

Robert GRYGO¹
Krzysztof CZECH²
Marcin PALENCEUSZ³

NUMERYCZNA ANALIZA ODKSZTAŁCEŃ PŁASKICH DŹWIGARÓW KRATOWYCH ORAZ ICH WERYFIKACJA PRZY WYKORZYSTANIU STANOWISKA DO BADAŃ PARAMETRÓW MECHANICZNYCH KONSTRUKCJI W SKALI NATURALNEJ

W artykule przedstawiono proces badania „in situ” oraz weryfikacji obliczeń i założeń projektowych płaskiego dźwigara kratowego pod obciążeniem statycznym, realizowany na specjalnym stanowisku badawczym na terenie zakładu produkcyjnego konstrukcji stalowych. Badania in-situ wielkogabarytowych elementów nośnych konstrukcji inżynierskich należą do najbardziej pracochłonnych i skomplikowanych w inżynierii lądowej. Z tego powodu są niezwykle rzadko realizowane przez producentów konstrukcji stalowych. Większość badań eksperymentalnych odbywa się w laboratoriach uczelnianych, a wyniki badań bardzo często służą jedynie rozważaniom naukowym. Ze względu na problemy związane z transportem konstrukcji, a także na konieczność budowy specjalnego stanowiska badawczego w laboratorium uczelnianym koszty takiego przedsięwzięcia często przerastają możliwości finansowe wytwórców konstrukcji stalowych. W celu zapewnienia zgodności pracy rzeczywistej konstrukcji i odpowiadającego jej modelu numerycznego należy precyzyjnie określić parametry wytrzymałościowe materiału oraz odwzorować realny charakter pracy ustroju nośnego. Zaproponowane przez autorów stanowisko badawcze pozwala na relatywnie szybkie przeprowadzenie eksperymentu obciążania próbnego konstrukcji, które w połączeniu z pomiarem odkształceń głównych elementów nośnych umożliwia zmianę pierwotnie założonego modelu numerycznego i optymalizację jego ukształtowania.

Słowa kluczowe: konstrukcje stalowe, badania eksperymentalne, weryfikacja modelu MES

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Robert Grygo, Politechnika Białostocka, Katedra Konstrukcji Budowlanych, ul. Wiejska 45e, 15-351 Białystok; tel. 797 995 936; r.grygo@pb.edu.pl

² Krzysztof Czech, Politechnika Białostocka, Katedra Mechaniki Konstrukcji, ul. Wiejska 45e, 15-351 Białystok; tel. 797 995 942; k.czech@pb.edu.pl

³ Marcin Palenceusz, MP Engineering, ul. Jerzego Waszyngtona 24 lok. 427, 15-281 Białystok; m.palenceusz@mpe.com.pl

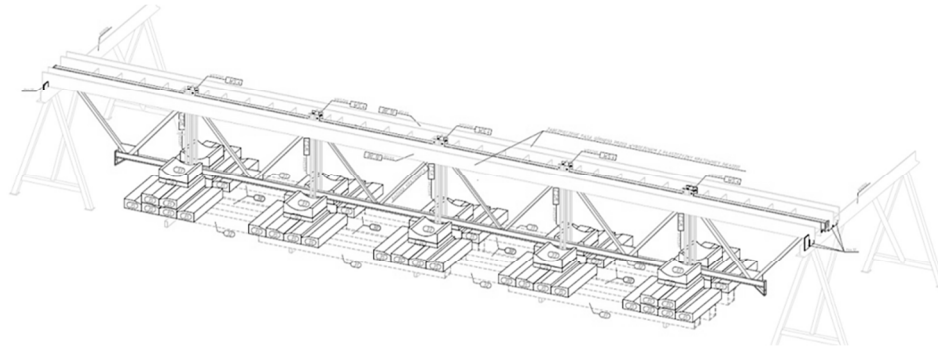
1. Wprowadzenie

Główne elementy nośne wspólnie projektowanych i realizowanych stalowych konstrukcji budowlanych w praktyce inżynierskiej zazwyczaj nie przechodzą etapu weryfikacji zgodności pracy rzeczywistej konstrukcji (jako całości lub jej kluczowych elementów) z zakładaną przez projektantów pracą konstrukcji zamodelowanej i obciążonej numerycznie – zwykle przy wykorzystaniu Metody Elementów Skończonych (MES) w jednym z dostępnych na rynku pakietów specjalistycznego oprogramowania do analiz statyczno-wytrzymałościowych. Tego typu badania doświadczalne, jeśli są w ogóle prowadzone, dotyczą zwykle konstrukcji eksperymentalnych lub istotnych z innego punktu widzenia – na przykład wynikłych z konieczności przetestowania nietypowych, nowej generacji materiałów konstrukcyjnych lub innowacyjnego sposobu łączenia ze sobą poszczególnych elementów [1,2,4]. O ile w przemyśle samochodowym tego typu badania na obiektach rzeczywistych są dość często prowadzone (m.in. weryfikacja odkształceń i naprężeń w poszyciu nowo projektowanych korpusów silników spalinowych itp.), to w szeroko rozumianym przemyśle budowlanym badania na obiektach rzeczywistych są niezwykle rzadko realizowane – głównie ze względu na zazwyczaj znaczące rozmiary konstrukcji. Efektem tego jest to, iż inwestor otrzymuje gotowy produkt – w tym przypadku np. element konstrukcyjny lub fragment większej części konstrukcji, który w rzeczywistych warunkach może pracować inaczej niż wynikałoby to z projektu i modelu numerycznego.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie koncepcji prostego stanowiska badawczego do weryfikacji odkształceń płaskich dźwigarów kratowych zamodelowanych numerycznie i wykonanych fizycznie w skali naturalnej, które z powodzeniem może być wykorzystywane bezpośrednio na terenie zakładu przemysłowego, w którym tego typu konstrukcje stalowe są realizowane.

2. Opis koncepcji stanowiska badawczego

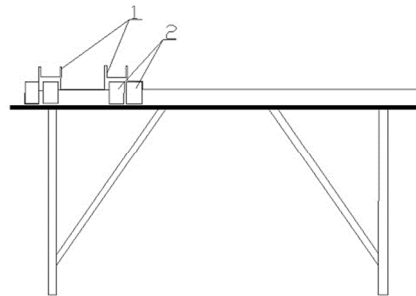
Schematycznie stanowisko badawcze z zamontowanym i obciążonym płaskim dźwigarem kratowym pokazano na rys. 1. Jak widać na poniższym rysunku, proponowane stanowisko badawcze jest złożone z dwóch przestawnych kozłów stalowych ustawianych poprzecznie w stosunku do konstrukcji będącej przedmiotem badań, do których górnych powierzchni montowane są dwie dwuteowe belki stalowe (wykonane z dwuteownika HEA220) z jednostronnie dospawanymi płaskownikami stanowiącymi zabezpieczenie pasa górnego badanych elementów przed ich wyboczeniem z płaszczyzny. Niezmiennie położenie belek dwuteowych względem każdego z kozłów zapewniają dwie pary zorientowanych pionowo stalowych płaskowników.



Rys. 1. Schemat 3D stendu do badań kratownic w skali naturalnej

Fig. 1. 3D schematics of a stand for testing flat lattice girders in full scale

Pierwsza para płaskowników jest przyspawana do koźłów, druga para, w zależności od potrzeb, może być przyspawana lub montowana do koźłów za pomocą połączeń śrubowych w zmiennej skokowo odległości – przyjmowanej w zależności od wymaganej przestrzeni roboczej, która jest uzależniona od wymiarów badanych konstrukcji. Sposób oparcia belek dwuteowych na koźłach przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Koziół stalowy w widoku z boku z zamontowanymi belkami zabezpieczającymi badane elementy przed wyboczeniem z płaszczyzny: 1–zabezpieczenie pasa górnego przed wyboczeniem, 2–blachy stabilizujące

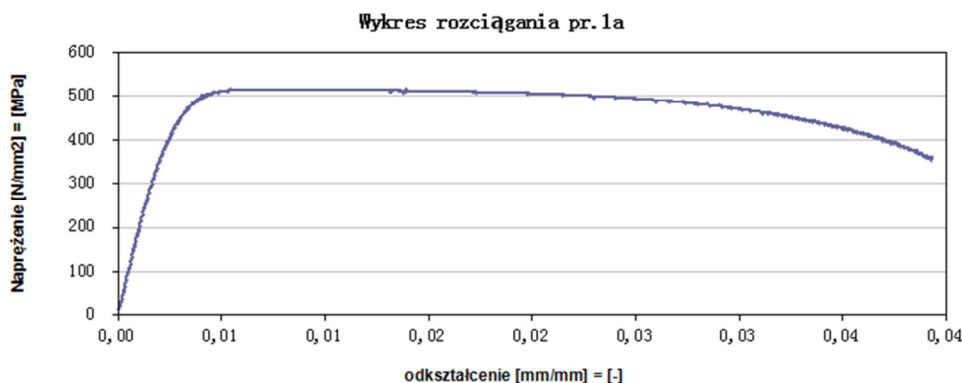
Fig. 2. A side view of the steel trestle with beams mounted to prevent elements being tested from buckling from the plane 1–protection of the upper belt from buckling, 2–stabilizers plates

Proponowane rozwiązanie umożliwia badanie płaskich dźwigarów kratowych o rozpiętości do 14 m. W przypadku mniejszych rozpiętości badanych elementów zmniejsza się jedynie odpowiednio rozstaw koźłów.

Zadawanie obciążeń badanych elementów umożliwiają wieszaki stalowe podczepiane w dowolnej kolejności do węzłów górnych płaskich dźwigarów kratowych. Jako obciążenie najlepiej zastosować prefabrykowane elementy betonowe o znanym ciężarze, które świetnie nadają się jako balast obciążający. Takie rozwiązanie nie wymaga stosowania siłowników hydraulicznych, co pozwala na obniżenie kosztów eksperymentu.

3. Badania eksperymentalne

W celu sprawdzenia jak w rzeczywistości zachowuje się konstrukcja poddana zadanemu obciążeniu należało przeprowadzić badania doświadczane mające na celu weryfikację odkształceń w wybranych punktach konstrukcji i porównanie ich z wynikami obliczeń numerycznych. W początkowej fazie wykonano badania wytrzymałościowe materiału konstrukcyjnego, z którego wykonano kratownice. Realizowano je na precyzyjnie wyciętych próbkach z dostarczonych fragmentów profili stalowych (zastosowano „cięcie wodą”). Do statycznej próby rozciągania stali łącznie przygotowano 10 próbek laboratoryjnych (po 2 szt. z każdego pobranego elementu). Próbę statycznego rozciągania stali realizowano zgodnie z wytycznymi PN-EN 10002-1: 2004 [5]. Przykładowe wyniki badań zamieszczono na rys. 3.



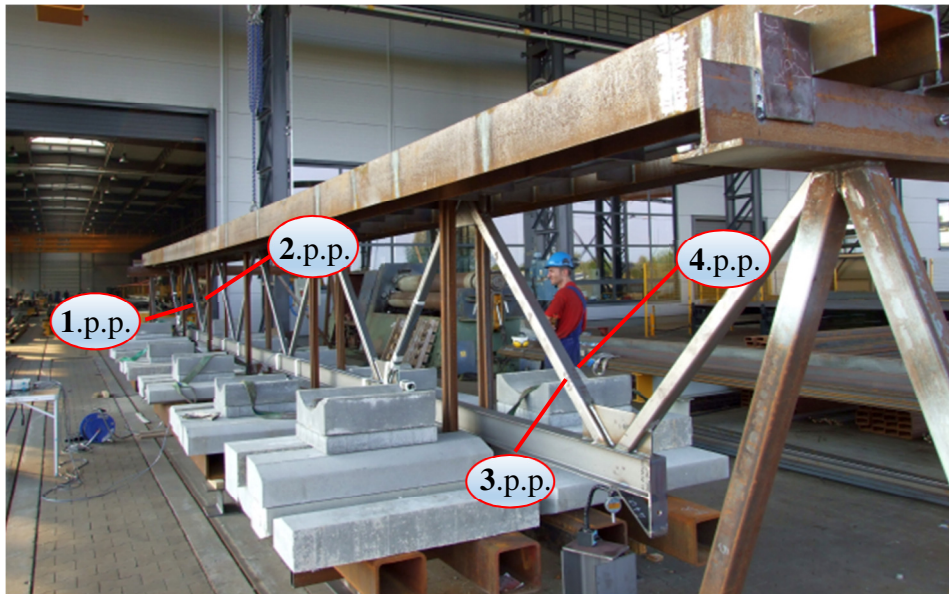
Rys. 3. Wykres rozciągania stali naprężenia/odkształcenia - krzyżulec nr 1 (próbka nr 1a)

Fig. 3. Diagram of steel tension - strain/stress - cross brace no. 1 (sample no. 1a)

Dla każdej z badanych próbek wyznaczono wartości stycznego modułu sprężystości podłużnej materiału E (moduł Younga). W obliczeniach numerycznych oraz przy wyznaczaniu wartości naprężeń w prętach skratowania (prezentowanych w dalszej części pracy) posłużono się wartością $E = 208\,762$ MPa – odpowiadającą średniej arytmetycznej z wszystkich dziesięciu badanych próbek.

W drugiej fazie eksperymentu realizowanej na proponowanym stanowisku badawczym obciążeniu poddano płaski dźwigar kratowy o pasach dolnych wykonanych z dwuteowników równoległościennych ekonomicznych IPE 140, pasach górnych wykonanych z dwuteowników szerokostopowych HE 120A oraz krzyżulcach z rur kwadratowych RK 50×50×5 i RK 60×60×6. Kratownicę poddano obciążeniu statycznemu o łącznej wartości ok. 100 kN (całkowite obciążenie konstrukcji masą 10 ton). Pomiar odkształceń prowadzono w dwóch wybranych prętach skratowania. Odkształcenia w każdym z ww. prętów rejestrowano w dwóch punktach pomiarowych usytuowanych na przeciwległych ścian-

kach profili zamkniętych. Wszystkie punkty pomiarowe przyjęto w środku rozpiętości analizowanych prętów skratowania. Lokalizację punktów pomiarowych, w których prowadzono pomiary odkształceń, schematycznie pokazano na rys. 4.

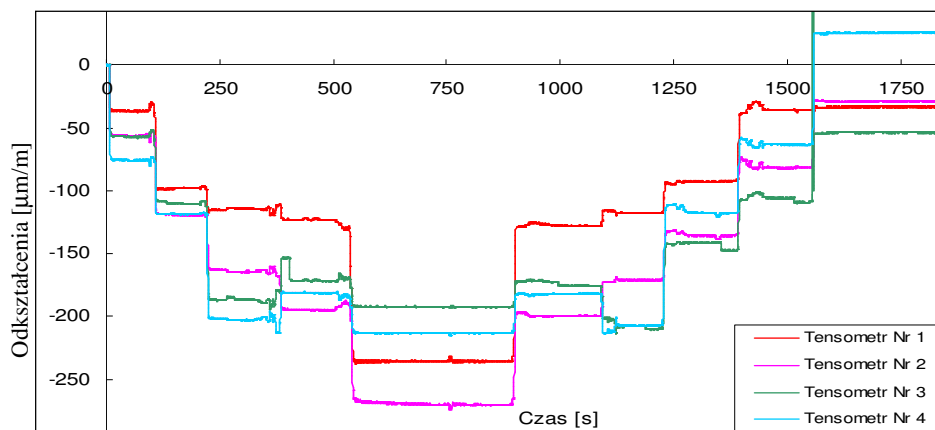


Rys. 4. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na kratownicy PK-25 (widok z prawej strony)

Fig. 4. Location of measurement points on the lattice PK-25 (right side view)

Pomiary tensometryczne, mające na celu weryfikację odkształceń, a zarazem i naprężeń w prętach skratowania dźwigarów kratowych pod obciążeniem statycznym, prowadzono przy wykorzystaniu ośmiokanałowego urządzenia pomiarowego typu SPIDER'8 firmy *Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH* i przenośnego komputera typu notebook z zainstalowanym oprogramowaniem *CATMAN Professional 5.0*. Zastosowana aparatura pomiarowa umożliwia rejestrację danych z rozdzielczością 16 bitów przy próbkowaniu z szybkością od 1 Hz do 9600 Hz w zakresie temperatur od -10°C do $+50^{\circ}\text{C}$. Urządzenia pomiarowe *SPIDER'8* można łączyć ze sobą blokowo (do 8 rejestratorów) – uzyskując tym samym znacznie większą liczbę kanałów pomiarowych. W wersji podstawowej *SPIDER'8* jest wyposażony w 4 wzmacniacze pracujące z częstotliwością nośną do 4.8 kHz. Pomiary tensometryczne prowadzono w układzie półmostkowym. Do pomiaru odkształceń w wybranych prętach kratownic wykorzystano czujniki elektrooporowe typu CEA-06-250UN-350 firmy *Micro-Measurements Division* o rezystancji $350.0 \pm 0.3 \Omega$ (przy 24°C), długości bazy pomiarowej wynoszącej 13 mm oraz stałej tensometrycznej $2.105 \pm 0.5\%$. W trakcie pomiarów stosowano próbkowanie 5 Hz przy włączonej filtracji antyaliasingowej sygnału i filtracji dolnoprzepustowej z częstotliwością graniczną

0.5 Hz. Czas trwania pomiarów uzależniony był od długości pełnego cyklu obciążenia i odciążenia kratownic, który w zależności od dźwigara wynosił od około 30 do 42 minut. Wyniki przeprowadzonych pomiarów odkształceń w wybranych prętach skratowania dźwigara kratowego nr PK-25 zestawiono na rys. 5.



Rys. 5. Odsztalcenia prętów Nr 1 (serie pomiarowe nr: 1 i 2) i 2 (serie pomiarowe nr: 3 i 4) płaskiego dźwigara kratowego PK-25

Fig. 5. Stress in members No. 1 (measurement series no.: 1 and 2) and 2 (measurement series no.: 3 and 4) and a flat lattice girder PK-25

Modelowanie i analizy numeryczne w *MES* prowadzono przy wykorzystaniu oprogramowania *Autodesk Robot Structural Analysis Professional*. W obliczeniach statycznych przyjęto schemat kratownicy podpartej przegubowo. Model numeryczny konstrukcji obciążono identycznie jak w przypadku badań eksperymentalnych – przykładając do pięciu górnych węzłów dźwigara siły o wartości 20 kN. Sumaryczne obciążenie konstrukcji wynosiło 100 kN.

Wyniki przeprowadzonych analiz numerycznych oraz badań eksperymentalnych zestawiono w tabeli 1.

Tabela. 1. Porównanie naprężeń w prętach nr 1 i 2

Table 1. Comparison of strain values in bars no. 1 and no. 2

Pręt nr	Naprężenia			Przyrost / spadek naprężeń w stosunku do modelu numerycznego	
	Model numeryczny	Badania doświadczalne			
		[MPa]		[%]	
1	-54,5 (1&2.p.p.)	-49,0 (1.p.p.)	-56,6 (2.p.p.)	-10,2 (1.p.p.)	3,8 (2.p.p.)
2	-45,5 (3&4.p.p.)	-40,2 (3.p.p.)	-44,7 (4.p.p.)	-11,7 (3.p.p.)	-1,8 (4.p.p.)

W przypadku badań eksperymentalnych wartości naprężeń w analizowanych prętach konstrukcji wyznaczono z zależności $\sigma = E \varepsilon$, przyjmując do obliczeń uśrednione wartości modułu Younga wyznaczone w trakcie badań materiałowych ($E = 208,7$ GPa). Wartości naprężeń uzyskane w wyniku przeprowadzonych analiz numerycznych i zestawione w drugiej kolumnie tabel odpowiadają uśrednionym wartościom naprężeń, które wyznaczono na początku i końcu analizowanych prętów. W ostatnich dwóch kolumnach zamieszczono dane, które wskazują na procentowe różnice pomiędzy wynikami z analiz numerycznych i wynikami badań doświadczalnych na rzeczywistej konstrukcji.

Jak wynika z zestawionych powyżej danych (tab. 1) różnice pomiędzy wynikami obliczeń numerycznych i wynikami odpowiadających im badań na rzeczywistym obiekcie wynoszą od +3,8% do -11,7% – co w przypadku tego typu badań, pomimo pewnej niesymetryczności pracy konstrukcji (wynikłej najprawdopodobniej z częściowo mimośrodowym przyłożeniem obciążenia – na co należy zwrócić szczególną uwagę przy kolejnych tego typu badaniach) wskazuje na zadowalającą zbieżność wyników i potwierdza przydatność zaproponowanego stanowiska do badań weryfikacyjnych wybranych dźwigarów kratowych przed ich wbudowaniem w konstrukcję.

4. Wnioski

Weryfikacja poprawności pracy konstrukcji prowadzona na terenie zakładu przemysłowego w przypadku stwierdzenia znacznych rozbieżności pomiędzy odkształceniami do jakich dochodzi w rzeczywistej konstrukcji w stosunku do odkształceń wyznaczonych dla przyjętego modelu numerycznego konstrukcji przy analogicznych warunkach obciążenia umożliwia wykrycie i niezwłoczne usunięcie ewentualnych wad produktu przed jego wbudowaniem w docelową konstrukcję, co znacząco zmniejsza ryzyko wystąpienia awarii lub nawet katastrofy budowlanej. Takie podejście wiąże się również ze znaczącym zmniejszeniem ryzyka finansowego jakie ponosi inwestor, w przypadku konieczności częściowego demontażu wadliwych fragmentów konstrukcji. Mając na uwadze powyższe należy stwierdzić, iż badania weryfikujące poprawność pracy rzeczywistej konstrukcji w stosunku do założonej i zamodelowanej w programie komputerowym do analiz statyczno-wytrzymałościowych konstrukcji, powinny być prowadzone przynajmniej dla pierwszych egzemplarzy nowo projektowanych konstrukcji lub ich głównych elementów.

Prezentowane w pracy wyniki badań wskazują na akceptowalne rozbieżności pomiędzy wartościami naprężeń wyznaczonymi dla przedmiotowej konstrukcji w wyniku przeprowadzonego modelowania numerycznego i obliczeń statycznych w *MES* oraz zrealizowanych badań eksperymentalnych konstrukcji w skali naturalnej, które w analizowanym przypadku nie przekraczają 12%. Uzyskane wyniki tym samym dowodzą, że tego typu badania z powodzeniem mogą być prowadzone przy wykorzystaniu proponowanego w niniejszym artykule niskonakładowego stanowiska do badania płaskich dźwigarów kratowych w skali naturalnej.

Z uwagi na nieznaczną tendencję do niesymetrycznej pracy rzeczywistej konstrukcji pod obciążeniem wskazane byłoby zastosowanie dodatkowych usztywnień w płaszczyźnie pasa górnego kratownicy oraz rozważenie bardziej precyzyjnego sposobu zadawania obciążeń.

Literatura

- [1] Boruszak A., Sykulski R., Wrześniowski K.: Wytrzymałość materiałów. Doświadczalne metody badań. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1977.
- [2] Dyląg Z., Orłóś Z.: Wytrzymałość zmęczeniowa materiałów. Warszawa, WNT 1962.
- [3] Hoffmann K.: An introduction to measurements using strain gages. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 1989.
- [4] Jastrzębski P., Muttermilch J., Orłóś W.: Wytrzymałość materiałów. Warszawa. Arkady 1985.
- [5] PN-EN 10002-1:2004. Metale - Próba rozciągania - Część 1: Metoda badania w temperaturze otoczenia.

NUMERICAL ANALYSIS OF THE DEFORMATION OF THE FLAT LATTICE GRIDERS AND THEIR VERIFICATION USING THE STAND FOR TESTING OF MECHANICAL PROPERTIES IN THE NATURAL SCALE

Summary

Main bearing elements of currently designed and executed steel structures, in the common engineering practice, usually fail to undergo the stage of verification of compliance of the real world structure's operation (as a whole, or with regard to its key elements) with the operation of the modelled and numerically loaded structure assumed by designers - most often with use of one of specialist software packages available on the market, enabling statistical and durability analyses with the Finite Element Method (FEM). This kind of experimental study, if it is conducted at all, usually concerns experimental and very non-typical structures, or ones significant from another viewpoint - e.g. a need for testing non-typical construction materials of a new generation or innovative methods of joining particular elements. While in the automotive industry this kind of study of real objects is conducted quite often (including verification of strain and stress in the plating of newly designed combustion engines' bodies, etc.), tests on real objects are carried out extremely seldom in the broadly understood building construction industry - mainly due to the usually considerable structure sizes. As a result of this, the investor receives a ready product - in this case a structural element or a component of a bigger structural part which in real world conditions may perform in a way different from what would transpire from the design and the numerical model.

This study sets out to present a concept of a simple test workstation for verification of strain of flat lattice girders, numerically modelled and physically executed in full scale, which may be successfully applied directly at the premises of an industrial facility where structures of this kind are produced.

Keywords: steel structures, experimental tests, verification of FEM model

Przesłano do redakcji: 13.10.2017 r.

Przyjęto do druku: 29.12.2017 r.