

Paweł A. KRÓL¹
Magdalena PAPADOPOULOS-WOŹNIAK²
Jarosław WÓJT³

BADANIA PODATNYCH WĘZŁÓW ZACZEPOWYCH RYGIEL-SŁUP W STALOWYCH REGAŁACH MAGAZYNOWYCH WYSOKIEGO SKŁADOWANIA

Stalowe regały magazynowe wysokiego składowania są jedną z najczęściej spotykanych i coraz powszechniej stosowanych szkieletowych konstrukcji cienkościennych. Typowy regał paletowy składa się z ramownicowych układów słupowych, połączonych skratowaniem, zapewniającym wymaganą sztywność w kierunku poprzecznym (Rys.1). W kierunku podłużnym konstrukcja nie jest w żaden sposób stężona, zaś odpowiednia sztywność układu jest zagwarantowana poprzez sztywność samych słupów, sztywność połączenia słupów nośnych z posadzką oraz sztywność podatnych węzłów zaczepowych rygiel-słup. W artykule przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych na jednostronnych węzłach rygiel-słup typowego, niestężonego, systemowego rozwiązania regału paletowego. Próbom poddano dwie grupy rygli, z pełną oraz częściową spoiną łączącą blachę czołową połączenia zaczepowego z rygłem. Zależność pomiędzy momentem zginającym a kątem obrotu dla badanych grup ma dość podobny charakter, jednakże elementy z częściową spoiną przenoszą istotnie mniejszy moment zginający, a zniszczenie ma znacznie gwałtowniejszy charakter. Wartości sztywności określone dla poszczególnych grup węzłów na podstawie różnych dokumentów o charakterze normatywnym wykazują dość istotne różnice. Wskazuje to na konieczność przeprowadzenia dalszych badań oraz doprecyzowania procedury dotyczącej sposobu określania nośności i sztywności węzłów, gdyż znajomość tych parametrów jest niezbędna do prawidłowego zaprojektowania tego typu konstrukcji. Niezawodność

¹ Autor do korespondencji: Paweł A. Król, Politechnika Warszawska, Wydz. Inżynierii Lądowej, Instytut Inżynierii Budowlanej, Al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa, tel. (+4822) 2346648, p.krol@il.pw.edu.pl.

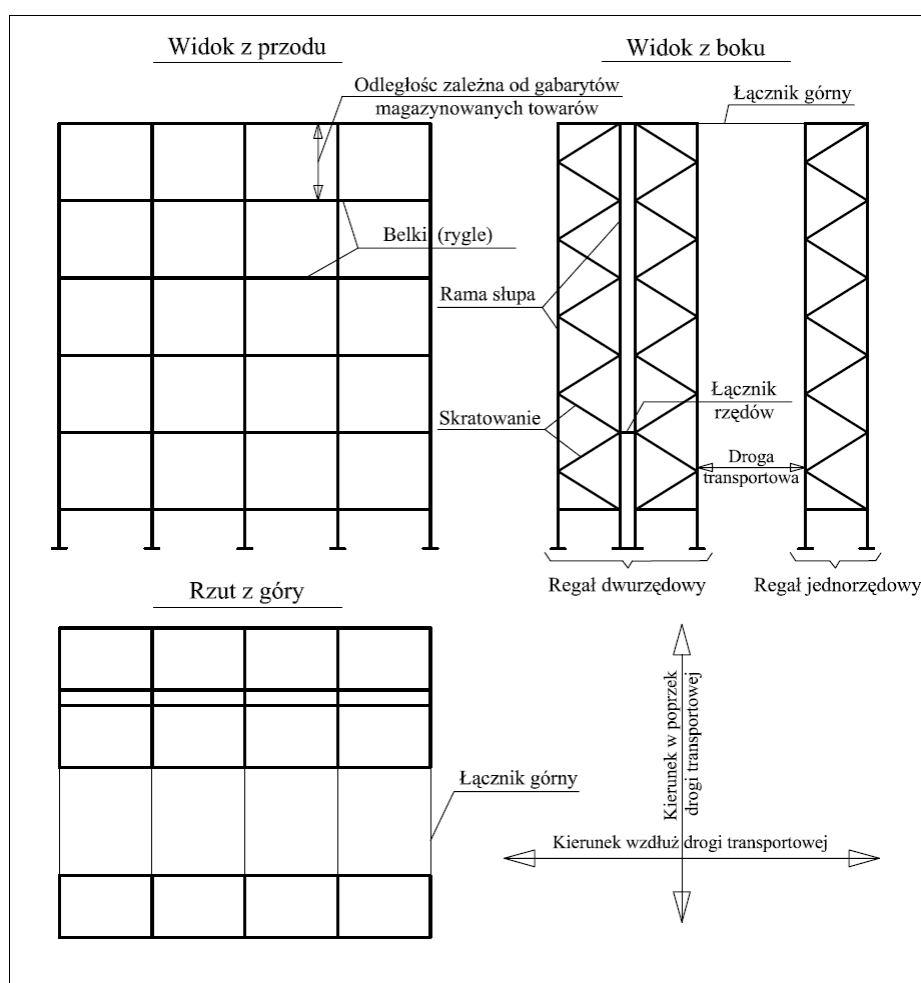
² Magdalena Papadopoulou-Woźniak, Politechnika Warszawska, Wydz. Inżynierii Lądowej, Instytut Inżynierii Budowlanej, Al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa, tel. (+4822) 2346561, m.papadopoulos@il.pw.edu.pl

³ Jarosław Wójt, Politechnika Warszawska, Wydz. Inżynierii Lądowej, Instytut Inżynierii Budowlanej, Al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa, tel. (+4822) 2346564, j.wojt@il.pw.edu.pl.

analizowanych połączeń wpływa na bezpieczeństwo użytkowania całej konstrukcji, co jest szczególnie ważne ze względu na coraz powszechniejsze stosowanie stalowych regałów magazynowych w ogólnodostępnych powierzchniach sklepowych.

Słowa kluczowe: magazynowe regały paletowe, węzły podatne, badania doświadczalne, nośność i sztywność węzłów

1. Podstawowa charakterystyka regałów magazynowych wysokiego składowania



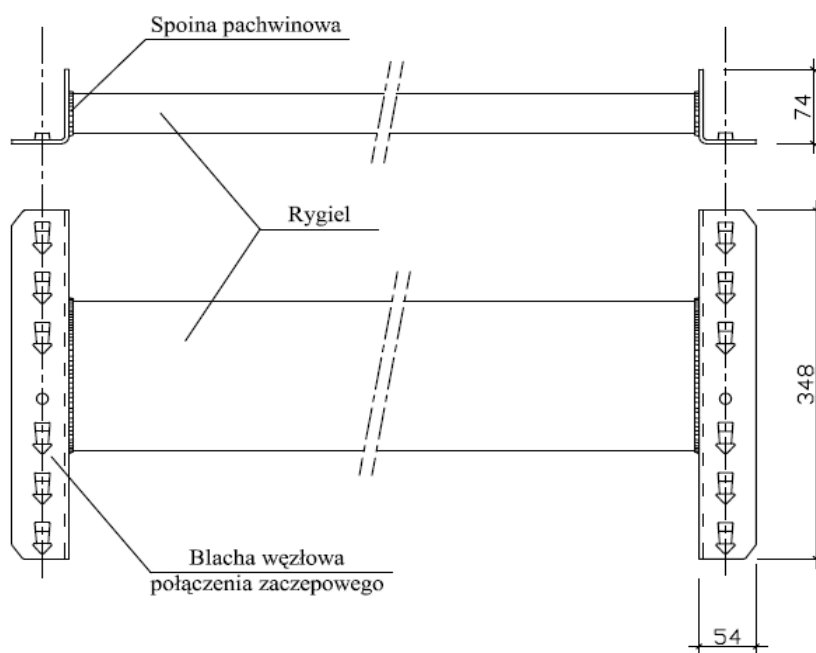
Rys. 1. Schemat konstrukcji typowego niestężonego regału paletowego

Fig. 1. Schematic structure of the typical, unbraced pallet rack (constructed as the sway-frame structure with semi-rigid joints)

Pierwsze obiekty magazynowe miały zupełnie inny charakter od obecnie stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych i logistycznych. Nieustanny rozwój cywilizacyjny i związana z tym zmiana nawyków społeczeństwa w sposób ciągły wymusza zmianę dotychczasowych metod składowania i dystrybucji towarów.

W chwili obecnej bardzo popularnym sposobem zarówno magazynowania, jak również sprzedaży czy dystrybucji, jest wykorzystywanie do tego celu wielkopowierzchniowych sklepów i magazynów. Takie rozwiązanie determinuje konieczność zgromadzenia jak największej ilości produktów na relatywnie jak najmniejszej powierzchni terenu. Rozwiązaniem idealnie wpisującym się w te wymagania, są wszelkiego rodzaju regały półkowe, paletowe, wielopoziomowe, wspornikowe, wjazdne lub przejazdne z napędem ręcznym bądź mechanicznym. Wykaz ten nie jest kompletny, choć zawiera najczęściej stosowane rozwiązania. Rodzaj zastosowanego regału zależy od konkretnego przeznaczenia i charakterystyki obiektu, w którym się znajduje. Najczęściej stosowane są regały półkowe, paletowe oraz wspornikowe.

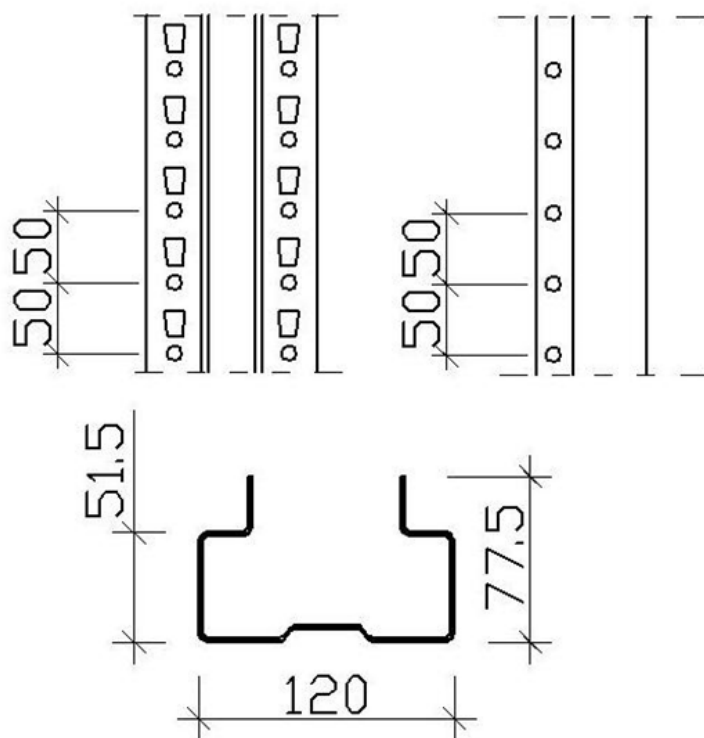
Typowy regał paletowy składa się ze słupów połączonych skratowaniem (zapewniającym sztywność w kierunku poprzecznym) oraz rygli poziomych połączonych ze słupami poprzez system połączeń zaczepowych (Rys. 2).



Rys. 2. Rygiel wraz z blachami węzłowymi połączenia zaczepowego (rozwiązanie przyjęte na przykładzie badanych elementów)

Fig. 2. Side-views of the beams used in experiments

Rygiel to zwykle element o przekroju zamkniętym (prostokątny lub kwadratowy), słupki natomiast, to kształtowniki o przekroju monosymetrycznym (Rys. 3), zazwyczaj zimnogięte, o wymiarach dostosowanych do geometrii zacze­pów. Dzięki rozmieszczeniu na całej wysokości słupka okrągłych lub podłużnych otworów zaczepowych, zapewniona jest możliwość swobodnej zmiany położenia rygli i zawieszenia ich na praktycznie dowolnej wysokości. Sposób rozwiązania zacze­pów może być zróżnicowany, ale w obecnie stosowanych systemach jest to najczęściej kątownik z układem zębów lub wpustów, przyspawany do końca rygla. Oprócz tego, otwory wykonane w materiale, zarówno słupka jak i zaczepu, dają możliwość zastosowanie dodatkowych zawleczek, zabezpieczających przed przypadkowym podniesieniem rygla razem z paletą i ładunkiem. Połączenia słupów z prętami skratowania są zwykle wykonywane w warunkach wytwórni za pomocą śrub lub śrubo-nitów, zaś połączenia słupków z fundamentami lub posadzką są najczęściej realizowane poprzez blachy poziome mocowane do podłoża przy pomocy śrub rozporowych lub kotwi wklejanych.



Rys. 3. Przekrój i widok odcinka słupka (na przykładzie badanych elementów)

Fig. 3. Cross-section and side-views of the columns used in experiments

Relatywnie niewielka sztywność zarówno połączeń zaczepowych, jak i połączenia słupków z fundamentami powoduje, że sposób podejścia do oceny nośności, stateczności i integralności konstrukcji regałów paletowych jest zagadnieniem jakościowo innym i bardziej złożonym niż w przypadku typowych konstrukcji szkieletowych. Duża różnorodność rozwiązań i stosowanych systemów dodatkowo utrudnia zunifikowanie i jednoznaczne określenie sposobu wymiarowania i obliczania tego typu układów konstrukcyjnych. Połączenia zaczepowe należy traktować jako połączenia podatne, w których podstawową charakterystyką jest zależność między momentem zginającym przenoszonym przez połączenie a zmianą kąta obrotu między ryglem i słupkiem. Specyfika zachowania się takich połączeń poważnie utrudnia również możliwość zastosowania metody elementów skończonych do analizy tego typu konstrukcji.

W chwili obecnej, niezwykle popularna i coraz powszechniejsza sprzedaż wysyłkowa oraz konieczność maksymalnego skrócenia czasu oczekiwania na zamówiony towar lub produkt sprzyjają rozwojowi i tworzeniu nowych, wysoce wyspecjalizowanych obiektów spedycyjnych i magazynowych. Spełnienie rosnących oczekiwań można zapewnić właśnie poprzez wykorzystanie systemów regałowych o przestawnych półkach, które to można w praktycznie nieograniczony sposób aranżować, dostosowując do aktualnych potrzeb powierzchni magazynowej. Ważna rola konstrukcji regałów oraz nietypowa specyfika pracy skłoniła autorów niniejszego opracowania do podjęcia badań związanych z tematyką ogólnie pojętych regałów paletowych. Nie bez znaczenia był również fakt ukazania się w styczniu 2011 roku normy [1].

2. Cel i zakres badań

Podstawową inspiracją prowadzonych badań stała się chęć głębszego poznania zjawisk i zależności opisujących sposób pracy konstrukcji stalowych regałów paletowych o węzłach podatnych i zmiennej konfiguracji rygli nośnych. Jednym z ważniejszych zagadnień odnoszących się do pracy takich konstrukcji jest sztywność i nośność połączeń zaczepowych rozumiana zarówno poprzez ich nośność na zginanie, jak również, nośność na ścinanie.

Badania nośności na zginanie węzłów przeprowadzono na bazie elementów pewnego systemu regałowego, oferowanego przez producenta z zachodniej Europy. Badania zostały zrealizowane w Laboratorium Instytutu Inżynierii Budowlanej Politechniki Warszawskiej. Zakres przeprowadzonych badań obejmował czynności mające na celu określenie zależności moment-obrót w jednostronnych węzłach regału stalowego. Spośród systemowych rygli nośnych wyodrębniono dwie grupy elementów, które różniły się pomiędzy sobą sposobem połączenia blachy zaczepu z profilem belki. W elementach zakwalifikowanych do pierwszej grupy połączenie pomiędzy ryglem a blachą zaczepu wykonano w formie spoiny pachwinowej ułożonej na całym obwodzie

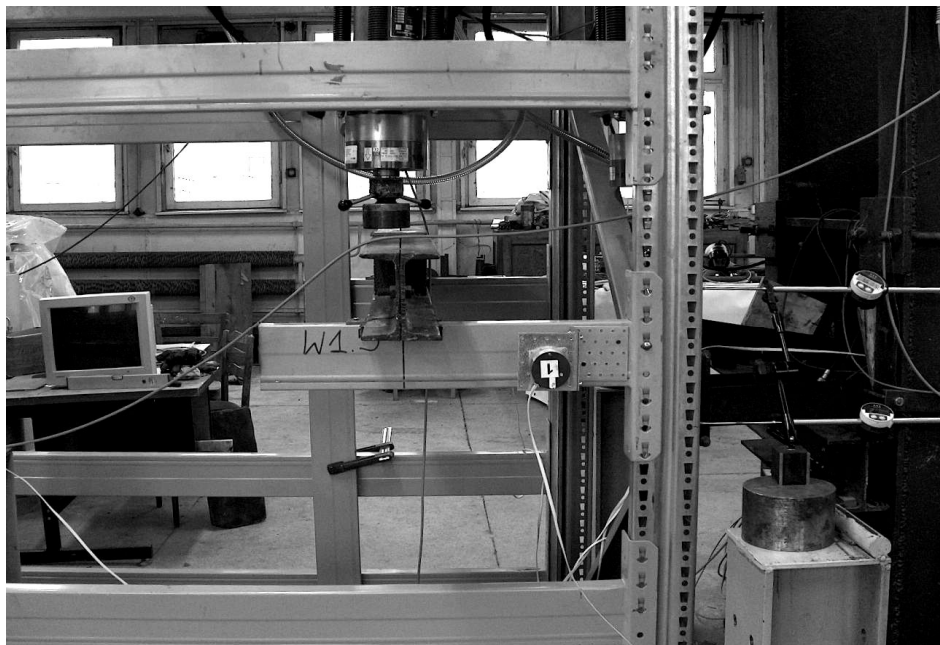
przekroju rygła, natomiast do drugiej grupy przypisano elementy ze spoinami ułożonymi jedynie wzdłuż dłuższego boku rygła. Należy zauważyć, iż powyższy podział nie był wprowadzony przez producenta systemu. W przygotowaniu programu badań, jak również w opracowaniu otrzymanych wyników, autorzy korzystali z wytycznych zawartych w normie [1].

Celem pośrednim było również porównanie wynikowych wartości określonych zgodnie z przywołaną wyżej normą [1], z charakterystykami podanymi przez producenta systemu.

3. Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze obejmowało ramę główną wraz z systemem siłowników i osprzętu sterującego oraz urządzenia wykorzystywane do pomiarów niezbędnych wielkości fizycznych. Siłowniki używane w badaniach wyprodukowane zostały przez niemiecką firmę „Veb Werkstoffprüfmaschinen Leipzig”. Możliwy ruch tłoka wynosił 250 mm, przy maksymalnym nacisku uzyskiwanym na pojedynczym siłowniku równym 200 kN lub 100 kN (zależnie od modelu siłownika). Połączenie siłownika z ramą główną stanowiska badawczego, jak również przyłożenie obciążenia do badanych elementów, realizowano poprzez przegub kulisty. Zgodnie z zaleceniami normy [1], do pomiaru kątów obrotu występujących w węzłach używano inklinometrów (o dużej czułości odczytu), połączonych z rygłem w pobliżu zaczepu. Do słupa zamocowano krótki odcinek rygła wraz z zaczepem (Rys. 4 i Rys. 5). Całkowita długość elementu wspornikowego wynosiła 600 mm. Dodatkowo konstrukcyjnie zabezpieczono swobodne końce rygli przed poziomym przemieszczeniem i skręcaniem. Podpory boczne umożliwiały jednak przemieszczanie się belki w kierunku obciążenia.

Przy pomocy czujników przemieszczenia marki „Sylvac” o dokładności pomiaru 0,001 mm, badano również sposób zachowania się strefy przywęzłowej słupów regału. Czujniki przemieszczenia zamontowano w sposób całkowicie niezależny, zarówno od ramy stanowiska, jak również badanych elementów. Rozstaw czujników wynosił 250 mm. Pozwoliło to uzyskać miarodajną informację o zachowaniu się strefy przywęzłowej słupa w różnych fazach obciążenia. Dwa fragmenty słupowych zestawów podporowych o długości około 1700 mm każdy, wycięto z dolnej części pełnowymiarowego słupa systemowego. Połączenie pomiędzy słupkami zostało fabrycznie zrealizowane poprzez układ skratowania typu „D”, wg oznaczeń przyjętych w [1].



Rys. 4. Widok stanowiska badawczego.

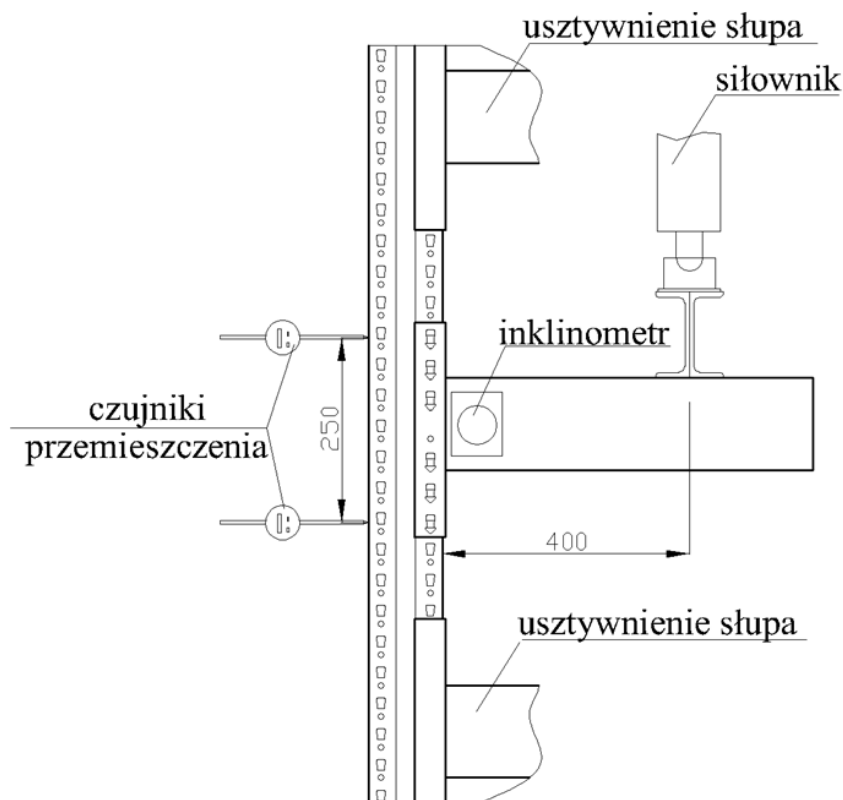
Fig. 4. General view of the testing setup (before the experiment)

W dolnej części słupy miały oryginalnie zamontowane systemowe stopy, przy pomocy których zrealizowano oparcie na posadzce. Względną sztywność badanego odcinka słupa zapewniono poprzez zastosowanie dodatkowych rygli usytuowanych w bezpośredniej, technicznie możliwej, niewielkiej odległości od siebie. Zabieg ten, mający na celu zwiększenie sztywności poprzecznej układu słupy-rygle obejmował zarówno strefę nad, jak i pod badanym węzłem.

Wszystkie urządzenia pomiarowe posiadały elektroniczną możliwość rejestracji wyników w sposób równoległy dla każdej serii badanych elementów.

4. Przebieg prowadzonych badań

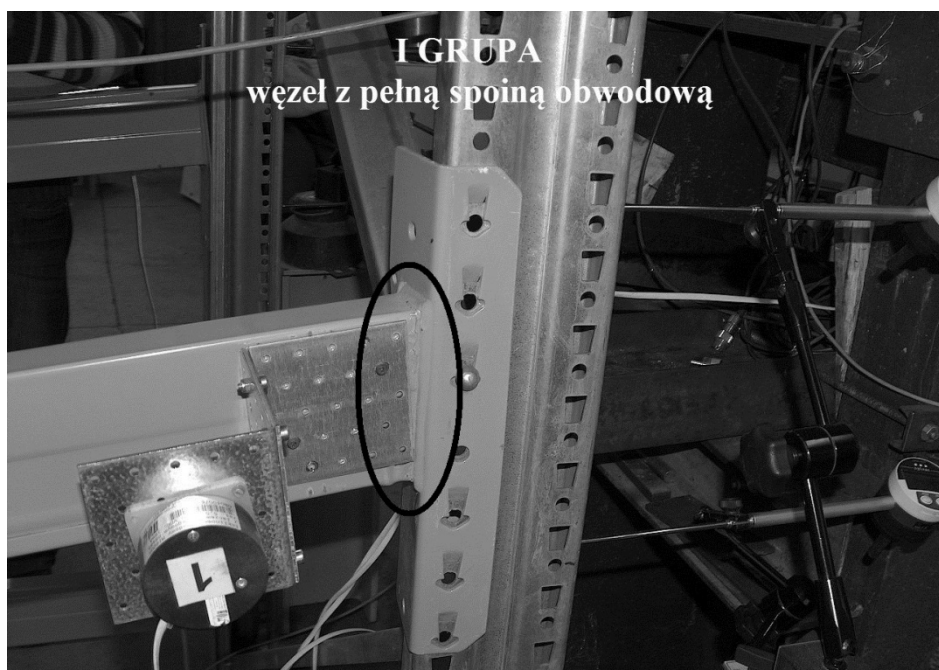
Obciążenie przykładano przy pomocy siłownika hydraulicznego do górnej płaszczyzny rygla, w odległości 400 mm mierzonej od bocznej ścianki profilu słupa. Zadawane obciążenia przekazywano na konstrukcję nie w sposób bezpośredni, lecz za pośrednictwem dodatkowego trawersu wykonanego z połączonych ze sobą dwóch ceowników o odpowiedniej sztywności, co miało zabezpieczyć rygiel przed lokalnym zgnieciem. Na powierzchni górnej ścianki rygli mocowano elementy oporowe z płaskownika, zabezpieczające trawers przed niezamierzonym przemieszczaniem się w trakcie badania.



Rys.5. Szczegół badanego węzła.

Fig.5. Details of the experimental setup for testing joints

Obciążenie przekazywano pionowo w dół i zwiększano stopniowo, aż do osiągnięcia wartości maksymalnej, której towarzyszyły znaczne deformacje w obrębie węzła i w konsekwencji całkowite jego zniszczenie. W zakresie 0 do 6,0 kN dla I grupy węzłów i od 0 do 5,0 kN dla II grupy węzłów obciążenie przypadające na pojedynczy rygiel zwiększano skokowo co 1,0 kN, natomiast później, aż do zniszczenia elementu, obciążenie zwiększano co 0,5 kN. Czas utrzymania stałego ciśnienia na każdym poziomie obciążenia wynosił około 1 minuty. Sposób rozmieszczenia czujników oraz szczegół węzła przedstawiono na Rys. 5. Przebadane węzły, jak wcześniej podano, w zależności od sposobu ułożenia spoiny pomiędzy ryglem a blachą zaczepu podzielone zostały na dwie grupy (Rys. 6 i Rys. 7).



Rys. 6. Przykład węzła grupy I (pełna spoina obwodowa).

Fig. 6. Exemplary beam-to-column joint classified to group I (with full circumferential weld)



Rys. 7. Przykład węzła grupy II (niepełna spoina obwodowa)

Fig. 7. Exemplary beam-to-column joint classified to group II (with partial circumferential weld)

W pierwszej grupie węzłów wykonano siedem niezależnych badań, natomiast w grupie drugiej cztery niezależne badania. Każda z prób zakończyła się zniszczeniem rygla w pobliżu połączenia z blachą zaczepu. Blacha czołowa zaczepu w końcowej fazie obciążania najczęściej ulegała jedynie deformacjom w pobliżu styku ze słupem (Rys.8).



Rys. 8. Typowy sposób deformacji blachy zaczepu

Fig. 8. The typical way of the hook-endplate deformation

Równocześnie należy zauważyć, że słupy nie doznawały w tym czasie żadnych widocznych zniszczeń czy odkształceń. Może to wynikać z faktu, iż w badanym systemie stal słupów ma znacznie wyższą granicę plastyczności niż stal rygli i zaczepów. Pod wpływem sił działających na układ konstrukcyjny w trakcie jego obciążania, słupy ulegały jedynie nietrwałym odkształceniom o charakterze sprężystym. Wpływ odkształcenia (obrotu) słupa w trakcie obciążania został uwzględniony w dalszym opracowaniu wyników. Sposób pomiaru odkształceń słupa w trakcie badania obrazuje Rys. 9. Konstrukcja stanowiska badawczego dość dokładnie odwzorowuje sposób obciążenia oraz pracy pełnowymiarowych, rzeczywistych układów nośnych regału paletowego. W związku z tym, zdaniem autorów, zachowanie się badanych elementów zaobserwowane i pomierzone w trakcie prowadzonych eksperymentów należy uznać za miarodajne co do charakteru i wartości charakterystycznych parametrów.

Na podstawie przedstawionych informacji można wnioskować, iż taki system konstrukcyjny, w którym słupy charakteryzują się wyższymi parametrami wytrzymałościowymi, jest korzystniejszy z punktu widzenia bezpieczeństwa użytkowania.

W trakcie prowadzonych eksperymentów równocześnie badano po dwa węzły mocowane do jednego systemowego zestawu podporowego (Rys. 4). Zgodnie z zaleceniem normy [1] elementy były wstępnie obciążane siłą o wartości około 1,0 kN, tak aby zaczepy odpowiednio ułożyły się w gniazdach słupa. W innym przypadku istnieje ryzyko obarczenia wyników błędem wynikającym z poślizgu zębów zaczepu w otworach. Po zdjęciu obciążenia z siłownika, elementy nadal obciążone były ciężarem belki trawersu.



Rys. 9. Sposób przyłożenia obciążenia oraz pomiaru odkształceń (obrotu) słupa

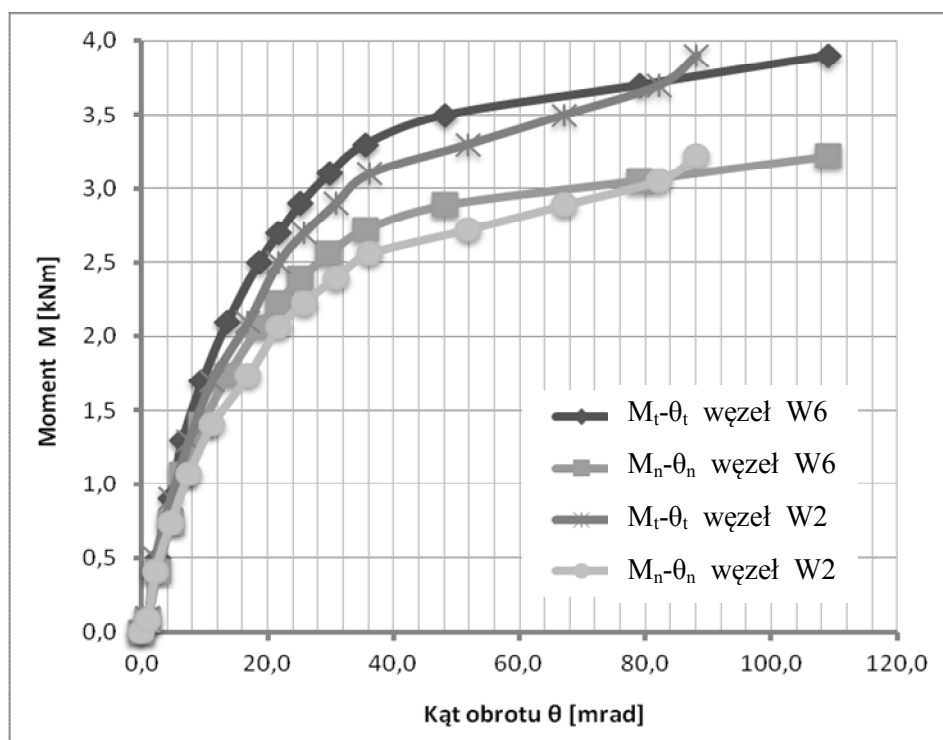
Fig. 9. Method of the load application and strain (rotation) measurement of the column

Pomiar kątów obrotu inicjowano w momencie rozpoczęcia właściwego badania, w związku z czym, pomierzony kąt obrotu węzłów na etapie obróbki wyników należało powiększyć o wstępny obrót wywołany ciężarem trawersu (0,5 kN). Ze względu na trudności w wykonaniu dokładnego pomiaru tak małego kąta obrotu przy pomocy inklinometru, wielkość tegoż kąta obliczono na podstawie wyspecyfikowanej przez producenta w dokumentacji DTR sztywności węzła. Dodatkowo pomierzone przy pomocy inklinometrów wartości kątów obrotu węzłów pomniejszono o odkształcenia giętne słupa, który zmieniały się wraz z przyrostem siły. W ten sposób wyznaczono zaobserwowane wartości kątów obrotu węzłów, zaś stowarzyszone z nimi wartości momentów zginających określono w sposób analityczny na podstawie sił odczytanych z siłownika.

5. Wyniki badań

Zgodnie z procedurą normowa [1], w celu wyznaczenia skorygowanych wartości momentów zginających oraz towarzyszących im kątów obrotu, należy

obliczyć współczynnik korekcyjny C_m , który uwzględnia wartości granicy plastyczności komponentów węzła oraz grubość materiałów. Z elementów poddanych badaniu należy wybrać ten, który wprowadza większą poprawkę do wyników. Poprawkę dla rygla odrzucono pomimo faktu, iż właśnie ten element uległ zniszczeniu, ponieważ jego rzeczywista, ustalona na drodze badań materiałowych granica plastyczności była większa od 125% gwarantowanej przez producenta granicy plastyczności. Ponadto w zapisach normy [1] podano także, iż stosowanie poprawek mniejszych niż 15% jest zbędne. Określenia wartości współczynnika korekcyjnego C_m dokonano częściowo w oparciu o wcześniej zrealizowane badania materiałowe próbek stali pobranych z poszczególnych elementów systemu, przeprowadzone na potrzeby ekspertyzy [3]. Spośród wartości wyliczonych dla poszczególnych komponentów węzła wybrano współczynnik korekcyjny C_m dla blachy węzłowej, równy 0,676. Procedura wprowadzania poprawek przewiduje, iż krzywą moment-obrót $M_t-\theta_t$ dzieli się na dwie części, przedstawiającą odpowiednio odkształcenia sprężyste i odkształcenia niesprężyste połączenia.

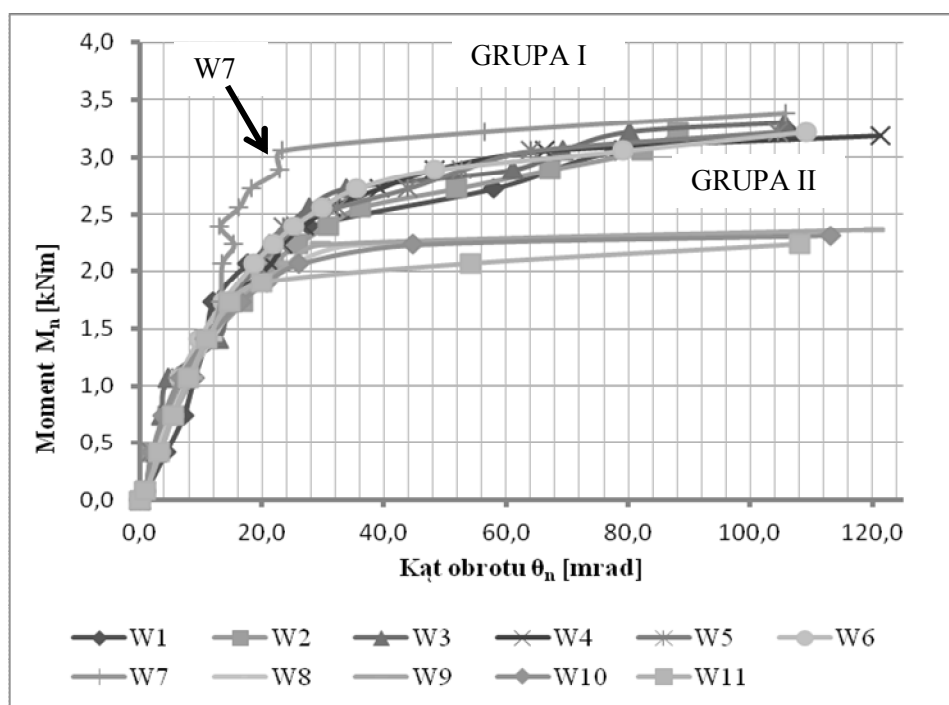


Rys. 10. Wybrane wykresy zależności moment-obrót dla wartości zaobserwowanych $M_t-\theta_t$ oraz wartości skorygowanych $M_n-\theta_n$.

Fig. 10. Exemplary characteristics of moment-rotation relationship for recorded ($M_t-\theta_t$) and corrected ($M_n-\theta_n$) values of parameters.

Na Rys. 10 przedstawiono przykładowe krzywe dla wartości zaobserwowanych $M_t-\theta_t$ oraz skorygowanych $M_n-\theta_n$. Należy nadmienić, że w dalszej części niniejszego opracowania autorzy artykułu będą posługiwać się wyłącznie wartościami i wykresami dla wartości skorygowanych.

Skorygowane krzywe moment-obrót dla obu kategorii połączeń przedstawiono na Rys. 11. Widoczna jest wyraźna różnica w przebiegu krzywych dla każdej z grup, zgodnie z wprowadzoną klasyfikacją, w zależności od sposobu połączenia rygla z blachą czołową zaczepu. Wyniki badań przedstawiono także w Tabelicy 1. Na podstawie uzyskanych danych, podjęto decyzję o wykluczeniu z dalszych obliczeń rezultatów dla próby W7 ze względu na wyraźnie odmienny charakter zachowania się tegoż węzła w trakcie badania i trudny do wyjaśnienia sposób odpowiedzi na przykładane obciążenie. Na pewnym fragmencie wykresu lokalnie widoczny jest spadek wartości kąta obrotu wraz ze wzrostem obciążenia, co przeczy prawom fizyki i intuicji inżynierskiej. Błąd ten najprawdopodobniej wynikał z drgań niestabilnie przymocowanego inklinometru, który poza kątem obrotu węzła rejestrował też wahania ciśnienia oleju w układzie hydraulicznym sterowania siłownikiem.



Rys. 11. Wykresy zależności wartości skorygowanych moment-obrót $M_n-\theta_n$ dla węzłów grupy I (W1-W7) oraz grupy II (W8-W11)

Fig. 11. Charts illustrating corrected characteristics of moment-rotation relationship $M_n-\theta_n$ for joints classified to group I (W1-W7) and group II (W8-W11), respectively.

Na podstawie uzyskanych wyników, korzystając z postanowień zawartych w [1], wyznaczono średni charakterystyczny moment niszczący M_k oraz obliczeniowy moment niszczący M_m ze wzoru:

$$R_k = R_m - k_s \cdot s \quad [1] \quad (46)$$

gdzie: R_m - wartość średnia skorygowanych wyników badań

k_s - współczynnik podany w Tablicy 13 [1] oparty na kwantylu 95% przy poziomie ufności 75%,

s - odchylenie standardowe skorygowanych wyników badań,

$$s = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (R_{ni} - R_m)^2}$$

n - liczba wyników badań w grupie,

R_{ni} - pojedynczy wynik badania, skorygowany ze względu na grubość i granicę plastyczności.

Tablica 1. Wartości momentów niszczących i maksymalnych kątów obrotów

Table 1. Values of destructive bending moments and the corresponding maximum angles of rotation

	Węzeł	Charakterystyczny skorygowany moment niszczący M_n [kNm]	Maksymalny skorygowany kąt obrotu θ_n [mrad]
Grupa I	W1	3,22	106,34
	W2	3,22	88,19
	W3	3,30	105,64
	W4	3,19	121,35
	W5	3,22	104,59
	W6	3,22	109,13
	W7	3,39	105,76
Grupa II	W8	2,31	107,73
	W9	2,36	120,30
	W10	2,31	113,15
	W11	2,23	108,08

Tablica 2. Wartości momentów niszczących

Table 2. Characteristic and design values of destructive bending moments

Węzły	Charakterystyczny moment niszczący M_k [kNm]	Obliczeniowy moment niszczący M_{Rd} [kNm]
Grupa I (W1-W6)	3,145	2,859
Grupa II (W8-W11)	2,160	1,963

W Tablicy 2 przedstawiono, z podziałem na poszczególne grupy węzłów (według przyjętej wcześniej klasyfikacji), wartości momentów niszczących charakterystycznych M_k i obliczeniowych M_{Rd} wyznaczone ze wzoru:

$$M_{Rd} = \eta \frac{M_k}{\gamma_M} \quad [1] \text{ (A.10)}$$

gdzie: η - zmienny współczynnik redukcyjny,
 γ_M - częściowy współczynnik bezpieczeństwa, podany w Tablicy 3 [1].

Na Rys. 12 i Rys. 13 pokazano wyznaczone na podstawie procedury zawartej w [1] uśrednione krzywe regresji $M_n-\theta_n$. Zgodnie z [1], krzywą można opisać przy pomocy wyrażenia zawierającego nie więcej niż 5 niezależnych współczynników, ale ze względu na charakter wykresów uznano, że krzywa aproksymująca powinna być wielomianem 4 stopnia i analogicznie do badań przeprowadzonych w Politechnice Rzeszowskiej przez Kozłowskiego i Ślęczkę [2], zastosowano właśnie takie krzywe.

W wyniku przeprowadzonych analiz uzyskano następujące krzywe regresji, opisane wzorami, odpowiednio:

Dla węzłów grupy I:

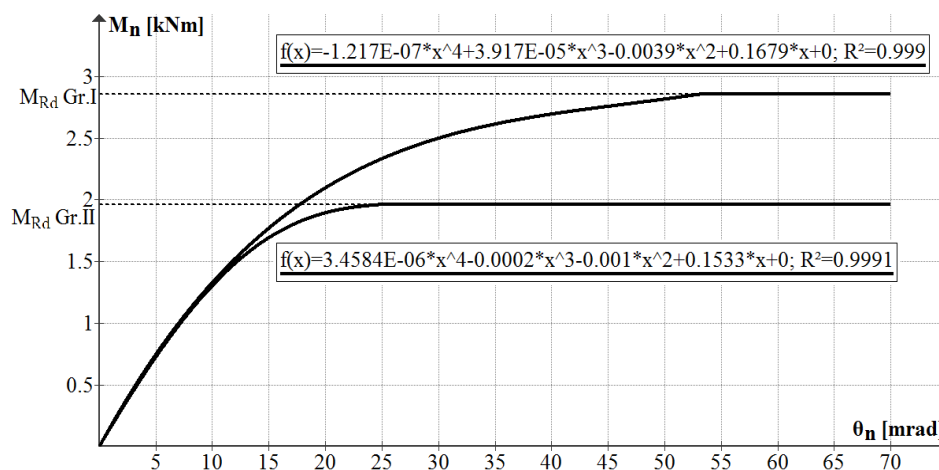
$$M(\theta) = -1,2170 \cdot 10^{-7} \cdot \theta^4 + 3,9170 \cdot 10^{-5} \cdot \theta^3 - 3,8860 \cdot 10^{-3} \cdot \theta^2 + 0,1679 \cdot \theta$$

$$R^2 = 0,9990 \quad (1)$$

Dla węzłów grupy II:

$$M(\theta) = -3,4584 \cdot 10^{-6} \cdot \theta^4 - 1,6813 \cdot 10^{-4} \cdot \theta^3 - 9,5326 \cdot 10^{-4} \cdot \theta^2 + 0,1533 \cdot \theta$$

$$R^2 = 0,9991 \quad (2)$$



Rys. 12. Krzywe regresji moment-obrót dla węzłów grupy I (W1-W6) i grupy II (W8-W11)

Fig.12. Regression curves of moment-rotation characteristics for joints of group I (W1-W6) and group II (W8-W11), respectively.

Zazwyczaj dobór krzywej regresji jest oparty o zasadę najlepszego dopasowania przebiegu funkcji do wyników badań doświadczalnych. Od strony praktycznej takie podejście sprowadza się do kalibracji parametrów funkcji metodą najmniejszych kwadratów w taki sposób, by uzyskać możliwie niską wartość odchylenia standardowego oraz możliwie bliską jedności wartość współczynnika korelacji w stosunku do wartości uzyskanych z badań.

Zwykle krzywe dobrane w sposób statystyczny wymagają wprowadzenia pewnych poprawek by mogły być w pełni użyteczne przy zaawansowanej analizie odkształcalności połączeń metodą składnikową lub iteracyjno-składnikową. Aby krzywa mogła być traktowana jako pełnowartościowa funkcja opisująca relację $M-\theta$, powinna ona, zgodnie z [4] spełniać następujące wymagania:

- przechodzić przez początek układu współrzędnych,
- pochylenie krzywej w początkowym zakresie obciążeń powinno odpowiadać sztywności początkowej węzła – $S_{j,ini}$,
- dla dużych kątów obrotu pochylenie krzywej powinno być równe sztywności wzmocnienia – S_p ,
- krzywa powinna zmierzać asymptotycznie do nośności granicznej węzła,
- w każdym punkcie krzywej, styczna do niej winna reprezentować aktualną, chwilową sztywność węzła – S_t ,
- parametry modelu powinny mieć fizyczne znaczenie lub być wyrażone przez geometrię węzła i mieć prostą postać.

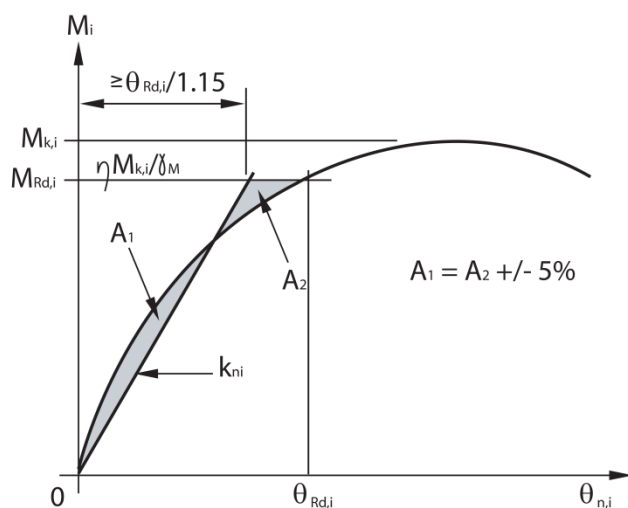
Na tym etapie badań szczegółowa weryfikacja spełnienia powyższych kryteriów nie była prowadzona, podobnie jak nie stanowi ona istoty niniejszego opracowania.

6. Wyznaczanie sztywności węzłów

Ostatnią i zarazem najtrudniejszą częścią całej procedury opracowania wyników badań okazało się wyznaczenie sztywności obrotowej węzłów, zgodnie z procedurą zawartą w [1]. Przewiduje ona, iż sztywność obrotową zaczepu należy uzyskać jako nachylenie k_{ni} linii prostej przechodzącej przez początek układu współrzędnych i przecinającej wykres $M-\theta$ w taki sposób, by pola powierzchni zawarte pomiędzy tą prostą a krzywą doświadczalną, poniżej momentu obliczeniowego skorygowanego ze względu na plastyczność i grubość, $M_{Rd,c}$, były jednakowe (Rys. 13 – Rys. A.6, [1]), przy jednoczesnym spełnieniu warunku:

$$k_{ni} \leq 1,15 \frac{M_{Rd}}{\theta_{ki}} \quad [1] \text{ (A.11)}$$

gdzie: M_{Rd} - moment obliczeniowy skorygowany ze względu na plastyczność i grubość
 θ_{ki} - charakterystyczny kąt obrotu węzła.



Rys. 13. Rys. A.6, [1]

Fig. 13. Fig. A.6, [1]

Krzywą k_{ni} należy wyznaczyć oddzielnie dla każdego badania, a następnie sztywność węzła przyjąć jaką średnią dla poszczególnych badań. Dla krzywej 4 stopnia żaden z badanych węzłów nie spełnił równocześnie obu stawianych warunków, postanowiono zatem skorzystać z innych krzywych (wielomianów innego stopnia), jednak ta zmiana nie przyniosła oczekiwanych rezultatów. Jedynie dla jednego z badań oba kryteria spełniała krzywa 2 stopnia, której dokładność była znacznie mniejsza niż w przypadku wielomianów wyższych stopni.

W kolejnym kroku skupiono się na skorzystaniu z warunku [1] (A.11), ale uzyskane z niego wartości sztywności dla I grupy węzłów okazały się o 49% niższe od wartości wyspecyfikowanej przez producenta. Następnie podjęto próbę wyznaczenia sztywności obrotowej węzłów na podstawie drugiego warunku normowego, odnoszącego się do zachowania równości pól powierzchni pomiędzy wykresami. Stosując tę procedurę uzyskano wyższe wartości sztywności, zdecydowanie bliższe tym zawartym w dokumentacji DTR systemu. Przy takim podejściu wartość sztywności uzyskana z obliczeń okazała się o ponad 16% niższa od wartości wyspecyfikowanej przez producenta w dokumentacji systemu. Pomimo, iż przyjęte procedury szacowania sztywności węzłów nie są w pełni zgodne z postanowieniami [1], jako że równoczesne spełnienie dwóch postawionych przez autorów normy kryteriów okazało się niemożliwe, to jednak uzyskane rezultaty wzbudzają pewne wątpliwości.

Porównanie wielkości ustalonych na podstawie własnych badań doświadczalnych z wartością określoną przez producenta na poziomie 106,25 N·mm/rad, z uwagi na znaczne rozbieżności, budzi poważne wątpliwości bądź co do wiarygodności przyjętej metodologii, bądź co do wartości wyspecyfikowanej w dokumentacji.

Z uwagi na stwierdzone niezgodności autorzy zdecydowali się dla celów porównawczych skorzystać z innych metod wyznaczania sztywności węzłów podatnych, opisanych w literaturze przedmiotu.

W pozycji [4], Bródka i Kozłowski dla niestężonych układów wrażliwych na boczne przemieszczenia proponują metodę tzw. „linii belkowej”. Korzystając z proponowanej metody przeprowadzono obliczenia po raz kolejny, a ich wyniki dla celów porównawczych, przedstawiono w Tablicy 3. Wyniki uzyskane z wykorzystaniem metody „linii belkowej” odbiegają od wcześniej uzyskanych wielkości, są bliższe wartości podanej w dokumentacji DTR systemu i – w odróżnieniu od poprzednich rezultatów – zachowują pewną logiczną prawidłowość objawiającą się tym, iż sztywność węzłów z pełną spoiną obwodową jest wyższa od sztywności węzłów z niepełną spoiną. Dla sprawdzenia poprawności uzyskanych wyników obliczenia przeprowadzono po raz kolejny, stosując procedury opisane w dokumencie normalizacyjnym [5] wydanym przez Instytut Logistyki i Magazynowania w Poznaniu. Uzyskane rezultaty okazały się bliższe tym wynikającym z procedur normowych zaczerpniętych z [1] (warunek równych pól między wykresami) niż tym, wynikającym z zastosowania metody „linii belkowej” [4].

Tablica 3. Wartości sztywności wyznaczone wg różnych metod.

Table 3. Values of flexural stiffness of joints determined by different methods.

	Sztywność [N·mm/rad]	
	I grupa węzłów	II grupa węzłów
Warunek (A.11), [1]	$54,07 \cdot 10^6$	$88,83 \cdot 10^6$
Warunek równych pól, Rys. 13.	$90,20 \cdot 10^6$	$116,46 \cdot 10^6$
Linia belkowa, [4]	$105,28 \cdot 10^6$	$92,03 \cdot 10^6$
IL-B-001:1998, [5]	$90,15 \cdot 10^6$	$109,40 \cdot 10^6$

Sztywność wg [5] wyznacza się dla momentu granicznego równego:

$$M_{gr} = 0,75 \cdot M_{max} \quad [5] \quad (8)$$

gdzie: M_{max} – moment dla kąta obrotu węzła $\theta=5^\circ$ (87,2665 mrad),

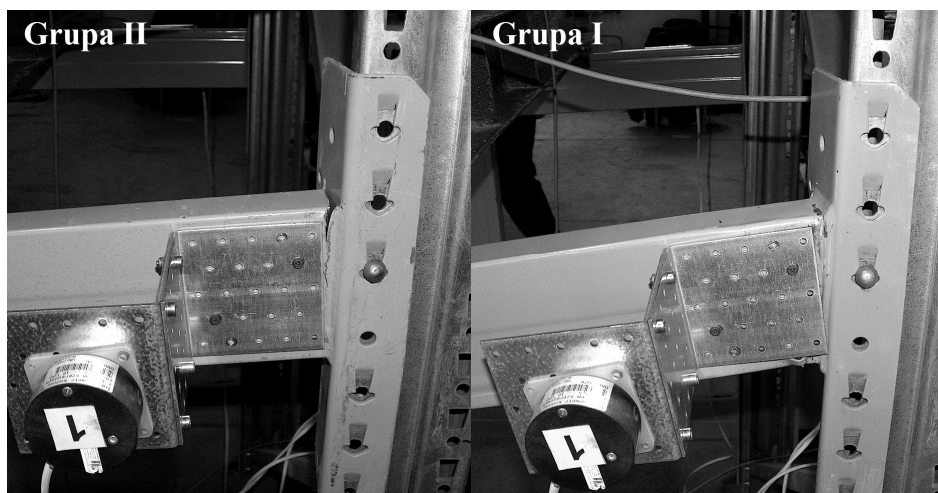
Podczas prowadzonych badań średnia wartość kąta θ w momencie niszczenia węzła wynosiła $6,1^\circ$, czyli była o ok. 20% wyższa od kąta odpowiadającego M_{max} .

7. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań i przeprowadzonych w ich następstwie analiz można sprecyzować następujące wnioski:

- Widoczne są różnice w zachowaniu się węzłów poddanych działaniu momentów zginających w zależności od sposobu ułożenia spoiny. Rozbieżności w osiągniętych wartościach momentów niszczących M_{Rd} sięgały ok. 69%, co zdaniem autorów dyskwalifikuje je jako elementy należące do jednego systemu. Uzyskane wyniki potwierdzają wnioski sformułowane we wcześniejszej ekspertyzie, [3].
- Sposób ułożenia spoiny nie wpływa na zachowanie elementów w fazie początkowej (odkształcenia sprężyste), Rys. 11. Dopiero po przekroczeniu przez moment zginający wartości $1,75$ kNm zaczynają się zarysowywać widoczne różnice w zachowaniu obu typów węzłów.
- Po przekroczeniu przez moment zginający wartości ok. $2,00$ kNm w węzłach grupy II ujawnia się nagły przyrost wartości kątów obrotu, w węzłach z pełną spoiną obwodową zjawisko to następuje później i ma łagodniejszy charakter.

- d) Sposób zniszczenia obu typów węzłów był bardzo podobny, za każdym razem zniszczeniu ulegała belka w obrębie strefy wpływu ciepła w bezpośredniej bliskości wykonanych spoin. W węzłach z niepełną spoiną pęknięcia przekroju rygła były większe, z uwagi na wyższy poziom wyężenia spoiny w pobliżu narożnika belki, Rys. 14.



Rys 14. Sposoby zniszczenia węzłów grupy II i grupy I

Fig. 14. Schemes of destruction for joints classified to group II and group I

- e) Uzyskane rezultaty skłaniają do refleksji nad słusnością przedstawionej w [1] metodyki oznaczania sztywności węzłów. Zaobserwowane rozbieżności w wartościach kluczowych parametrów wydają się być na tyle istotne, że nie sposób przejść nad nimi obojętnie, szczególnie, że uzyskane wyższe wartości sztywności dla węzłów z niepełną spoiną zdają się przeczyć prawom fizyki i logice inżynierskiej. Z drugiej zaś strony przy węzłach zakwalifikowanych do II grupy, uzyskano niższe wartości nośności przy takich samych kątach obrotu jak dla węzłów z pełną spoiną.
- f) Wyciągnięcie dalej idących wniosków w zakresie poprawności proponowanych procedur, jak również dokonanie w pełni rzetelnej oceny przyczyn wskazanych rozbieżności oraz wiarygodności wyników wskazują na konieczność przeprowadzenia serii dalszych badań i w pełni uzasadniają tę potrzebę.
- g) W dokumencie [5] zwraca się uwagę, iż wyznaczona wg opisaney tam procedury wartość sztywności jest wyraźnie mniejsza od rzeczywistej sztywności zaczepu w zakresie mniejszych kątów. Autorzy dokumentu proponują, aby charakterystykę pracy węzła opisać za pomocą wielomianu i przypisywać poszczególnym węzłom różną sztywność

w zależności od ich położenia na kondygnacjach regału. Zdaniem autorów dokumentu znajdujące się wyżej węzły są z reguły mniej obciążone i można im przypisać wyższą sztywność poprzez zmniejszenie wartości M_{gr} nawet o 40%. Ostateczną decyzję w tym zakresie pozostawia się projektantowi.

- h) Bazując na uzyskanych wynikach, jedynie zastosowanie metody „linii belkowej”, opisanej w [4] zwróciło wyniki, które zdaniem autorów niniejszej pracy, z czysto inżynierskiego punktu widzenia sprawiają wrażenie najbardziej wiarygodnych.

Literatura

- [1] PN-EN 15512:2011 - Stalowe statyczne systemy składowania - Regały paletowe o zmiennej konfiguracji - Zasady projektowania konstrukcji, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2011.
- [2] Kozłowski A., Ślęczka L.: Experimental analysis of beam-to-column joints in steel storage pallet racks, Eurosteel Coimbra 2002, s.897-906.
- [3] Król P.A., Kwaśniewski L., Lutomirski S., Witkowski J., Żółtowski W.: Opinia naukowo – techniczna dotycząca katastrofy regału wysokiego składowania typu XY, opracowanie wewnętrzne Instytutu Konstrukcji Budowlanych Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.
- [4] Bródka J., Kozłowski A.: Sztywność i nośność węzłów podatnych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Białystok - Rzeszów 1996.
- [5] IL-B-001:1998, Bezpieczeństwo urządzeń techniki magazynowania. Wymagania podstawowe, Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 1998.

EXPERIMENTAL TESTS ON SEMI-RIGID BEAM-TO-COLUMN JOINTS IN STEEL STORAGE PALLET RACKS

Summary

Steel high storage pallet racks are one of the most common and more widely used skeletal thin-walled structures. A typical pallet rack consists of columnar structural systems, consisting of two separate columns connected with the set of diagonals, that provides the required stiffness in the transverse direction. In the longitudinal direction it is typical sway-frame structure not braced in any way, and the appropriate rigidity of the system is guaranteed by the rigidity of the columns themselves, and the stiffness of the column-to-floor and the beam-to-column semi-rigid joints. In this paper the results of series of experimental tests carried out on unilateral semi-rigid beam-to column joints applied in the typical pallet rack system solution are presented and discussed. The study involved two groups of beams, with full and partial weld seam connecting the front plate of the hooking joint. The relationship between the bending moment and the angle of rotation for the analyzed groups are similar in nature, but the elements with only a partial weld seam transfer substantially smaller bending moment. Stiffness defined for each group of joints based on various normative documents show quite significant differences. This points to the need for further studies to clarify the procedure on how to correctly determine the load capacity and stiffness of this type of joints, the knowledge of which is essential for the proper design of this type of construction. Reliability of the analysed joints affect

the safety of the whole structure, which is particularly important because of the increasing use of steel storage racks systems in public areas of huge stores, supermarkets and malls.

Key words: storage pallet racks, semi-rigid joints, experimental tests, capacity and stiffness of joints

DOI: 10.7862/rb.2013.23

Przesłano do redakcji: w czerwcu 2013 r.

Przyjęto do druku: w sierpniu 2013 r.