

dr hab. inż. Maciej Major, prof. PCz.^{1*)}

ORCID: 0000-0001-5114-7932

dr inż. Jarosław Kalinowski¹⁾

ORCID: 0000-0001-8922-4788

dr inż. Mariusz Kosin¹⁾

ORCID: 0000-0003-2683-7784

Wykorzystanie technologii druku 3D do wzmocnienia zginanych zimnogiętych profili typu C

The use of 3D printing technology to strengthen bendable cold-formed C-type profiles

DOI: 10.15199/33.2023.10.05

Streszczenie. Artykuł przedstawia wykorzystanie technologii druku 3D do wzmocnienia stalowych profili zimnogiętych typu C. Przedmiotem analizy były zimnogięte belki stalowe usztywnione w połowie rozpiętości elementami wykonanymi w technologii druku 3D. Zaprezentowano wyniki doświadczalno-numeryczne trójpunktowego zginania. Obliczenia numeryczne przeprowadzono, uwzględniając nieliniowość materiału z uwzględnieniem dużych przemieszczeń. Analiza potwierdziła zwiększenie sztywności modeli poddanych trójpunktowemu zginaniu z wykorzystaniem usztywnienia wykonanego w technologii druku 3D z użyciem filamentu ABS.

Słowa kluczowe: druk 3D; profile zimnogięte; zginanie; obliczenia numeryczne.

Abstract. The article presents the use of 3D printing technology to strengthen cold-formed C-type steel profiles. The subject of the analysis were cold-formed steel beams stiffened in the middle of the span with elements made in 3D printing technology. The paper presents experimental and numerical results of three-point bending. Numerical calculations were carried out in the non-linear range of the material and taking into account large displacements. The analysis confirmed the increase in stiffness of the models subjected to three-point bending with the use of a stiffener made in the incremental printing technology with the use of ABS filament.

Keywords: 3D printing; cold-formed profiles; bending; numerical calculations.

Stalowe konstrukcje wykonane z elementów zimnogiętych stanowią grupę ustrojów nośnych, charakteryzującą się dobrymi wskaźnikami wytrzymałościowymi w stosunku do ich ciężaru własnego [1]. Jednak kształtowniki zimnogięte są podatne na utratę stateczności globalnej oraz miejscowej. Jedną z metod zabezpieczania elementów zimnogiętych przed utratą stateczności jest stosowanie profili o złożonym kształcie przekroju poprzecznego. Może jednak zachodzić potrzeba wzmocnienia elementów wykonanych w technologii lekkiego szkieletu stalowego na etapie eksploatacji budynku. W tym celu autorzy prowadzą m.in. badania nad rozwiązaniem mającym zwiększyć nośność i sztywność profili zimnogiętych w użytkowanych budynkach.

Proces profilowania elementów zimnogiętych umożliwia m.in. kształtowanie ścianek przekrojów poprzecznych

z usztywnieniem brzegowym oraz pośrednim. Dzięki dodatkowym usztywnieniom zostaje zwiększona nośność ścianek kształtownika, a w konsekwencji również całego przekroju [2]. Pręty cienkościennie o przekroju otwartym można usztywnić na całej długości profilu lub punktowo. W praktyce znanych jest wiele sposobów usztywnienia profili cienkościennych przewiązkami, przeponami lub skratowaniem. Tego typu usztywnienia ograniczają deplancję przekroju poprzecznego pręta, zmniejszając siły wewnętrzne i przemieszczenia [3]. Numeryczne podejście w modelowaniu elementów cienkościennych zawiera załącznik C do PN-EN 1993-1-5 [4] oraz [1]. Autorzy [5] przedstawili analizę wrażliwości zachowania się cienkościennego pręta o przekroju dwuteowym ze względu na zmiany parametrów przewiązek.

W artykule zaprezentowano ocenę możliwości wykorzystania elementów usztywniających stalowe profile zimnogięte wykonanych w technologii druku 3D – przestrzenne elementy powstają na podstawie trójwymiarowego mode-

lu przez utwardzanie materiału (filamentu), warstwa po warstwie [6, 7]. Zaproponowane usztywnienie zbudowane jest z trzech elementów, które po włożeniu w stalowy profil zimnogięty, klinując się, tworzą jedną całość. Wynalazek został zgłoszony do Urzędu Patentowego w Polsce pod numerem P.423102 [8] i 11.02.2020 r. uzyskał ochronę patentową 30.04.2020 r. Proponowane rozwiązanie było również tematem [9], gdzie przedstawiono wpływ usztywnienia na obciążenia giętno-skrętne w zakresie liniowej pracy materiałów.

Korzystając z omawianej technologii przeprowadzono analizę eksperymentalno-numeryczną trójpunktowego zginania belek zimnogiętych uwzględniającą nieliniowości materiałową. Określono też właściwości mechaniczne stali wykorzystanej w profilach zimnogiętych oraz filamentu użytego do wykonania elementów usztywniających. Metoda druku 3D nie znajduje jeszcze szerokiego zastosowania w budownictwie i wymaga przeprowadzenia wielu analiz związanych z jej efektywnością. Prezentowane

¹⁾ Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa

^{*)} Adres do korespondencji: maciej.major@pcz.pl

w artykule wyniki dostarczają informacji niezbędnych w procesie projektowania nowych rozwiązań, możliwości ich optymalizacji i praktycznego wykorzystania.

Przedmiot, zakres i cel badań

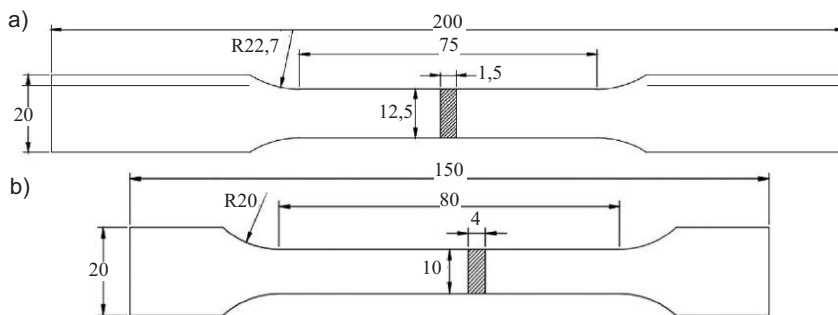
Badaniom poddano stalowe zimnogięte profile o przekroju ceowym usztywnione w połowie rozpiętości. Do usztywnienia wykorzystano autorskie rozwiązanie wykonane z filamentu ABS za pomocą technologii przyrostowej (druk 3D). Zakres badań obejmował doświadczalno-numeryczne trójpunktowe zginanie belek w dwóch konfiguracjach: belka bez usztywnienia oraz belka usztywniona elementami z druku 3D. W przypadku przyjętych konfiguracji wykonano po trzy próby zginania trójpunktowego. Badania przebiegały w pełnym zakresie obciążenia, do zniszczenia belek. Dodatkowo określono właściwości mechaniczne materiału profilu i struktury usztywnienia 3D, a uzyskane wyniki wykorzystano do przeprowadzenia analizy numerycznej.

Celem badań było porównanie efektywności przedstawionych rozwiązań. Dodatkowo badania eksperymentalne posłużyły do walidacji numerycznej przyjętych modeli.

Badania doświadczalne

Badania doświadczalne wykonano w Laboratorium Katedry Budownictwa Lądowego Politechniki Częstochowskiej. W celu określenia parametrów wytrzymałościowych przeprowadzono próbę rozciągania zgodnie z normą PN-EN ISO 6892-1:2020-05 [10] w przypadku próbek stalowych i normą PN-EN ISO 527-2:2012 – próbek wykonanych w technologii druku 3D [11]. Na rysunku 1 przedstawiono wymiary elementów wykorzystanych w próbie rozciągania. Gęstość wypełnienia w przypadku próbek wykonanych przy użyciu filamentu ABS wynosiła 100%.

Do badań właściwości mechanicznych próbek wykorzystano maszynę wytrzymałościową o maksymalnym obciążeniu 50 kN z przyrostem przemieszczenia trawersy wynoszącym 0,03 mm/s. Próbę trójpunktowego zginania przeprowadzono przy użyciu maszyny wytrzymałościowej o maksymalnym obciążeniu 100 kN. Ze względu na ograniczenia



Rys. 1. Próbkę do badań wytrzymałościowych: a) stalowa; b) z filamentu ABS; wymiary podano w mm

Fig. 1. Strength test samples: a) steel; b) made of ABS filament; dimensions are in mm

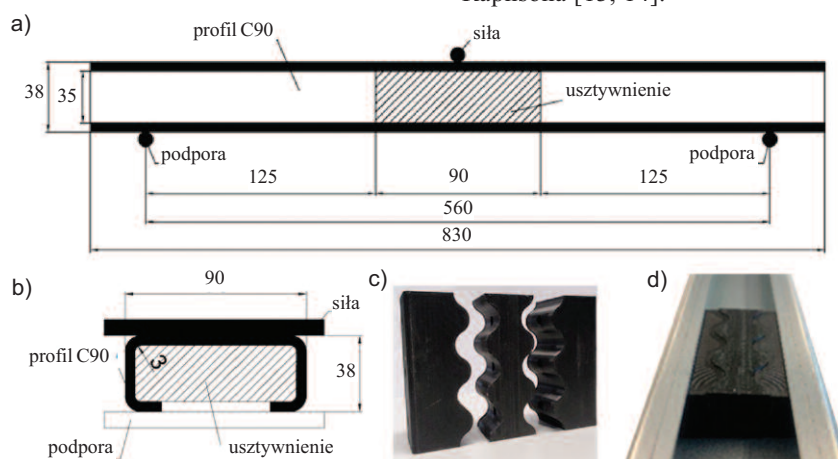
maszyny wytrzymałościowej długość zginanej belki wynosiła 830 mm, a odległość między podporami 560 mm. Przyrost przemieszczenia trawersy wynosił 0,5 mm/s.

Profile zimnogięte wyprodukowano z ocynkowanej blachy stalowej walcowanej na zimno lub na gorąco. W normie EN 1993-1-3 Eurokod [12], podane są gatunki stali i ich wartości nominalne. W przeprowadzonej analizie rozpatrywano ceowy profil zimnogięty o wymiarach podanych w tabeli 1.

Tabela 1. Wymiary nominalne i rzeczywiste badanych profili C90

Table 1. Nominal and actual dimensions of the tested C90 profiles

Wymiary przekroju profilu C90	Wymiary [mm]	
	nominalne	rzeczywiste
a	90	90
b	38	37,8
s	18	17,5
t	1,5	1,5
r	3	3



Rys. 2. Badane belki: a) przekrój podłużny belki; b) przekrój poprzeczny belki – wymiary w mm; c) element usztywniający; d) element usztywniający osadzony w profilu

Fig. 2. Tested beams: a) longitudinal section of the beam; b) cross-section of the beam – dimensions in mm; c) the stiffening element; d) the stiffening element embedded in the profile

Model numeryczny trójpunktowego zginania zbudowano zgodnie z wymiarami rzeczywistymi profilu podanymi w tabeli 1 i schematem przedstawionym na rysunku 2. Przyjęty model numeryczny bazował na elementach powierzchniowych i bryłowych [14, 15]. Profile cienkościennie zamodelowano przy użyciu elementów powłokowych 4-węzłowych typu Shell 181, natomiast elementy usztywniające, element obciążający i podpory jako elementy bryłowe Solid 187 (10 węzłowe) [14, 16]. Do obliczeń przyjęto nieliniowy materiał izotropowy zarówno w przypadku profilu, jak i elementów usztywniających. Wyznaczone eksperymentalnie charakterystyki wytrzymałościowe krzywej naprężenie – odkształcenie, w wyniku konwersji za pomocą równań logarymicznych zamieniono na krzywą rzeczywistą i wykorzystano do obliczeń numerycznych [17]. Podstawowe dane materiałowe wykorzystane w analizie numerycznej przedstawiono w tabeli 2. Do analizy wzięto też najbardziej niekorzystne wyniki uzyskane z próby wytrzymałościowej rozciągania stali i filamentu ABS.

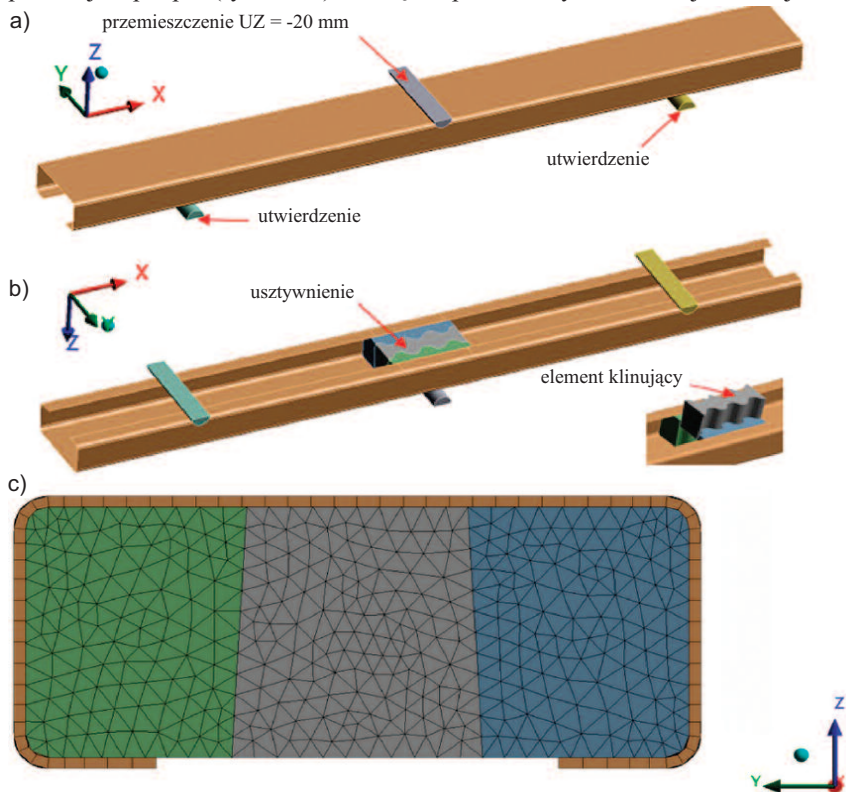
Tabela 2. Podstawowe parametry techniczne materiałów przyjętych w modelu numerycznym

Table 2. Basic technical parameters of materials used to the numerical model

Material	Moduł Younga [MPa]	Współczynnik Poissona	Granica plastyczności [MPa]
Stal	200,65	0,3	381,08
Filament ABS	1247,9	0,38	20,97

W analizowanych modelach numerycznych uwzględniono kontakt między elementami Frictional. Kontakt typu Frictional umożliwia rozdzielanie się elementów i ich wzajemny przesuw [13, 14]. Przyjęto współczynnik tarcia równy 0,17 w przypadku kontaktu profil – podpory i 0,35 – pomiędzy profilem a wkładką usztywniającą oraz w przypadku elementów samej wkładki usztywniającej, tzw. usztywnienia profilu. Do dyskretyzacji modelu zastosowano siatkę elementów skończonych, przyjmując wymiary każdego elementu wynoszące 3 mm. Przyjęty sposób dyskretyzacji zapewnił wystarczająco dokładną obserwację stanów odkształcenia i naprężeń występujących w analizowanym modelu. Warun-

ki brzegowe zdefiniowano w sposób umożliwiający realizację trójpunktowego zginania, przez zablokowanie przez utwierdzenie w płaszczyźnie przekrojów podpór (rysunek 3). Obciąża-



Rys. 3. Model numeryczny: a) warunki brzegowe i obciążenie; b) rozpatrywane usztywnienie w postaci wkładki wykonanej w technologii druku 3D; c) siatka elementów skończonych

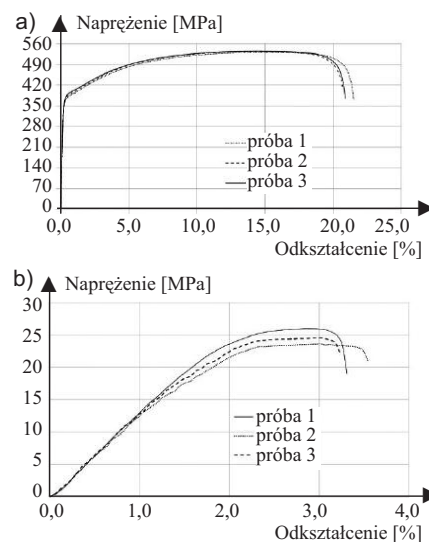
Fig. 3. The numerical model: a) boundary conditions and load; b) considered stiffening in the form of an insert made in 3D printing technology; c) mesh of finite elements

zenie modelu ze względu na nieliniową zależność między obciążeniem a przemieszczeniem następowało przez wymuszenie przemieszczenia o wartości $U_Z = -20$ mm (rysunek 3a).

Analiza wyników

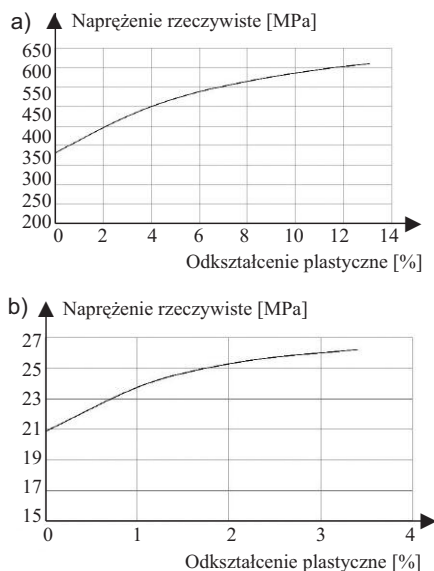
Celem statycznej próby rozciągania było uzyskanie informacji na temat podstawowych właściwości mechanicznych stali i filamentu. Otrzymane wyniki posłużyły do utworzenia krzywych rzeczywistych wykorzystanych w obliczeniach numerycznych. Na rysunku 4 przedstawiono wykresy uzyskane podczas statycznej próby rozciągania próbek wykonanych ze stali oraz filamentu ABS. Na podstawie przeprowadzonej statycznej próby rozciągania określono podstawowe parametry materiałów, które wykorzystano m.in. w analizie

numerycznej (tabela 2). Na rysunku 5 przedstawiono krzywe rzeczywiste przyjęte do opisu modeli materiałów w analizie numerycznej, w przypadku wyników najbardziej nie-



Rys. 4. Zależności między naprężeniem a odkształceniem uzyskane z próby rozciągania próbek: a) stalowych; b) z filamentu ABS

Fig. 4. Relationships between stress and strain obtained from the tensile test of the samples: a) steel; b) made of ABS filament



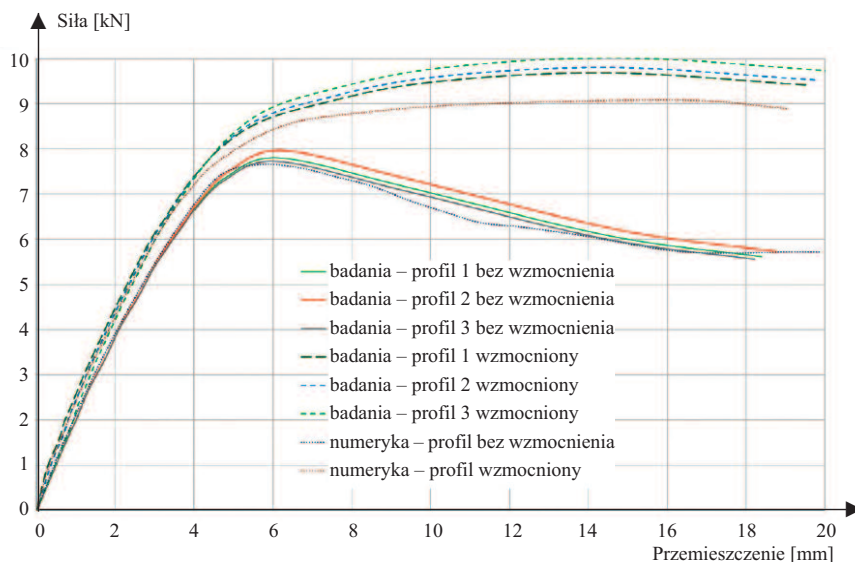
Rys. 5. Krzywe rzeczywiste przyjęte do opisu modeli materiałów użytych do analizy numerycznej: a) stali; b) filamentu

Fig. 5. Real curves used to description of materials models adopted for numerical analysis: a) steel; b) filament

korzystnych, otrzymanych w próbie rozciągania.

Ocenę stopnia wzmocnienia profili stalowych elementami usztywniającymi przeprowadzono na podstawie zależności siła – przemieszczenie dla poprzecznego przekroju środkowego analizowanych belek. Na rysunku 6 przedstawiony jest przebieg odkształceń środka profilu stalowego badanych doświadczalnie i numerycznie cienkościennych belek zimnogiętych. Otrzymane wyniki numeryczne zależności siła – przemieszczenie są jakościowo zgodne z wynikami uzyskanymi doświadczalnie (rysunek 6). W obszarze zachowania liniowo-sprężystego odkształcenia belki określone numerycznie są zgodne z odkształceniami uzyskanymi na drodze doświadczalnej. Niezgodności pomiędzy wynikami numerycznymi i doświadczalnymi obserwuje się w fazie sprężysto-plastycznej pracy belki, już po uplastycznieniu profilu.

Odształcenia belek przedstawione na rysunku 7 odpowiadają pełnemu zakresowi obciążenia. W przypadku belek bez usztywnienia, w miejscu przyłożenia obciążenia, nastąpiła lokalna utrata stateczności (rysunek 7a). Deformacja środka belki usztywnionej widocznej



Rys. 6. Porównanie krzywych siła – przemieszczenie belek z badań doświadczalnych z modelami numerycznymi

Fig. 6. Comparison of force-displacement curves, of experimental beams with numerical models

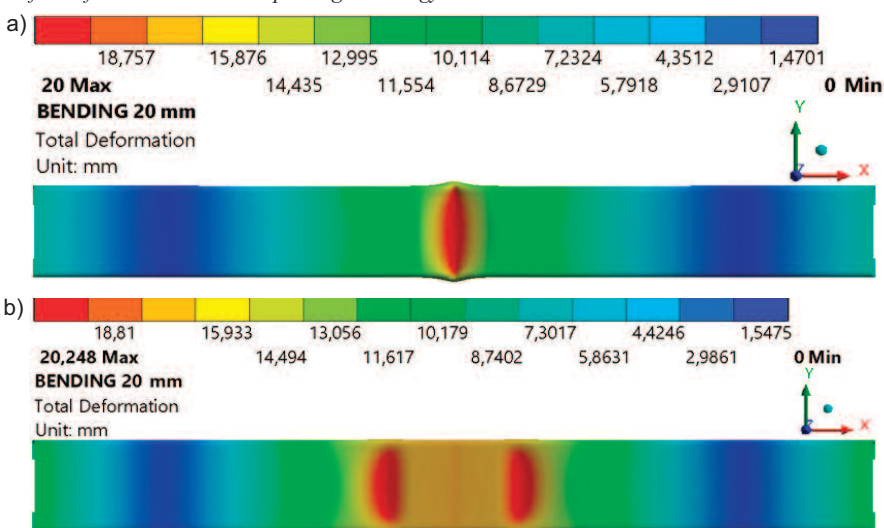
na rysunku 7b w stosunku do belki nieusztywnionej różni się liczbą i umiejscowieniem stref, gdzie występują odkształcenia trwałe.

Przeprowadzona analiza numeryczna z uwzględnieniem nieliniowości materiału umożliwiła ocenę stopnia odkształ-



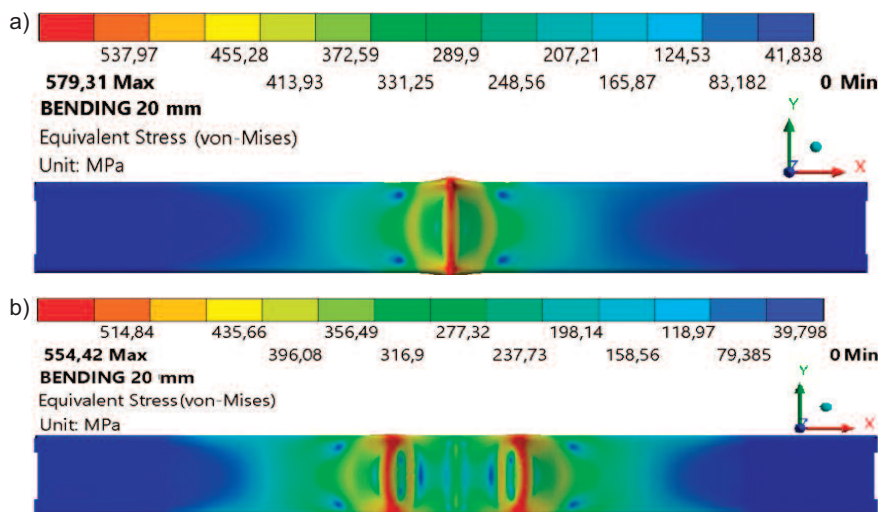
Rys. 7. Badane stalowe belki zimnogięte: a) bez usztywnienia; b) z usztywnieniem w postaci wkładki wykonanej w technologii druku 3D

Fig. 7. The tested cold-formed steel beams: a) without stiffening; b) with stiffening in the form of an insert made in 3D printing technology



Rys. 8. Mapy przemieszczeń w przypadku profili: a) nieusztywnionych; b) usztywnionych

Fig. 8. The map of displacements for the profiles: a) unstiffened; b) stiffened



Rys. 9. Mapa naprężeń zredukowanych w przypadku profili: a) nieusztywnionych; b) usztywnionych

Fig. 9. The map of reduced stresses for the profiles: a) unstiffened; b) stiffened

charakteryzowała się występowaniem pojedynczej fali na środku i półkach. Natomiast w profilu usztywnionym pojawiają się dodatkowe lokalne odkształcenia na półce i środku w obrębie umiejscowienia usztywnienia. Uzyskane numerycznie obrazy dotyczące zniszczonych belek potwierdzają wyniki otrzymane w badaniach doświadczalnych.

Wnioski

Dokonano oceny efektywności usztywnienia profili zimnogiętych o przekroju ceowym elementami wykonanymi w technologii druku 3D. Usztywnione zimnogięte profile ceowe zostały poddane trójpunktowemu zginaniu i porównano je z pracą belek bez usztywnienia. Badania eksperymentalne zostały poparte obliczeniami numerycznymi, które dostarczyły informacji o znaczeniu praktycznym, niezbędnym w procesie kreowania nowych rozwiązań struktur 3D, wykorzystując technologię druku przestrzennego.

Z przeprowadzonej analizy trójpunktowego zginania dotyczącej oceny efektywności przenoszenia obciążeń w przypadku belek nieusztywnionych i usztywnionych, widoczny jest wpływ użytych elementów usztywniających 3D na wytrzymałość profili w całym zakresie ich pracy. W analizowanych przypadkach różnica pomiędzy średnim obciążeniem granicznym uzyskanym dla belek nieusztywnionych jest o 20% mniejsza w porównaniu z belkami usztywnionymi. W granicy sprężystości w przy-

padku obu konfiguracji belek wykonano przykładowe obliczenia dla siły obciążającej wynoszącej 6 kN. Średnie wartości przemieszczeń dla trzech belek bez wzmocnienia i ze wzmocnieniem wyniosły odpowiednio 3,44 i 2,956 mm. Po zastosowaniu wzmocnienia o ok. 16% zwiększyła się sztywność belki.

Zachowanie numerycznych modeli belek opisywane zależnością siła – przemieszczenie w środku rozpiętości badanych elementów wskazuje na jakościową zgodność z wynikami doświadczalnymi w całym zakresie obciążenia. W przedstawionych rzeczywistych obrazach zniszczonych belek w korelacji z badaniami numerycznymi obserwowana jest zadowalająca zgodność. Niedokładność w obszarze wyboczeń na środku profilu zaobserwować można w przypadku profili usztywnionych (rysunki 7b oraz 8 i 9). Może to być związane z niesymetrycznym rozmieszczeniem usztywnienia w badanym profilu oraz miejscem przyłożenia siły.

Należy mieć na uwadze, że trudności w otrzymaniu numerycznego rozwiązania zbieżnego z doświadczalnym mogą wynikać także z przyjętego minimalnego kroku przyrostu przemieszczenia.

Przedstawione zagadnienie wykorzystania druku 3D do poprawy charakteru pracy elementów i konstrukcji wykonanych w technologii lekkiego szkieletu stalowego obejmuje m.in. aspekty związane z określeniem właściwości mechanicznych projektowanych struktur 3D [2].

Literatura

- [1] Dubina D, Ungureanu V, Landolfo R. Design of cold-formed steel structures. The European Convention for Constructional Steelwork Brussels. Hancock G. J., 2003. Cold-formed steel structures. Journal of Constructional Steel Research. 2012; 118: 59 – 73.
- [2] Urbańska-Galewska E, Kowalski D. Zastosowanie lekkich konstrukcji stalowych do renowacji, rozbudowy i remontów obiektów budowlanych, XXIII Ogólnopolska Konferencja, Szczyrk 2008.
- [3] Gosowski B. Zginanie i skręcanie cienkościennych elementów konstrukcji metalowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2015.
- [4] PN-EN 1993-1-5 2008, Eurokod 3 – Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-5: Blachownice.
- [5] Szymczak Cz., Kreja I. Analiza wrażliwości dwuteowego pręta cienkościennego ze względu na zmiany parametrów przewiązek, Inżynieria i Budownictwo. 2003; 593.
- [6] Major M, Kalinowski J, Kosiń M. Wytrzymałość na rozciąganie elementów drukowanych z materiałów ABS, PA6+CF15, PA12+CF15. Materiały Budowlane. 2022; DOI: 10.15199/33.2022.10.21.
- [7] Ngo TD, Kashani A, Imbalzano G, Nguyen KTQ, Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. Composites Part B. 2018; 143.
- [8] Major M, Kalinowski J, Kosiń M. Wkładka usztywniająca, zwłaszcza cienkościennych profili typu C, Politechnika Częstochowska, 234844, Wiadomości Urzędu Patentowego 04/2020.
- [9] Kosiń M, Major I, Major M, Kalinowski J. Model Tests of Bending and Torsional Deformations of Thin-Walled Profiles Stiffened with Elements Made in 3D Printing Technology, Case Studies in Construction Materials. 2020; DOI: 10.1016/j.cscm.2020.e00401.
- [10] PN-EN ISO 6892-1:2020-05, Metale – Próba rozciągania – Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej.
- [11] PN-EN ISO 527-2:2012. Tworzywa sztuczne – Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu – Część 2: Warunki badań tworzyw sztucznych przeznaczonych do różnych technik formowania. 2013.
- [12] PN-EN 1993-1-3 2008, Eurokod 3, Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-3: Reguły ogólne – Reguły uzupełniające dla konstrukcji z kształtowników i blach profilowanych na zimno.
- [13] Huei-Huang Lee Finite Element Simulations with Ansys Workbench 13 Schroft Development Corporation 2011.
- [14] Ansys – Workbench v. 18.1 system documentation, Ansys, Inc. Southpointe 275 Technology Drive Canonsburg, PA 15317.
- [15] Krześciński G, Zagrajek T, Marek P, Borkowski P. Metoda elementów skończonych w mechanice materiałów i konstrukcji. Rozwiązywanie zagadnień za pomocą systemu Ansys. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej Warszawa. 2015.
- [16] Łączek S. Modelowanie i analiza konstrukcji w systemie MES ANSYS v. 11, Wydawnictwo PK, Kraków 2011, ISBN 978-83-7242-584-3.
- [17] Petrik A, Aroch R. Usage of true stress-strain curve for FE simulation and the influencing parameters, IOP Conf. Materials Science and Engineering. 2019; 566.

Przyjęto do druku: 16.08.2023 r.