

**Maciej CWYL<sup>1</sup>**  
**Katarzyna OSTAPSKA<sup>2</sup>**  
**Lesław KWAŚNIEWSKI<sup>3</sup>**

## **NUMERYCZNO – DOŚWIADCZALNA ANALIZA NOŚNOŚCI ZAKOTWIENŃ CIĘGIEN STOSOWANYCH W METALOWO - SZKLANYCH ŚCIANACH OSŁONOWYCH.**

Ustroje metalowo – szklane projektuje się z zachowaniem odrębnego schematu statycznie – wytrzymałościowego względem podstawowej konstrukcji nośnej realizowanego budynku. Ściany osłonowe podlegają sprawdzeniom, według niezależnych (bardziej restrykcyjnych) warunków nośności i użytkowania (SGN i SGU). Szkielet metalowy ściany osłonowej nie powinien przenosić sił generowanych w trzonie budynku a jedynie w sposób właściwy przekazywać na konstrukcję obiektu oddziaływania od obciążeń klimatycznych, obciążeń stałych oraz technologicznych występujących w powłoce metalowo – szklanej. Szczególną rolę w tych układach konstrukcyjnych pełnią połączenia układów słupowo ryglowych i połączenia elementów usztywniających – cięgien. Są one jednym z podstawowych elementów zapewniających właściwą pracę konstrukcji nośnych ścian metalowo – szklanych. W przypadku systemowych rozwiązań odpowiednie własności i sposób pracy połączeń w układach stężających ścian zapewniają również spełnienie wymogów szczelności na przenikanie wody opadowej, szczelności na infiltrację powietrza i wielu innych cech warunkujących prawidłową pracę przegród. W niniejszym referacie rozpatrzono zastosowania układów ciągnowych w konstrukcjach fasadowych i analizowano pracę wybranych detali cięgien, które wpływają na sztywność całych układów prętowych przeszkleń. W szczególności skupiono się na sposobie pracy i rozkładzie naprężeń na powierzchni gwintowanej połączenia zestawu ciągnowego. Wyznaczono minimalną liczbę uzwojeń przenoszącą gwarantowaną przez producenta systemowych rozwiązań wartość siły osiowej i przedstawiono przebieg procesu zniszczenia elementu w uzwojeniu z poszczególnymi fazami ścięcia kolejnych skrajnych nitek uzwojenia. Dla przebiegu procesu zniszczenia wyznaczono wartości kolejnych, granicznych skoków siły niszczącej zakotwienie.

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Maciej Cwyl, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, ul. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa, tel: +48 22 234 65 56, [mc@il.pw.edu.pl](mailto:mc@il.pw.edu.pl)

<sup>2</sup> Katarzyna Ostapska, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, ul. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa, tel. +48 22 234 65 56, [k.ostapska@il.pw.edu.pl](mailto:k.ostapska@il.pw.edu.pl)

<sup>3</sup> Lesław Kwaśniewski, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, ul. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa, tel. +48 22 234 65 56, [lkwasniewski@il.pw.edu.pl](mailto:lkwasniewski@il.pw.edu.pl)

**Słowa kluczowe:**ciągna prętowe, zakotwienia metalowe, zakotwienia z gwintem wewnętrznym, połączenia sworzniowe, rektyfikacja cięgien, układy metalowo – szklane.

## 1. Wprowadzenie

Podstawowym obszarem zastosowań stopów aluminiowych w budownictwie są ustroje słupowo-ryglowe ścian metalowo – szklanych. W największym stopniu materiał ten wykorzystywany jest na konstrukcje fasad budynków użyteczności publicznej, budynków biurowych, hal wystawienniczych i różnego rodzaju obiektów sportowych. Obecnie szacowane, światowe zużycie pierwotnego materiału sięga 40,0 mln t/rocznie.

Współczesne rozwiązania architektoniczne zwiększają zapotrzebowania na rozwiązania konstrukcyjne fasad o znacznych rozpiętościach i dużej sztywności ustrojów powłokowych. Specyfika stosowanych materiałów, warunki normowe szczelności [1] i ograniczeń ugięć przęsłowych (w wielu przypadkach nawet do  $L/480$  [2] ( $L$ -rozpiętość przęsła)) wymuszają stosowanie układów stężających, cięgien prętowych, które umożliwiają spełnienie granicznych wymogów wynikających z SGN i SGU dla układów nośnych konstrukcji metalowo – szklanych.

### 1.1. Własności ogólne ścian metalowo - szklanych

W Polsce pierwsze realizacje obiektów z wykorzystaniem lekkich ścian osłonowych oddano do użytku na przełomie lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku. Powszechność stosowania tego typu rozwiązań konstrukcyjnych w naszym kraju przypada jednak na początek lat dziewięćdziesiątych. Jest to czas, gdy rozwiązania systemowe wprowadzane są na rynek poprzez uzyskiwanie odpowiednich Aprobat Technicznych dla konkretnych rozwiązań proponowanych przez przedsiębiorstwa specjalizujące się w przegrodach metalowo – szklanych. Dopiero w roku 2005 zostaje opublikowana i wprowadzona norma PN-EN 13830:2005 [1], w której określono podstawowe właściwości ścian osłonowych i podano informacje techniczne o wymaganiach eksploatacyjnych w całej Europie. Norma [1] podaje kryteria oraz zakres badań do potwierdzania parametrów technicznych przegród metalowo – szklanych. Podstawowe kryterium dotyczące przegród narzuca, aby maksymalne ugięcie poziome elementów szkieletu nie przekraczało  $L/200$  lub 15 mm, w zależności od tego, który z warunków w pierwszej kolejności będzie wyczerpany. Dla układów słupowo – ryglowych z wypełnieniem materiałami przeziernymi wrażliwymi na kruche pękanie ugięcie graniczne przyjmuje się o wartości  $L/480$ . Wymagania sztywności odnoszą się zawsze do konstrukcyjnego elementu ściany osłonowej (ustroju nośnego) bez współpracy z wypełnieniami

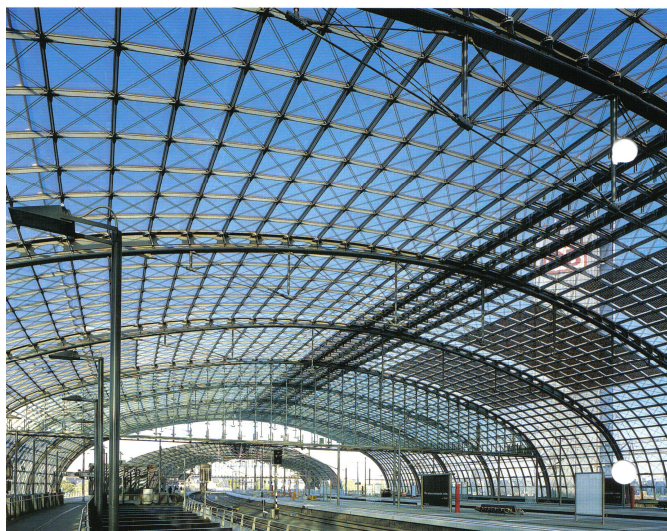
lub innymi elementami szklanymi – stosowanymi żebrami, belkami lub słupami szklanymi.

Kolejne wymagania dotyczą nośności elementów konstrukcyjnych ze względu na występujące obciążenia pionowe. Ciężar typowych przegród metalowo–szklanych wynosi  $1,0 \div 3,5 \text{ kN/m}^2$ . Oprócz podstawowych wymagań dotyczących elementów metalowych fasad, norma [1] wymaga, aby maksymalne ugięcie każdego poziomego elementu konstrukcyjnego fasady podpierającego tafelę szyby, nie przekraczało  $L/500$  lub  $3,0 \text{ mm}$  pod wpływem obciążeń pionowych.

Rozpatruje się również szczelność powłok metalowo - szklanych ze względu na przepuszczalność (infiltrację) powietrza i przepuszczalność wody opadowej.

Ograniczenia przemieszczeń elementów układów prętowych fasad staje się jednym z podstawowych warunków, od których zależą wszystkie inne parametry użytkowe fasady.

W niniejszym referacie rozpatrzono zastosowania układów cięgnowych w konstrukcjach fasadowych i analizowano pracę wybranych detali cięgien, które wpływają na sztywność całych układów prętowych przeszkleń. Na rys. 1 pokazano jedno z popularniejszych zastosowań układów cięgnowych w hali dworca kolejowego, zapewniające należytą sztywność układu słupowo – ryglowego przeszkleń obiektu.



Rys. 1. Dworzec kolejowy w Berlinie, zastosowane układy stężające „X” w każdym polu przeszklonym (według materiałów PFEIFER)

Fig. 1. Railway station in Berlin. Structural bracing system “X” (by PFEIFER)

Szerokie zastosowanie znalazły również elementy cięgnowe w projektowaniu tzw. układów kratownic cięgnowych, w których poprzez nadanie wstępnych sił naciągu, wykorzystując sprężanie elementów stalowych, uzyskuje się znaczące ograniczenia ugięć dla układów konstrukcyjnych powłok. Przykład tego typu rozwiązań obrazują rys. 2 i 3.



Rys. 2. Przykłady rozwiązań kratownic cięgnowych płaskich, wykorzystujących cięgna prętowe, jako elementy pełno - nośne  
Fig. 2. Example of a flat tension trusses. Cables as a part of the full load-bearing structure

Jako najpopularniejsze cięgna dla tego typu obiektów użyteczności publicznej rekomendowane są elementy prętowe z zakotwieniami trzpieniowymi. Są proste w użyciu a zastosowane detale połączeń pozwalają na ich montaż przy maksymalnej redukcji luzów technologicznych.



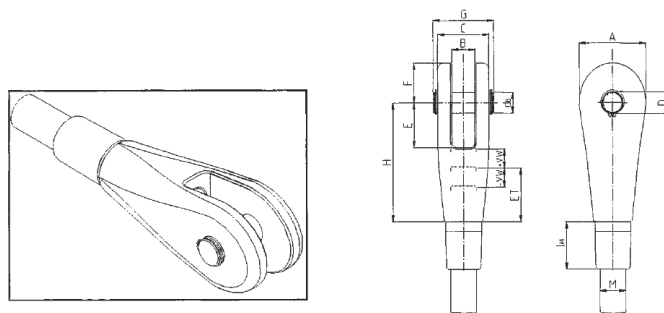
Rys. 3. Przykłady rozwiązań układu cięgnowego przestrzennego z pokazaniem detali węzła utrzymującego tafle przeszklenia  
Fig. 3. Example of a three-dimensional tension trusses. Mounting detail with elements of glass sheets

Badania tego typu elementów odniesiono do prefabrykowanych zestawów cięgien prętowych na bazie systemu Pfeifer 860 [3]. Są one obecnie stosowane w budownictwie na podstawie Europejskiej Aprobaty Technicznej ETA-04/0039 [4] wydanej w roku 2004 i obowiązującej do roku 2014. Do badań

i analizy zagadnień związanych z zakotwieniami cięgien prętowych, przyjęto elementy o średnicy 16mm. Podstawowym elementem zestawu ciągnowego jest pręt okrągły ze stali S460N o granicy plastyczności ( $R_{p0,2}$ ) o wartości  $460\text{N/mm}^2$  i wytrzymałości na rozciąganie wynoszącej  $625\text{N/mm}^2$ . Pręty cięgien łączone są w obrębie węzłów z zakotwieniami poprzez obustronnie gwintowane końce prętów (gwint metryczny ISO w zakresie cięgien M10 do M100).

Układy ciągnowe łączy się w węzłach konstrukcyjnych przy użyciu systemowych zakotwień widłowych – głowic widlastych. Głowice wyposażone są w gwint wewnętrzny i składają się z dwóch ramion otworowanych dla mocowania sworznia tworzącego połączenie przegubowe ciągną. Głowice widlaste wykonywane są, jako sferoidalne odlewy z żeliwa o charakterystyce materiałowej EN-GJS-400-18-LT, zgodnie z EN 1563. Sam trzpień połączenia wykonany jest z materiału oznaczanego, jako 34CrNiMo 6+QT o charakterystyce wytrzymałościowej zgodnie z EN 10083-3. Pozostałe elementy zakotwienia wykonywane są ze stali oznaczanej, jako S355J2. Schemat zakotwienia ciągną przedstawiono na rys. 4. Ten element ciągną poddano analizie numerycznej i badaniom doświadczalnym, w celu opisu sposobu jego pracy, jako element powłokowych konstrukcji fasad.

System cięgien jest wykorzystywany do wykonywania konstrukcji nośnych dachów, sprężonych konstrukcji ciągnowych, konstrukcji podstawowej i usztywniającej fasad. Zalecany jest również w układach kratownic ciągnowych płaskich o rozpiętościach do kilkunastu metrów, przekryć trybun, ogrodów zimowych, i innych obiektów użytku publicznego.



Rys. 4. Detal zakotwienia ciągną mocowanego na pręcie poprzez gwint metryczny

Fig. 4. Details of anchor mounting system with metric thread

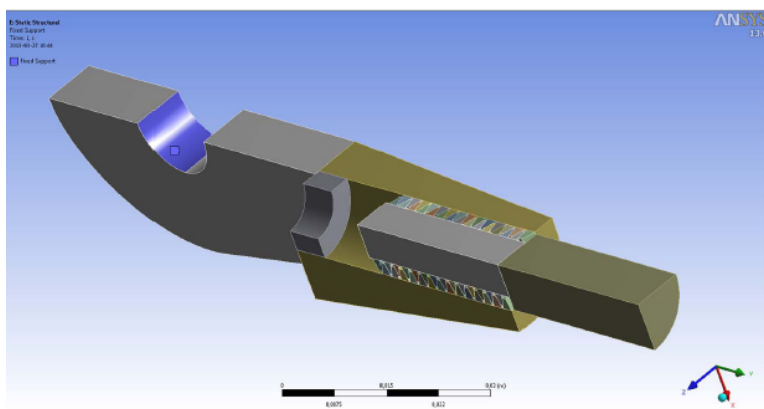
Zgodnie z Aprobata techniczną pokazane na rys. 4 zakotwienia cięgien mogą pracować również, jako połączenia prętów ściskanych. Pozwala to na wykorzystywanie ich w układach kratownic ciągnowych z dużymi wartościami sił ściskających w prętach (siły ściskające nawet do 80 – 85 [%] nośności elementu).

Badane elementy mają gwarantowaną żywotność systemów ciężnowych wynoszącą 25 lat i są zalecane w konstrukcjach obciążonych w przeważający sposób statycznie.

## 1.2. Analiza numeryczna zakotwienia ciężnowego

O poprawności pracy elementów ciężnowych w dużej mierze decyduje sposób pracy ich zakotwień metalowych. Elementy ciężnowe w konstrukcjach metalowo – szklanych wymagają detali umożliwiających ich roczną rektyfikację w zakresie długości. By w jak najmniejszym stopniu komplikować schemat montażowy ciężnowych elementów prętowych lub linowych, przyjęto, że miejsce rektyfikacji wyznaczono na zakotwieniach w obrębie połączeń. Zakotwienia te nakręca się na gwintowane pręty ciężnień w ten sposób regulując ich długość. Przyjmuje się, że poprawnie zamontowane ciężno dla układu konstrukcji fasady posiada wstępny naciąg w przedziale 5 do 10-ciu procent nośności przekrojowej pręta. Ta wygenerowana siła zapobiega tzw. zwieszeniu swobodnemu i niweluje luzy na połączeniach trzpieniowych. Brak luzów i zwieszeń jest gwarantem właściwej pracy ustroju metalowo – szklanego i zapewnia dotrzymanie warunków użytkowych fasady związanych z określonymi klasami szczelności oraz infiltracji.

Z tego względu w szczególny sposób zajęto się analizą pracy samych elementów w obrębie połączenia ciężna z konstrukcją metalową. W tym celu zamodelowano element zakotwienia z odwzorowaniem części gwintowanej, części stożkowej odlewu zakotwienia i części gwintowanej ciężna. Ze względu na dużą liczbę elementów brylowych wykorzystano dwie osie symetrii. Pozwoliło to jednocześnie na lepsze zobrazowanie rozkładu stanu naprężenia w poszczególnych fazach pracy zakotwienia metalowego. Schemat analizowanego zakotwienia przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Detal zakotwienia ciężna poddany analizie numerycznej  
Fig. 5. Computer model of anchor mounting system

Przyjęto uproszczoną geometrię głowicy oraz pierścieniowe uzwojenia gwintu metrycznego. Gwint o przekroju trapezowym, symetryczny. Dane materiałowe cięgna i jego nagwintowanej części przyjęto zgodnie z oznaczeniami dla stali S460. Dla odlewu zakotwienia i jego gwintu parametry przyjęto na podstawie charakterystyki materiałowej podanej przez producenta, zgodnej z jego oznaczeniem EN-GJS-400-18-LT. Do obliczeń modelu połączenia przyjęto odcinkowo – liniową aproksymację materiału sprężysto plastycznego ze wzmocnieniem z tykami analizy 2D i 3D.

Do analizy w stanie osiowo symetrycznym zastosowano elementy skończone czterowęzłowe z dwoma stopniami swobody dla każdego z nich. Każdy z elementów miał, zatem osiem stopni swobody z zastosowaniem ich do analiz osiowosymetrycznych w modelu trójwymiarowym elementu zakotwienia. Symulacja ta umożliwiła przeprowadzenie analizy nieliniowej ze względu na parametry materiałowe i uwzględniania kontaktu z tarcie. Przyjęto współczynnik tarcia równy 0,15. Na tym etapie obliczeń możliwe było również uwzględnienie występowania dużych deformacji elementów zakotwienia pod przyrostami osiowych sił rozciągających w pręcie cięgna.

Założono zgodnie z rzeczywistym elementem zakotwienia dwanaście uzwojeń gwintu i wygenerowano model ćwiartki połączenia wykorzystując 133,5 tys. elementów skończonych. Podczas obliczeń określono dokładny rozkład naprężeń na kolejnych uzwojeniach rozpatrując różną liczbę współpracujących uzwojeń gwintu. Głębokość wkręcenia cięgna w zakotwienie na realizowanych konstrukcjach zależy od wielu czynników, wygenerowanej – żądanej siły naciągu, rektyfikacji długości uwzględniającej odchyłki montażowe układu konstrukcyjnego, wpływy pełzania i relaksacji w trakcie użytkowania ustrojów prętowych ścian metalowo – szklanych.

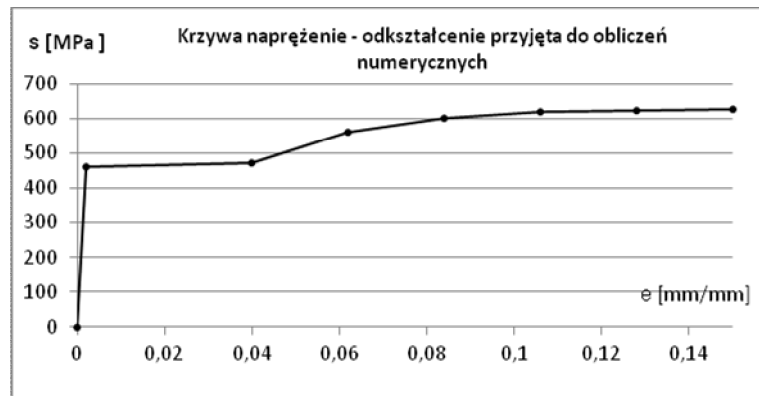
Wyniki analiz odnoszono każdorazowo do wartości naprężeń odpowiadających odpowiednio 80 i 100 procentom siły zrywającej cięgno.

Drugi typ analizy wykorzystywał model ćwiartki zakotwienia (bisymetrycznej głowicy) z tzw. analizą globalną, wykorzystującą zasady submodelingu samego gwintu z elementami bezpośrednio przyległymi. W tej analizie wykorzystano przestrzenne, ośmiowęzłowe elementy bryłowe. Zastosowano ten sam współczynnik tarcia i zastosowano siatkę ze 133 tys. elementów bryłowych. Lokalnie uzyskane zawyżone wartości naprężeń w miejscach karbów (ze względu na niedoskonałości zagęszczeń siatki MES) świadczą o uplastycznianiu materiału współpracującego w obrębie tych fragmentów zakotwienia. Wyniki deformacji są jednak miarodajne (0,3 mm dla submodelingu w stosunku do 0,5 dla modelu globalnego) i odwzorowują w pełni zachowanie się zakotwienia podczas badań laboratoryjnych.

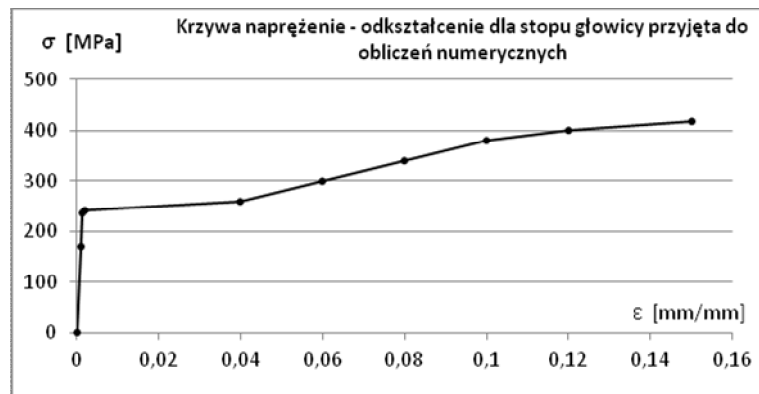
Analiza trójwymiarowa pozwoliła na określenie warunków brzegowych, wyjściowych dla analizy płaskiej, osiowosymetrycznej. Jednak możliwości obliczeniowe nie pozwoliły na uzyskanie w tej analizie dokładnych map naprężeń w obszarach uzwojeń w modelu trójwymiarowym, podlegających

oddziaływaniom kontaktowym. W tym celu niezbędne było podparcie się obliczeniami z wykorzystaniem analizy 2D. W trakcie obliczeń porównano warunki brzegowe, wyjściowe z modelu przestrzennego dla różnych głębokości wkręcenia gwintu i odniesiono do analizy powierzchniowej. Uzyskano kompatybilny pod względem przemieszczeń model płaski i na podstawie prowadzonych analiz określono sposób rozkładu naprężeń i wartości obciążenia poszczególnych uzwojeń. Na podstawie obliczeń stwierdzono, że najbardziej obciążone są pierwsze cztery, krańcowe uzwojenia. Kolejny ważny wniosek dotyczy liczby sześciu uzwojeń, które przenoszą siłę zrywającą w ciągnie określoną w trakcie badań laboratoryjnych na 125,0kN. Nośność ciągną na podstawie badań określono na 93,0kN (spełnienie warunku nośności obliczeniowej ciągną).

a)



b)



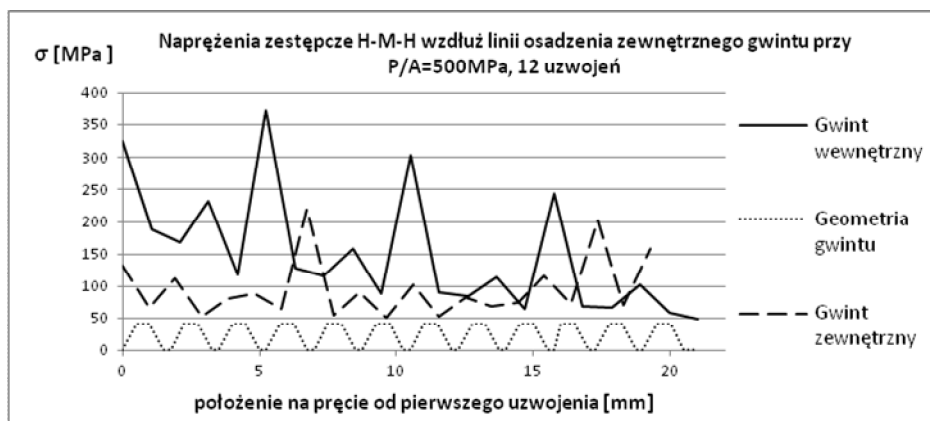
Rys. 6. Zależności  $\sigma$ - $\epsilon$ , przyjęte w analizie numerycznej: a) – dla materiału pręta, b) dla odlewu zakotwienia połączenia

Fig. 6. Stress –strain relationship  $\sigma$ - $\epsilon$  applied in numerical analysis: a) – for rod material, b) – for joint material

Zastosowane dwanaście uzwojeń w zakotwieniach i stożkowy charakter odlewu elementu węzłowego pozwalają na ponad 100% rezerwę głębokości wkręcenia prętów w stosunku do ich nośności obliczeniowej uzyskiwanej przy wykorzystaniu, co najmniej sześciu uzwojeń gwintowanej części odlewu połączenia. Zniszczenie w obrębie gwintowanej części połączenia następuje poprzez jednoczesne, częściowe uplastycznienie dla pierwszych dwóch zwojów przy sile równej sile zrywającej ciągną. Głębokość wkręcenia ciągną w zakotwienie wynosi wtedy pięć uzwojeń. W pozostałych, pracujących pierścieniach gwintów nie występują wówczas wartości naprężeń przewyższające granicę sprężystości dla analizowanego materiału zakotwienia. Większa liczba wykorzystanych zwojów wpływa na odciążenie pierwszych dwóch uzwojeń. W części graficznej (powyżej) przedstawiono przyjęte charakterystyki materiałowe, jako wieloodcinkowe zależności  $\sigma$ - $\epsilon$ , rys. 6.

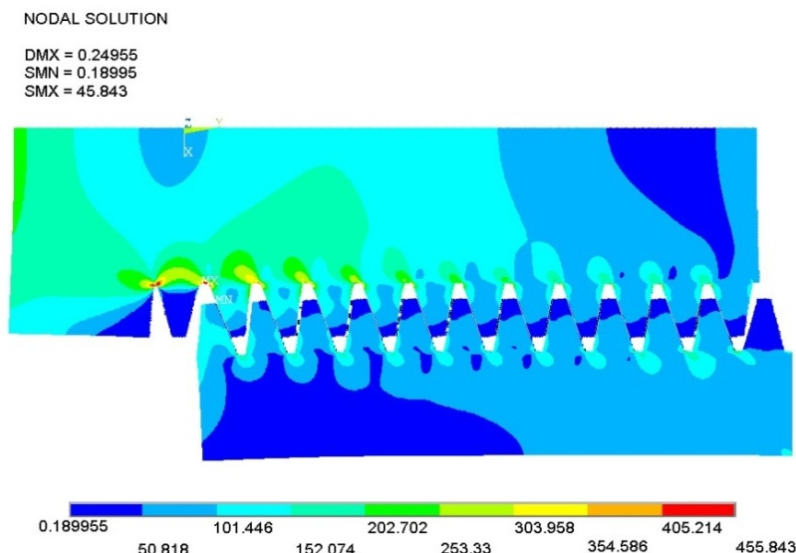
Poniżej przedstawiono również rozkład naprężeń zastępczych wzdłuż linii osadzenia gwintu zewnętrznego (odlewu zakotwienia połączenia) przy zastosowaniu siły niszczącej dla pełnego wkręcenia ciągną w stożkowe gniazdo zakotwienia. Rozkład naprężeń pokazano na rys. 7. Obraz deformacji przy pracujących wszystkich uzwojeniach (w odniesieniu do rys. 7) przedstawiono na rys. 8.

Wywołana deformacja dla pracujących wszystkich uzwojeń odwzorowana została przy zastosowaniu siły w przecie odpowiadającej naprężeniu 625 MPa - tj. wartości wytrzymałości na rozciąganie wynikającej z zastosowanej stali S460. Opracowane modele MES pozwalają zobrazować sposób pracy i rozkład naprężeń w pracującym elemencie gwintowanym ciągną.



Rys. 7. Rozkłady naprężeń na poszczególnych uzwojeniach przy maksymalnej sile zrywającej przy pracujących dwunastu uzwojeniach

Fig. 7. Stress distribution in the threads for the maximum loading of twelve threads



Rys. 8. Obraz deformacji i naprężeń w przekrojach uzwojeń przy gwincie w pełni obciążonym (całkowite wkręcenie) siłą rozciągającą w przecie odpowiadającą naprężeniu 625 MPa

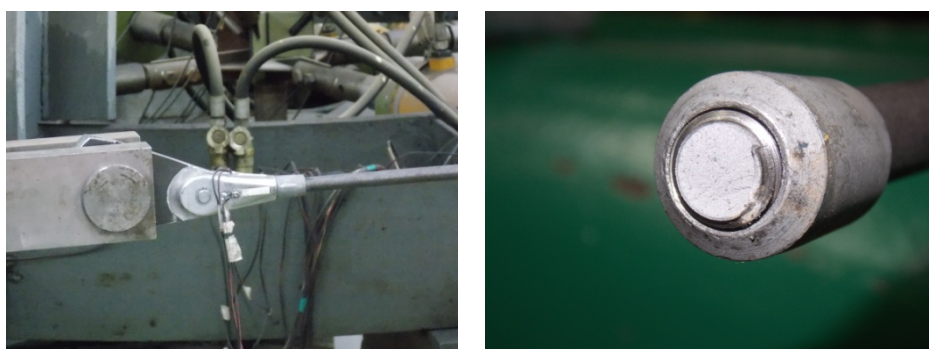
Fig. 8. Distribution of stresses and deformation in the threads for the tensile force equivalent to the stress of 625 MPa

### 1.3. Badania laboratoryjne

Dla porównań i potwierdzenia prowadzonych analiz numerycznych wykonano zestaw badań niszczących z wykorzystaniem odwzorowanych układów ciągnowych. Do badań przyjęto zestawy ciągnowe na bazie systemu Pfeifer 860, ze średnicą pręta 16, 0 mm [3] i [4], długość zestawu 3,0m, otrzymane od ich producenta, firmy Pfeifer. Do badań wykorzystano siedem zestawów ciągnów. Z badaniami numerycznymi porównywano otrzymywane wartości odkształceń na elementach zakotwienia i na powierzchni pręta ciągnów. Badania wykonywane były do uzyskania sił zrywających z jednoczesnym pomiarem odkształceń w sześciu niezależnych punktach zestawu. Zarejestrowana siła zrywająca wynosiła 147,3 kN, (125 kN podana przez producenta wartość nośności obliczeniowej pręta). Wartość siły zrywającej równa 147,3 kN jest najmniejszą z otrzymanych wartości sił zrywających dla zestawów poddanych badaniom laboratoryjnym. Ze względu na ograniczoną liczbę badanych elementów nie wyznaczano wartości uśrednionej a odniesiono się do wyniku minimalnej siły zrywającej otrzymanej w trakcie prowadzonych badań. Różnice wartości siły zrywającej otrzymanej dla poszczególnych zestawów układów ciągnowych były zaskakująco małe i sięgały dziesiątych części kN. Delta pomiędzy minimalną i maksymalną wartością siły zrywającej otrzymanej w trakcie badań wyniosła niespełna 1,2 kN, co stanowi jedynie 0,81% rozbieżności. Zgodność wyników badania potwierdza dużą jednorodność

i dobrą jakość wykonania elementów ciągnowych oraz bardzo dobre parametry materiałowe elementów użytych cięgien.

Badano również liczbę uzwojeń równoważącą nośność obliczeniową pręta. Przy głębokości wkręcenia 5 – 6 ciu uzwojeń uzyskiwano wartość siły równą 125 kN (podawana przez producenta nośność zestawu), przy której pracujące uzwojenia ulegały ścięciu. Ścięcie następowało w elemencie zakotwienia, w którym wykonywane jest dwanaście uzwojeń gwintu. Obraz badanego cięgna przedstawiono na rys. nr 9. Na przywołanym zdjęciu widać również powierzchnię zerwanego elementu ciągnowego.



Rys. 9. Obraz elementów trakcie badań (z lewej). Zerwaniegwintowanej części (z prawej)  
Fig. 9. Test set up (left). Breaking the threaded portion (right)

## Literatura

- [1] PN-EN 13830:2005 Ściany osłonowe – Norma wyrobu.
- [2] Cwyl M.: Rozwój konstrukcji powłokowych fasad metalowo-szklanych. „Świat Szkła”, nr 1 (159) styczeń 2012.
- [3] Cable Structures Pfeifer 2010.
- [4] Europejska Aprobata Techniczna ETA-04/0039, Bruksela 2004.

## NUMERICAL - EXPERIMENTAL ANALYSIS OF LOAD BEARING CAPACITY OF CABLE CONNECTIONS IN METAL - GLASS CURTAIN WALLS

### Summary

Metal - glass structures such as curtain walls are designed to satisfy separate (more restrictive) strength and stiffness requirements independently to the main structure of the building. A special role in such systems plays a combination of beam to column systems with tendons used as connection stiffeners. Metal structural skeleton of the curtain wall should not transfer any forces generated in the core of the building but only transfer to the main structure the loading generated by environmental effects, dead loads and technological loading applied directly to the

glass curtain walls. A special role in these systems is attributed to the girder - column subsystems and to the connections of the stiffeners - tendons. The system should also ensure compliance with the requirements of tightness in the rain water penetration, air infiltration leaks, and many other features determining proper operation of the partitions.

The paper presents applications of the tie rod cladding structures and numerical analyses of detailed elements affecting the structural stiffness of the system. The current research is focused on numerical analysis of local deformation and stress distribution in screw connections. The analyses are conducted using axisymmetric and 3D detailed finite element models equipped with nonlinear material characteristics and contact algorithms. The FE calculations are accompanied by a set of laboratory tests.

**Keywords:** rod ties, metal anchorage, screw connections, cable connections, rectification of connections, metal - glass structures.

DOI: 10.7862/rb.2013.14

*Przesłano do redakcji: w maju 2013 r.*

*Przyjęto do druku: w lipcu 2013 r.*