzing the behavior of fresh concrete mixtures [6]. Extensive research has also been conducted in this area, including the analysis of the failure mode of fresh concrete samples [2]. A different challenge is the analysis of the behavior of cured cementitious composites made using 3D printing technology. Many research teams have confirmed that structures produced using this technology exhibit anisotropic properties [9]. The reason for these properties lies in the printing process itself, which involves layering successive materials. When a relatively long time elapses between the placement of consecutive layers, this can lead to a high degree of reduction in interlayer bonding, which in turn can result in

Technologia druku 3D betonu rozwija się w ostatnich latach bardzo dynamicznie, a wiele zespołów badawczych koncentruje się na problematyce materiałowej tego procesu [1]. Z praktycznego punktu widzenia istnieje potrzeba opracowania metod obliczeniowych tego typu konstrukcji. W tym celu niezbędne jest wykonanie badań, które pozwolą na opisanie pracy konstrukcji wykonanych w technologii druku 3D. Badania powinny obejmować właściwości niestwardniałego i stwardniałego kompozytu na spoiwie cementowym. Wiele zespołów badawczych przeprowadziło badania dotyczące niestwardniałego betonu [2]. W celu określenia drukowalności mieszanki betonowej powstały nowe metody badawcze, pozwalające na ocenę sposobu zachowania się świeżej mieszanki. W tym celu wykorzystywano dotychczas różne metody, w tym badania reometryczne i reologiczne [3], testy jednoosiowego ściskania z możliwością rozszerzalności bocznej (ang. *Uniaxial Unconfined Compression Test*) [4, 5], a także inne metody analizujące zachowanie się świeżej mieszanki betonowej [6]. Prowadzono też szerokie badania dotyczące sposobu zniszczenia niestwardniałej próbki [2]. Innym problemem jest analiza zachowania się stwardniałego kompozytu na spoiwie cementowym wykonanego w technologii druku 3D. Wiele zespołów badawczych potwierdziło, że konstrukcje wykonane w tej technologii wykazują właściwości anizotropowe [7]. Powodem jest proces wydruku, który polega na nakładaniu kolejnych warstw materiału na siebie.

W przypadku, gdy między ułożeniem kolejnych warstw mija długi czas, może dojść do wysokiego stopnia redukcji szczepności międzywarstwowej, co z kolei prowadzi do zmniejszenia wytrzymałości materiału w jednym z kierunków [7, 8]. Badania dotyczące tego zagadnienia, szczególnie

<sup>1)</sup> Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

\* Correspondence address: szymon.skibicki@zut.edu.pl

decreased material strength in one direction [7, 8]. Research on this issue, especially in cases of long time intervals (over 45 minutes), is very limited [8, 10 ÷ 12]. Long time intervals lead to significant reductions in the interlayer surface area, which directly affects the strength and failure mode of the structure.

The aim of this work is to assess the behavior of samples produced using 3D printing technology with a limited (controlled) interlayer surface area. The research contributes to the development of concrete technology and concrete structures, particularly in the analysis of the failure of multilayer printed structures. A model-based approach to the topic and a qualitative demonstration of trends related to the reduction of the interlayer area are crucial in this research. The reduction of the interlayer surface area was achieved using a 0.25 mm thick PVC film coated with a release agent.

Three types of samples were tested: i) reference samples (without interlayer area deterioration); ii) samples with a 50% reduction in interlayer area; iii) samples with a 75% reduction in interlayer area. The studies showed that reducing the surface area significantly affects not only the mechanical properties but also the failure mode of the samples.

## Experimental procedure

**Mix design.** The used 3D printable mix was based on previous research [8, 13]. The mix consist 580 kg/m<sup>3</sup> of Portland cement CEM I52.5R, 166 kg/m<sup>3</sup> of Fly ash, 83 kg/m<sup>3</sup> of silica fume as binder. The water content is equal to 200 kg/m<sup>3</sup>. The designed mix had a water to cement ratio (w/c) of 0.344 and a water to binder ratio (w/b) of 0.241. The natural sand aggregate below 2 mm was used in amount of 1335 kg/m<sup>3</sup>. The suitability for printing was achieved with a dosage of 2 kg/m<sup>3</sup> of polycarboxylate powder water-reducing admixture.

**Experimental procedure.** Tests were conducted to evaluate the flexural strength of cement composites (on 4 cm x 4 cm x 16 cm beams) and compressive strength (on halves of the 4 cm x 4 cm x 16 cm beams) on traditionally molded samples, in accordance with the standard [14]. Subsequently, a series of tests were performed on printed samples with a limited interlayer area. The testing process was divided into the following steps:

1) printing the samples using 3D cement composite printing technology. The printing was carried out using a Cartesian robot combined with a specialized extruder (a detailed description of the printing system is provided in previous works of the team [15, 16]). The level of interlayer bonding was reduced using a plastic film placed in the interlayer area. Three types of samples were printed: i) a reference sample (without any reduction of the interlayer area) – RIA0; ii) samples with a 50% reduction in the interlayer area – RIA50; iii) samples with a 75% reduction in the interlayer area – RIA75. The printing process of the sample is shown in Photo 1a. The scheme and an example of the implementation of the interlayer area reduction are shown in Photo 2. The samples were cured according to the standard [14], for the first 7 days at a humidity

w przypadku długich interwałów czasowych (większych niż 45 min), są bardzo ograniczone [8, 10 ÷ 12]. Długie interwały czasowe prowadzą bowiem do znacznej redukcji pola powierzchni międzywarstwowej, co przekłada się bezpośrednio na wytrzymałość i sposób zniszczenia struktury.

Celem pracy prezentowanej w artykule była ocena zachowania się próbek wykonanych w technologii druku 3D o ograniczonej (kontrolowanej) powierzchni międzywarstwowej. Badania stanowią wkład w rozwój technologii betonu oraz konstrukcji betonowych w zakresie zniszczenia wielowarstwowej konstrukcji drukowanej. Istotne w badaniach jest modelowe podejście do tematu oraz pokazanie efektów wynikających ze zmniejszenia pola styku międzywarstwowego. Zmniejszenie pola powierzchni styku uzyskano za pomocą folii PVC grubości 0,25 mm pokrytej środkiem antyadhezyjnym.

Badaniom poddano trzy typy próbek: i) próbki referencyjne (bez uszkodzeń obszaru międzywarstwowego); ii) próbki ze zmniejszeniem pola powierzchni międzywarstwowej o 50%; iii) próbki ze zmniejszeniem pola powierzchni międzywarstwowej o 75%. Badania wykazały, że redukcja powierzchni pola w sposób istotny wpływa nie tylko na właściwości mechaniczne, ale także na sposób zniszczenia próbki.

## Metoda badań

**Mieszanka betonowa.** W badaniach zastosowano autorską mieszankę do druku 3D, opracowaną na potrzeby publikacji [8, 13]. Zastosowano spoiwo zawierające: 580 kg/m<sup>3</sup> cementu portlandzkiego CEM I 52.5R; 166 kg/m<sup>3</sup> popiołu lotnego oraz 83 kg/m<sup>3</sup> pyłu krzemionkowego. Zawartość wody w mieszance wynosiła 200 kg/m<sup>3</sup>. Zaprojektowana mieszanka miała wskaźnik w/c = 0,344 oraz w/s = 0,241. Jako kruszywo naturalne użyto piasku o uziarnieniu do 2 mm w ilości 1335 kg/m<sup>3</sup>. W celu uzyskania odpowiedniej konsystencji mieszanki, pozwalającej na jej wydruk, zastosowano superplastyfiktor polikarboksyłanowy w ilości 2 kg/m<sup>3</sup>.

**Procedura badawcza.** Wykonano badania wytrzymałości na zginanie (na belkach 4 x 4 x 16 cm) i ściskanie (na połówkach belek 4 x 4 x 16 cm) próbek formowanych tradycyjnie, zgodnie z normą [14]. Następnie wykonano badania próbek drukowanych z ograniczoną powierzchnią styku międzywarstwowego. Proces badań był podzielony na następujące kroki:

1) wydruk próbek z kompozytów cementowych w technologii druku 3D. Został on wykonany za pomocą robota kartezjańskiego zespolonego ze specjalną wytłaczarką (szczegółowy opis systemu do druku przedstawiono w pracach [15, 16]). Poziom szczepności międzywarstwowej był redukowany za pomocą folii z tworzywa sztucznego umieszczonej w przestrzeni międzywarstwowej. Trzy typy próbek zostały wydrukowane: i) próbka referencyjna (bez redukcji pola powierzchni obszaru międzywarstwowego) – RIA0; ii) próbki ze stopniem redukcji pola powierzchni międzywarstwowej o 50% – RIA50; iii) próbki ze stopniem redukcji pola powierzchni międzywarstwowej o 75% – RIA75. Proces wydruku próbki przedstawiono na fotografii 1a, a schemat oraz przykład realizacji redukcji stopnia przyczepności międzywarstwowej na fotografii 2. Próbki do czasu badania by-



of 95%±5% and for the next 21 days at a humidity of 65%±5%.

2) Stress analysis and failure mode were evaluated through three-point flexural tests, conducted in accordance with the standard [14]. However, the loading speed was reduced to 0.2 mm/min to capture the behavior of the sample at failure. The tests were performed on a Zwick/Roell Z600 electromechanical press. Strain gauges were attached to one of the side surfaces of the sample to measure the strain in each layer (Photo 1b and 3a). Measurement points 1 and 2 were located in the compression zone, while points 3 and 4 were in the tension zone of the sample.

The strain gauges used had a gauge length of 20 mm and a resistance of 120 Ω. A special black-and-white pattern was applied to the other surface of the sample (Figure 3b) to enable strain measurements using the digital image correlation (DIC) method. The ARAMIS SRX system with the MV300 measurement field was used, allowing for precise observation of the failure process at the entire side surface of the sample.

3) Additional tests were conducted to determine the compressive strength of the printed samples and the splitting tensile strength ( $f_{ct}$ ) in accordance with the standard [17]. The strength was calculated using the formula (1) according to [17]:

$$f_{ct} = \frac{2F}{\pi \cdot l \cdot d} \quad (1)$$

Description of symbols according to the standard [17]:

F – maximum load [N];

l – length of the contact line of the specimen [mm];

d – cross-sectional dimension [mm].

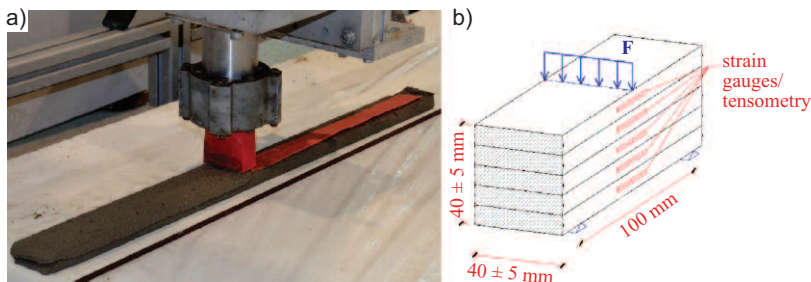


Photo 1. Sample during printing process (a) and 3-point bending testing diagram (b)  
Fot. 1. Próbkę podczas wydruku (a) oraz schemat badania próbki podczas 3-punktowego zginania (b)

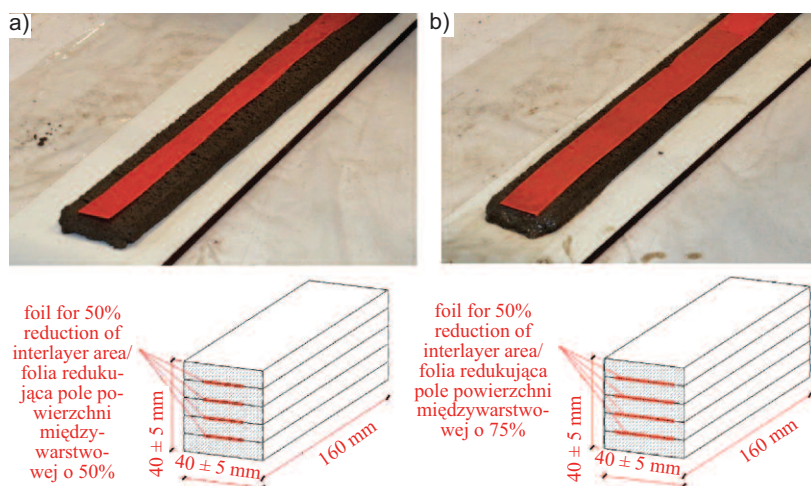


Photo 2. Example of reducing the degree of interlayer adhesion using foil: a) for 50% reduction (RIA50); b) for 75% reduction (RIA75)  
Fot. 2. Przykład redukcji stopnia szczytności międzywarstwowej za pomocą folii: a) redukcja 50% (RIA50); b) redukcja 75% (RIA75)

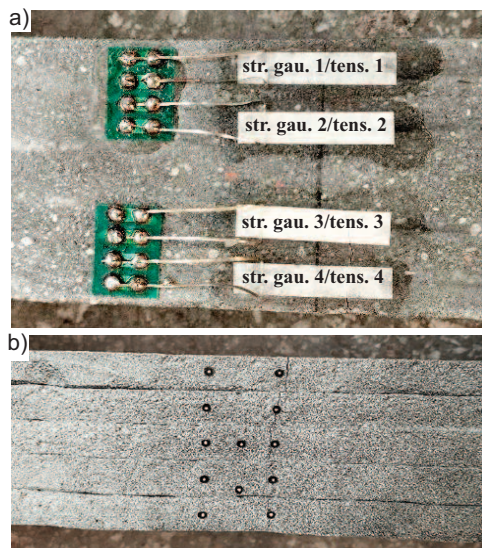


Photo 3. Sample prepared for testing: a) side surface of the sample with visible location of strain gauges; b) side surface of the sample with a pattern applied for measurements using the ARAMIS SRX system  
Fot. 3. Próbkę przygotowana do badania: a) powierzchnia boczna próbki z widoczną lokalizacją tensometrów elektrooporowych; b) powierzchnia boczna próbki z nałożonym deseniem służącym do pomiarów systemem ARAMIS SRX

ły pielęgnowane analogicznie do zaleceń normy [14]; przez pierwsze 7 dni w wilgotności 95%±5% oraz przez następne 21 dni w wilgotności 65%±5%;

2) analiza naprężeń i sposobu zniszczenia została przedstawiona w badaniu 3-punktowego zginania wykonanego w analogii do normy [14], ale w stosunku do zaleceń normy zmniejszono prędkość obciążania próbek do wartości 0,2 mm/min w celu zarejestrowania ich zachowania podczas niszczenia. Badania zostały wykonane z zastosowaniem prasy elektromechanicznej. Na jednej z powierzchni bocznej próbki naklejono tensometry elektrooporowe w celu pomiaru wartości odkształceń każdej warstwy (fotografie 1b i 3a). Punkty pomiarowe 1 i 2 zlokalizowano w strefie ścisanej, a punkty 3 i 4 w strefie rozciąganej próbki. Zastosowano tensometry o długości pomiarowej 20 mm i oporności 120 Ω. Na drugiej powierzchni próbki wykonano specjalny biało-czarny desień (fotografia 3b), umożliwiający pomiar odkształceń metodą cyfrowej korelacji obrazu (DIC). Wykorzystano system ARAMIS SRX z przestrzenią pomiarową MV300, który pozwolił na precyzyjną obserwację procesu niszczenia próbki na całej jej powierzchni bocznej;

3) dodatkowo wykonano badania wytrzymałości na ściskanie próbek drukowanych oraz wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu ( $f_{ct}$ ) zgodnie z normą [17]. Wytrzymałość wyznaczono wg wzoru (1) z [17]:

$$f_{ct} = \frac{2F}{\pi \cdot l \cdot d} \quad (1)$$

Opis symboli zgodnie z normą [17]:

F – obciążenie maksymalne [N];

l – długość linii styku próbki [mm];

d – deklarowany wymiar przekroju poprzecznego [mm].

4) a theoretical analytical model considering interlayer reduction, similar to composite structures, is presented.

All the tests described above were conducted 28 days after the printing was completed, with each test performed on a minimum of three samples. For each result, the coefficient of variation (CoV) was calculated and is shown in Figure 1. The CoV value was calculated using the formula:  $CoV = \sigma/\bar{x}$ , where the standard deviation is  $\sigma = \sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2/n}$ ,  $\bar{x}$  is the mean value,  $x_i$  is the result of an individual test, and  $n$  is the total number of tests.

### Results and analysis of laboratory tests

The test results of casted samples (REF) and printed samples (RIA0, RIA50, RIA75) are compared in Figure 1. All mechanical parameters decrease with the increasing reduction of the interlayer surface area. It is noteworthy that the smallest decreases are observed in compressive strength – by a maximum of 13% (sample RIA75) compared to the reference sample (Figure 1a). In the case of flexural and splitting tensile strength, the reduction reaches 37.4% and 52.2%, respectively (sample RIA75) compared to the reference sample (Figures 1b and 1c, respectively).

Photo 4 presents results from the analysis of the side surface of the specimen using the Aramis SRX system. The graphics show the strain distribution in the horizontal direction. Photo 4a depicts the observed failure mechanism of the RIA0 sample. The left image shows the surface of the sample just before failure, and the right image shows it immediately after failure. The failure mechanism involved the instant development of a single crack upon reaching the maximum load, which is consistent with the mechanism observed in the failure of traditionally casted concrete samples. Photo 4b shows the crack development mechanism in the RIA50 sample. A two-stage crack development is visible here. In the first stage, the crack develops only in the layer subjected to the highest tensile stresses. In the second stage, after reaching the maximum load,

4) przedstawiono teoretyczny model analityczny uwzględnienia redukcji międzywarstwowej w analogii do konstrukcji zespolonych.

Wszystkie opisane badania zostały wykonane na minimum trzech próbkach po 28 dniach od ich wydruku. W przypadku każdego wyniku obliczono współczynnik zmienności (CoV), który podano na rysunku 1. Wartość obliczono z wzoru:  $CoV = \sigma/\bar{x}$ , gdzie odchylenie standardowe wynosi  $\sigma = \sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2/n}$ ,  $\bar{x}$  jest wartością średnią,  $x_i$  to wynik poszczególnego badania, a  $n$  – liczba wszystkich badań.

### Wyniki i analiza badań laboratoryjnych

Wyniki badań próbek formowanych tradycyjnie (REF) oraz próbek drukowanych (RIA0, RIA50, RIA75) porównano na rysunku 1. Wszystkie parametry mechaniczne zmniejszają się wraz ze wzrostem redukcji pola powierzchni międzywarstwowej. Należy podkreślić, że najmniejsze spadki występują w przypadku wytrzymałości na ściskanie – maksymalnie o 13% (próbka RIA75) w porównaniu z próbką referencyjną (rysunek 1a). W przypadku wytrzymałości na zginanie oraz rozłupywanie zmniejszenie wytrzymałości sięga odpowiednio 37,4% oraz 52,2% (próbka RIA75) w porównaniu z próbką referencyjną (rysunek 1b oraz 1c).

Na fotografii 4 przedstawiono przykładowe wyniki analizy powierzchni bocznej próbki z zastosowaniem systemu ARAMIS SRX. Grafiki przedstawiają rozkład odkształceń w kierunku poziomym. Fotografia 4a przedstawia zaobserwowany mechanizm zniszczenia próbki RIA0. Na lewym zdjęciu widoczna jest powierzchnia próbki chwilę przed zniszczeniem, na prawym bezpośrednio po zniszczeniu. Mechanizm zniszczenia polegał na gwałtownym rozwoju jednej rysy przy osiągnięciu maksymalnej siły. Jest on tożsamy z mechanizmem obserwowanym przy niszczeniu tradycyjnych próbek betonowych wykonywanych z formach. Na fotografii 4b przedstawiono mechanizm rozwoju rysy próbki RIA50. Widoczny jest dwuetapowy rozwój rysy. W pierwszym etapie rysa rozwija się jedynie w warstwie poddanej największym naprężeniom rozciągającym,

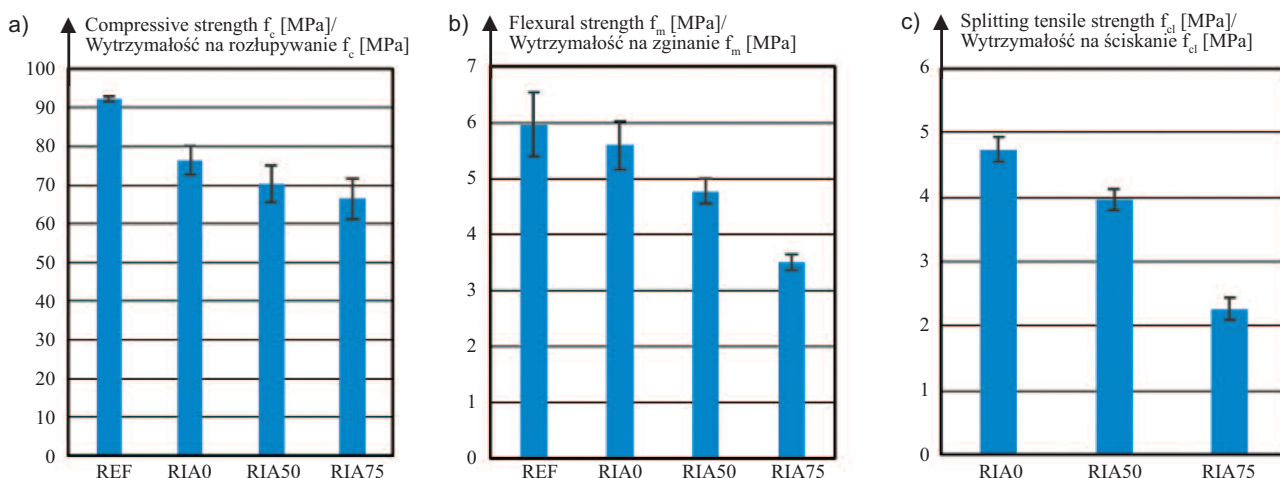
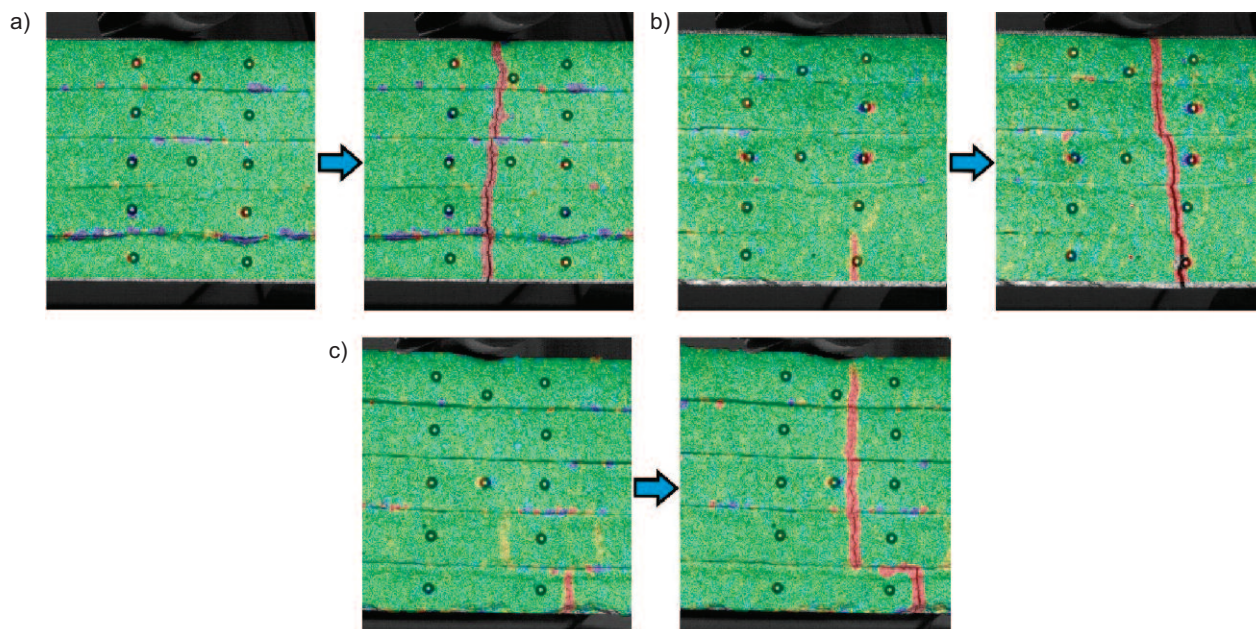


Fig. 1. Comparison of test results for reference samples and those with reduced interlayer surface area: a) compressive strength; b) bending strength; c) splitting strength

Rys. 1. Porównanie wyników badań próbek referencyjnych oraz o zredukowanym polu powierzchni międzywarstwowej: a) wytrzymałość na rozłupywanie; b) wytrzymałość na zginanie; c) wytrzymałość na ściskanie





**Photo 4. Sample deformation analysis performed using the ARAMIS system: a) RIA0 (reference sample); b) RIA50 (sample with 50% reduction of the interlayer surface area); c) RIA75 (sample with 75% reduction of the interlayer surface area)**

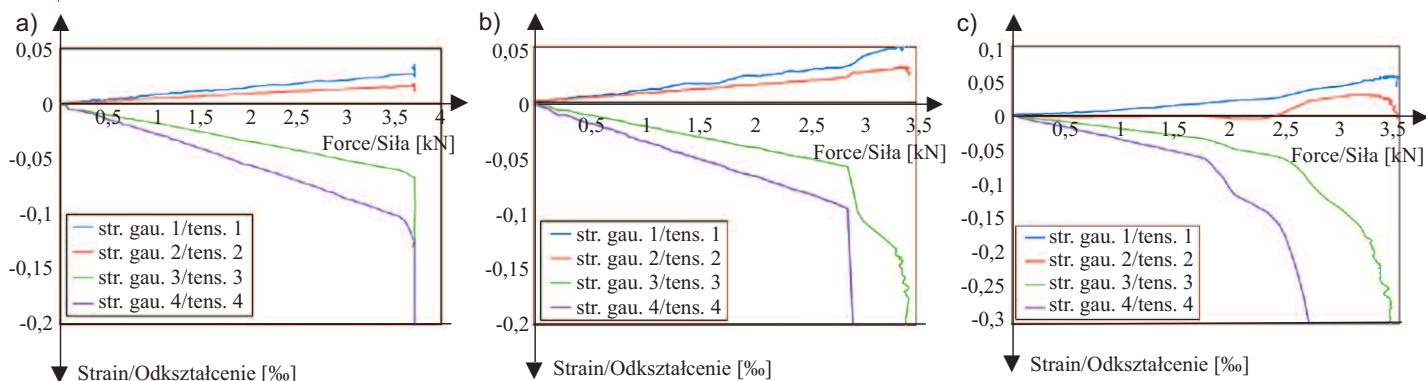
*Fot. 4. Analiza deformacji próbek wykonana za pomocą systemu ARAMIS: a) RIA0 (próbka referencyjna); b) RIA50 (próbka z 50% stopniem redukcji pola powierzchni międzywarstwowej); c) RIA75 (próbka z 75% stopniem redukcji pola powierzchni międzywarstwowej)*

the crack extends across the entire cross-section. Photo 4c shows the result for the RIA75 sample. In this case, the change in the element's failure mechanism is very clear. The crack that destroys the lower layer of concrete is offset relative to the crack in the next layer, indicating significant interlayer strength reduction. Figure 1 shows the view of the central area of the beam, where the main crack propagated, causing the sample to fail. However, measurements were taken across the entire side surface of the sample. No crack development was observed in any zone other than the central area in any of the tested samples.

The phenomenon described above was also observed during strain measurements using strain gauges. Figure 2 shows the change in strain for the four strain gauges as a function of the load increase. In Figure 2a (RIA0), a linear increase in strain is visible up to the maximum load, followed by a sudden

drop. In the second stage, after reaching the maximum force, the entire cross-section is involved. Photograph 4c shows the result of the study of the RIA75 sample. In this case, the change in the element's failure mechanism is very clear. The crack that destroys the lower layer of concrete is offset relative to the crack in the next layer, indicating significant interlayer strength reduction. Figure 1 shows the view of the central area of the beam, where the main crack propagated, causing the sample to fail. However, measurements were taken across the entire side surface of the sample. No crack development was observed in any zone other than the central area in any of the tested samples.

The phenomenon described above was also observed during strain measurements using strain gauges. Figure 2 shows the change in strain for the four strain gauges as a function of the load increase. In Figure 2a (RIA0), a linear increase in strain is visible up to the maximum load, followed by a sudden



**Fig. 2. Examples of force – deformation diagrams for tested samples: a) RIA0 – reference sample; b) RIA50 (sample with reduced interlayer contact area by 50%); c) RIA75 (sample with reduced interlayer contact area by 75%)**

*Rys. 2. Przykładowe wykresy siła – odkształcenie badanych próbek: a) RIA0 – próbka referencyjna; b) RIA50 (próbka z zredukowaną powierzchnią styku międzywarstwowej o 50%); c) RIA75 (próbka z zredukowaną powierzchnią styku międzywarstwowej o 75%)*

increase associated with the development of a single crack extending across the entire cross-section. In Figures 2b (RIA50) and 2c (RIA75), a nonlinear increase in strain can be observed in the tensile zone, which is related to the development of cracks in individual layers. It is noteworthy that crack development begins relatively early, in the case of the RIA75 sample, even after exceeding half of the sample's load capacity.

The phenomenon described above is crucial from the perspective of estimating the strength and stiffness of elements produced using 3D concrete printing technology. To properly assess these properties, it is necessary to consider the time intervals between layers deposit. For both strength and stiffness, an effective moment of inertia,  $I_{\text{eff}}$ , should be introduced, accounting for the interlayer adhesion, for example, according to the following relationship:

$$I_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^n (I_i + \gamma A_i z_i^2) \quad (2)$$

where:

$I_i$  – moment of inertia of the layer;

$A_i$  – area of the layer;

$z_i$  – distance from the centroid of the layer to the centroid of the entire element;

$\gamma < 1$  – reduction coefficient.

The formula presented above is applicable for calculating the reduction of the moment of inertia in a printed structure, considering the reduction of interlayer strength, but only for bisymmetric cross-sections. Calculating the reduction of the moment of inertia for asymmetric cross-sections requires more detailed, complex calculations and verification through laboratory tests. These issues are beyond the scope of this article and should be the subject of further research.

## Conclusion

The paper presents research and analyses focused on the mechanical behavior of 3D-printed samples with reduced (controlled) interlayer areas. The reduction in interlayer area was achieved using a special foil. Three types of samples were tested: i) reference samples (without interlayer area reduction); ii) samples with a 50% reduction in interlayer area; iii) samples with a 75% reduction in interlayer area.

The results obtained indicate that the reduction of interlayer adhesion significantly affects the mechanical properties and failure mode of the tested samples:

1) For reference samples, the failure process occurs as a single continuous crack through all layers (Fig. 4a), which is characteristic of the failure of typical (casted) concrete samples.

2) For samples with reduced interlayer area (RIA50 and RIA75), the failure mode is similar to failure mode characteristic for composite structures with a low degree of bonding. The sample failure progresses from the lowest layer to the highest layer. Particularly in the case of samples with a 75% reduction in interlayer bonding area (RIA75, Photo 4c), the shift of the crack in each interlayer region is highly visible.

gnięcia maksimum siły, a następnie gwałtowny wzrost związany z rozwojem jednej rysy obejmującej cały przekrój. Na rysunkach 2b (RIA50) oraz 2c (RIA75) zaobserwować można nieliniowy wzrost odkształceń w strefie rozciągania. Jest to związane z rozwojem rys w poszczególnych warstwach. Na uwagę zasługuje to, iż rozwój rys zaczyna się dość szybko, np. w przypadku próbki RIA75 już po przekroczeniu połowy jej nośności.

Przedstawione zjawisko jest bardzo istotne z punktu widzenia szacowania wytrzymałości i sztywności elementów wytwarzanych metodą druku 3D. Do prawidłowej ich oceny konieczne jest uwzględnienie interwałów czasowych pomiędzy układaniem kolejnych warstw. Zarówno w przypadku wytrzymałości, jak i sztywności należy wprowadzić efektywny moment bezwładności  $I_{\text{eff}}$  uwzględniający podatność zespolenia międzywarstwowego, np. zgodnie z zależnością:

$$I_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^n (I_i + \gamma A_i z_i^2) \quad (2)$$

gdzie:

$I_i$  – moment bezwładności warstwy;

$A_i$  – pole powierzchni warstwy;

$z_i$  – odległość od środka ciężkości warstwy do środka ciężkości całego elementu;

$\gamma < 1$  – współczynnik redukcji.

Przedstawiony wzór ma zastosowanie do obliczenia redukcji momentu bezwładności drukowanej struktury z uwzględnieniem redukcji szczepności międzywarstwowej tylko w przypadku przekroju bisymetrycznego. Obliczenie redukcji momentu bezwładności przekrojów niesymetrycznych wymaga bardziej złożonych obliczeń oraz weryfikacji w badaniach laboratoryjnych. Te zagadnienia są poza zakresem artykułu i powinny być przedmiotem dalszych badań.

## Podsumowanie

W artykule przedstawiono badania i analizy zachowania mechanicznego próbek drukowanych w technologii 3D o ograniczonej (kontrolowanej) powierzchni międzywarstwowej. Zmniejszenie powierzchni styku międzywarstwowego uzyskano za pomocą specjalnej folii. Badano trzy typy próbek: i) próbki referencyjne (bez uszkodzeń obszaru międzywarstwowego); ii) próbki ze zmniejszonym polem międzywarstwowym o 50%; iii) próbki ze zmniejszonym obszarem międzywarstwowym o 75%.

Uzyskane wyniki wskazują, że pogorszenie przyczepności międzywarstwowej w istotny sposób wpływa na właściwości mechaniczne i przebieg zniszczenia badanych próbek.

1) W przypadku próbek referencyjnych proces niszczenia zachodzi w postaci jednego ciągłego pęknięcia we wszystkich warstwach (fotografia 4a), co jest charakterystyczne dla zniszczenia typowych próbek betonowych.

2) W przypadku próbek o zredukowanym polu międzywarstwowym (RIA50 oraz RIA75) sposób zniszczenia zachodzi w sposób charakterystyczny dla konstrukcji zespolonych o niskim stopniu zespolenia. Następuje niszczenie próbki od warstwy najniższej do warstwy najwyższej usytuowanej. Szczególnie w przypadku próbek RIA75 o redukcji powierzchni międzywarstwowej o 75% (fotografia 4 c) widoczne jest przesunięcie pęknięcia w każdym obszarze międzywarstwowym.

3) The reduction in flexural strength increases with the decrease in interlayer bonding area (up to 37.4% compared to the reference sample).

4) Tensile strength in splitting test decreases up to 52.2% (RIA75) compared to the RIA0 sample. It should be noted that the reduction in tensile strength is less than the reduction in flexural strength. This is also consistent with other studies conducted in this area [7].

5) Compressive strength decreases with the increase in the reduction of the interlayer bonding area (up to a maximum of 13%). The reduction in compressive strength is significantly less than reduction in flexural and tensile strength.

In summary, the research demonstrated that the 3D printing process, in the presence of reduced interlayer bonding, affects the failure mode of the constructed structures. This reduction in bonding can occur when there is a delay between the placement of one layer and the next [7, 18, 19]. The studies presented in the paper, compared the relationship between the degree of reduction in interlayer area and the failure mechanism of printed structures. The presented results are model-based and could contribute to the development of a calculation method for structures made with 3D concrete printing technology using cement composites. Further research is needed in the following areas: i) determining the technological factors that influence the reduction of interlayer bonding; ii) conducting model studies for other span-to-height ratios of samples; iii) determining the value of the reduction coefficient  $\gamma$  depending on technological and material factors.

Received: 06.06.2024  
Revised: 05.07.2024  
Published: 23.09.2024

3) Wytrzymałość na zginanie ulega zmniejszeniu wraz ze zmniejszeniem powierzchni międzywarstwowej (aż do 37,4% w porównaniu z próbką referencyjną).

4) Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu zmniejsza się nawet o 52,2% (RIA75) w porównaniu z próbką RIA0 wraz z redukcją pola szczepności międzywarstwowej. Należy podkreślić, że redukcja wytrzymałości na rozciąganie jest mniejsza niż redukcja wytrzymałości na zginanie. Jest to także zgodne z innymi badaniami przeprowadzonymi w tym zakresie [7].

5) Wytrzymałość na ściskanie zmniejsza się wraz ze wzrostem redukcji pola powierzchni międzywarstwowej (maksymalnie o 13%). Redukcja tej wytrzymałości jest zdecydowanie mniejsza niż w przypadku wytrzymałości na zginanie i rozciąganie.

Badania wykazały, że proces druku 3D, w przypadku istnienia redukcji szczepności międzywarstwowej, wpływa na sposób zniszczenia konstrukcji wykonanej w tej technologii. Ograniczenie szczepności może nastąpić w przypadku wystąpienia przerwy między ułożeniem jednej warstwy na drugiej [7, 18, 19]. W badaniach prezentowanych w artykule porównano zależność stopnia redukcji powierzchni międzywarstwowej i mechanizmu zniszczenia drukowanych struktur. Przedstawione wyniki badań mają charakter modelowy i mogą przyczynić się do opracowania metody obliczeń konstrukcji kompozytów cementowych wykonanej w technologii druku 3D. W przedmiotowym zagadnieniu istnieje potrzeba przeprowadzenia dalszych badań: określenia wpływów technologicznych na rzeczywiste ograniczenie szczepności międzywarstwowej; w przypadku innych stosunków rozpiętości do wysokości próbki; określenia wartości współczynnika redukcyjnego  $\gamma$  w zależności od czynników technologicznych i materiałowych.

Wpłynął do redakcji: 06.06.2024 r.  
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 05.07.2024 r.  
Opublikowano: 23.09.2024 r.

## Literature

- [1] Wangler T et al. Digital Concrete: A Review. *Cement and Concrete Research*. 2019; 123: 105780.
- [2] Ivanova I et al. Comparison between methods for indirect assessment of buildability in fresh 3D printed mortar and concrete. *Cement and Concrete Research*. 2022; 156: 106764.
- [3] Roussel N. Rheological requirements for printable concretes. *Cement and Concrete Research*. 2018; 112: 76 – 85.
- [4] Perrot A et al. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. *Mater Struct*. 2016; 49 (4): 1213–20.
- [5] Ding T et al. Mechanical behavior of 3D printed mortar with recycled sand at early ages. *Construction and Building Materials*. 2020; 248 (2005): 118654.
- [6] Tao Y et al. Shape stability of 3D printable concrete with river and manufactured sand characterized by squeeze flow. *Cement and Concrete Composites*. 2022; 133: 104674.
- [7] Li Z et al. Fresh and Hardened Properties of Extrusion-Based 3D-Printed Cementitious Materials: A Review. *Sustainability*. 2020; 12 (14): 5628.
- [8] Skibicki S et al. The effect of interlayer adhesion on stress distribution in 3D printed beam elements. *Journal of Building Engineering*. 2024; 87 (2): 109093.
- [9] Zbyszynski W et al. Data image correlation analysis of the destruction process of 3D printable layered beams subjected to the 3-point bending process. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2023; 125 (03007): 103891.
- [10] Alchaar AS et al. Mechanical properties of 3D printed concrete in hot temperatures. *Construction and Building Materials*. 2021; 266 (1): 120991.
- [11] Luo S et al. Effects of interval time and interfacial agents on the mechanical characteristics of ultra-high toughness cementitious composites under 3D-printed technology. *Construction and Building Materials*. 2023; 374 (8): 130936.
- [12] Chen Y et al. Effect of curing methods during a long time gap between two printing sessions on the interlayer bonding of 3D printed cementitious materials. *Construction and Building Materials*. 2022; 332 (1): 127394.
- [13] Skibicki S et al. Experimental Study of Hardened Young's Modulus for 3D Printed Mortar. *Materials (Basel)*. 2021; 14 (24).
- [14] EN 1015-11:2020. Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar.
- [15] Skibicki S et al. Potential of Reusing 3D Printed Concrete (3DPC) Fine Recycled Aggregates as a Strategy towards Decreasing Cement Content in 3DPC. *Materials*. 2024; 17 (11): 2580.
- [16] Al-Noaimat YA et al. Recycled brick aggregates in one-part alkali-activated materials: Impact on 3D printing performance and material properties. *Developments in the Built Environment*. 2023; 16: 100248.
- [17] EN 12390-6:2009. Testing hardened concrete – Part 6: Tensile splitting strength of test specimens.
- [18] Wolfs RJM et al. Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. *Cement and Concrete Research*. 2019; 119: 132–40.
- [19] Pan T et al. Interlayer bonding investigation of 3D printing cementitious materials with fluidity-retaining polycarboxylate superplasticizer and high-dispersion polycarboxylate superplasticizer. *Construction and Building Materials* 2022; 330 (5): 127151