

Modelowanie zachowania się ram stalowych z węzłami podatnymi

Modelowanie ram o węzłach podatnych metodami zaawansowanej analizy konstrukcji wymaga wyboru i wykorzystania jednego z pakietów MES-owskiej analizy konstrukcji, które są dostępne na rynku informatycznym. Komercyjne pakiety obliczania złożonych układów konstrukcyjnych metodą elementów skończonych umożliwiają analizę zjawisk fizycznie i geometrycznie nieliniowych, wybór różnego typu elementów skończonych modelujących konstrukcję, a także metod analizy, które pozwalają na symulowanie zjawisk kontaktu i tarcia w połączeniach oraz śledzenie likwidacji luzów i propagacji pól szczytów. Metody zaawansowanej analizy konstrukcji wykorzystuje się w pracach badawczych i studialnych, zmierzających do poznania mechanizmów rządzących zjawiskami statecznościowego zachowania się konstrukcji, wpływu uplastycznienia i wzmocnienia w zakresie obciążeń powtarzalnych oraz lokalnych efektów zachodzących w złączach i badania ich związku z zachowaniem się całej konstrukcji. Poznanie tych mechanizmów warunkuje opracowanie uproszczonych modeli konstrukcji, w których stan graniczny może być opisany prostymi modelami fenomenologicznymi plastycznego zniszczenia oraz sprężystej utraty stateczności. Uproszczone modele mają zastosowanie w praktycznym projektowaniu konstrukcji.

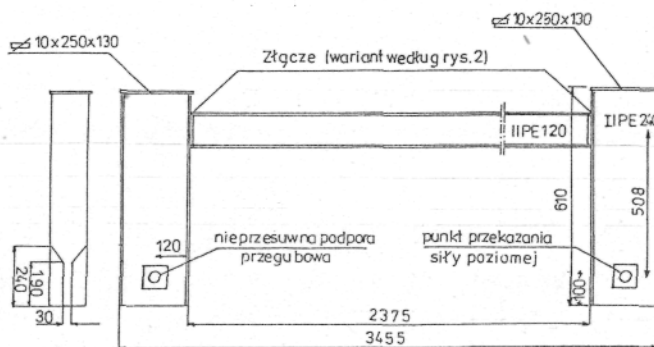
Wykorzystanie metod zaawansowanej analizy konstrukcji nie wydaje się, na obecnym etapie, możliwe w normalnej praktyce projektowej, gdyż wymaga specjalistycznej wiedzy z zakresu mechaniki ośrodków ciągłych, metod numerycznego rozwiązywania problemów nieliniowej analizy konstrukcji zdyskretyzowanych, a także umiejętności modelowania konstrukcji różnymi elementami skończonymi oraz interpretowania uzyskanych wyników. Metody zaawansowanej analizy konstrukcji będą wykorzystywane do projektowania konstrukcji szczególnie odpowiedzialnych, takich jak np. układy hybrydowe, głównie o dużych rozpiętościach, konstrukcji platform wiertniczych czy też obiektów inżynierii nuklearnej. Metody te mogą być używane dla przypadków nie objętych przepisami norm projektowania, szczególnie gdy zachodzi konieczność dokonania oceny stanu konstrukcji [8, 12, 13]. Typowe sytuacje projektowe wymagają natomiast stosowania uproszczonych metod, pozwalających na szybkie i wystarczająco dokładne projektowanie.

W artykule¹⁾ przedstawiono wybrane zagadnienia modelowania ram z węzłami podatnymi metodą zaawansowanej analizy konstrukcji, wykorzystując system MES ABAQUS, wersja 5.6-1, z dostępem do postprocesora PATRAN i postprocesora graficznej prezentacji wyników [7]. Wykorzystano przestrzenny model konstrukcji, z modelowaniem elementów składowych węzłów i prętów powłokowymi elementami skończonymi. Analizowano zachowanie się ram pod obciążeniem zwiększającym się monotonicznie oraz dokonano wstępnej oceny ich zachowania się w przypadku obciążeń tętających i przemiennych. Oceniono czas trwania obliczeń i ich dokładność w przypadku uwzględnienia kontaktu blachy czołowej rygla w jego połączeniu ze słupem oraz przy pominięciu kontaktu. Przyjęty sposób modelowania ma na celu dokładniejszą analizę zjawisk nieliniowych zachodzących w ramach z węzłami podatnymi niż sposób tradycyjny, wykorzystujący elementy prętowe i sprężyny modelujące sztywność węzłów [3, 4, 5].

Wspólną cechą wyselekcjonowanej grupy konstrukcji ramowych jest możliwość stworzenia modelu teoretycznego, który pozwala na śledzenie zachowania się wszystkich układów konstrukcyjnych.

Założenia do modelowania

• **Opis rozwiązań konstrukcyjnych ram objętych modelem.** Na rysunku 1 przedstawiono prętowy układ ramowy, złożony z prętów o przekroju dwuteowym, na rys. 2 – możliwe rozwiązania połączeń prętów w węzłach i na rys. 3 – możliwe sposoby łączenia, które zostały wyselekcjonowane do modelowania teoretycznego. Opracowanie modeli teoretycznych wyselekcjonowanej grupy konstrukcji ramowych umożliwia przeprowadzenie ich weryfikacji z uwzględnieniem wyników badań doświadczalnych.

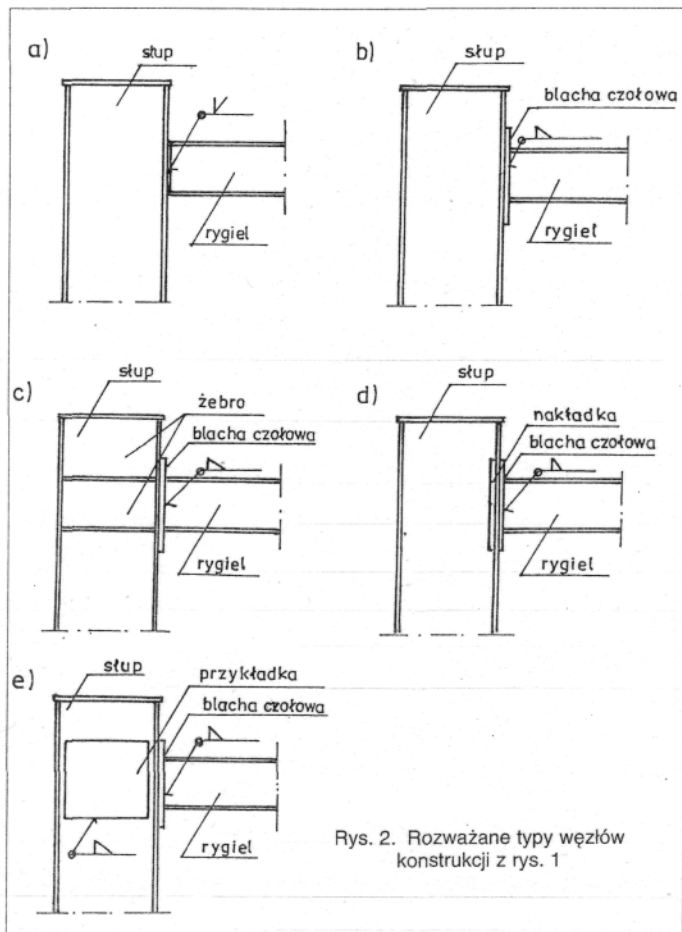


Rys. 1. Prętowy układ ramowy wyselekcjonowany do modelowania teoretycznego

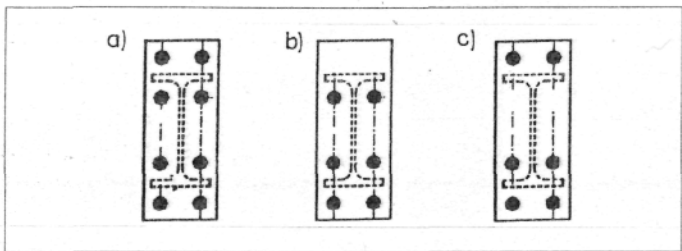
Wspólną cechą wyselekcjonowanej grupy konstrukcji ramowych jest możliwość stworzenia modelu teoretycznego, który pozwala na śledzenie zachowania się wszystkich układów konstrukcyjnych.

• **Dyskusja ogólnych założeń do zaawansowanego modelowania konstrukcji.** Przy tworzeniu zaawansowanych modeli konstrukcji, z wykorzystaniem MES, jest możliwe opracowanie modelu trójwymiarowego, nazywanego skrótowo modelem 3D, który wykorzystuje bryłowe elementy skończone. Przyjęcie elementów bryłowych do modelowania dwuteowego przekroju prętów, blach czołowych, żeber, nakładek oraz łączników śrubowych umożliwia precyzyjne śledzenie przebiegu uplastycznienia elementów składowych na kierunku ich grubości. Zastosowanie algorytmu badania kontaktu w obszarach możliwego współdziałania elementów złącznych umożliwia śledzenie procesu likwidacji luzów, rozwoju stref lokalnych docisków i pól szczytów, a więc pozwala na zbliżenie modelu teoretycznego do rzeczywistej pracy konstrukcji. W modelu trójwymiarowym na ogół wprowadza się 4 warstwy elementów bryłowych na grubości płytowych elementów składowych przekroju prętów, nakładek, żeber i blach czołowych, a także 4 warstwy elementów skończonych na długości promienia przekroju łącznika śrubowego. Zasadniczą przeszkodą w praktycznym zastosowaniu takiego sposobu dyskretyzacji MES jest konieczność rozwiązywania zadań przyro-

¹⁾ W artykule przedstawiono wyniki prac prowadzonych w projekcie badawczym KBN nr 7 T07E 05210.



Rys. 2. Rozważane typy węzłów konstrukcji z rys. 1



Rys. 3. Rozważane sposoby rozmieszczenia łączników śrubowych w połączeniach z rys. 2

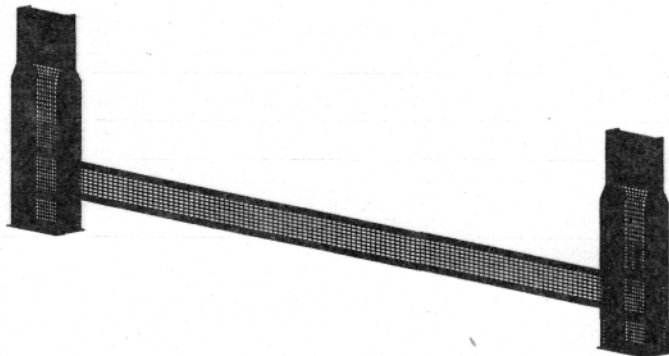
stowej analizy konstrukcji o setkach tysięcy stopni swobody, co jest teoretycznie możliwe, ale bardzo trudne do praktycznej realizacji. Rzeczywisty czas trwania obliczeń jednej ścieżki równowagi dla obciążeń jednocyklowych osiąga na komputerze Cray CS 6400 kilka dni, a dla obciążeń zmiennych cyklicznie – nawet kilka tygodni. Długi czas i związany z tym ogromny koszt obliczeń były podstawową przeszkodą zastosowania modelu 3D w badaniach prowadzonych przez autorów.

Poszukując uproszczeń w MES-owskim modelowaniu konstrukcji przyjęto model powłokowy, nazywany skrótowo modelem 2D. W modelu powłokowym płytowe elementy składowe przekroju prętów i elementy łączne węzłów są zastępowane ich powierzchniami środkowymi, co pozwala na istotne zmniejszenie liczby stopni swobody w stosunku do modelu 3D. Aczkolwiek występuje znaczne zmniejszenie zadania obliczeniowego, to w modelu powłokowym nie ma możliwości poprawnego modelowania wpływu efektów grubości elementów składowych prętów i elementów łącznych węzłów, a także charakterystyki samych łączników śrubowych, gdyż ich długość jest redukowana w tym modelu do zera. Niedogodność w modelowaniu łącznika śrubowego ominięto w ten sposób, że łącznik zastąpiony został sprężyną o odpowiednio dobranej charakterystyce sztywnościowej.

Mimo tych trudności, model powłokowy ma, poza oczywistym zmniejszeniem liczby stopni swobody, jeszcze jedną bardzo istotną cechę – umożliwia „uchwycenie” zjawiska lokalnej utraty stateczności elementów składowych węzłów i przekroju prętów, a więc ocenę wpływu tych zjawisk na nośność układu. Ocena taka nie jest możliwa wówczas, gdy słupy i rygle ram modeluje się elementami liniowymi, w których przekroje prętów zastępuje się punktami leżącymi na osi pręta.

Zaawansowany model konstrukcji z węzłami podatnymi

• **Dyskretyzacja.** Sposób dyskretyzacji elementów ramy pokazanej na rys. 1 na elementy powłokowe przedstawiono na rys. 4. Badany układ podzielony został na 16 000 elementów powłokowych i liczył około 60 000 stopni swobody, gdy w ramie zastosowano węzeł, którego szczegół konstrukcyjny pokazano na

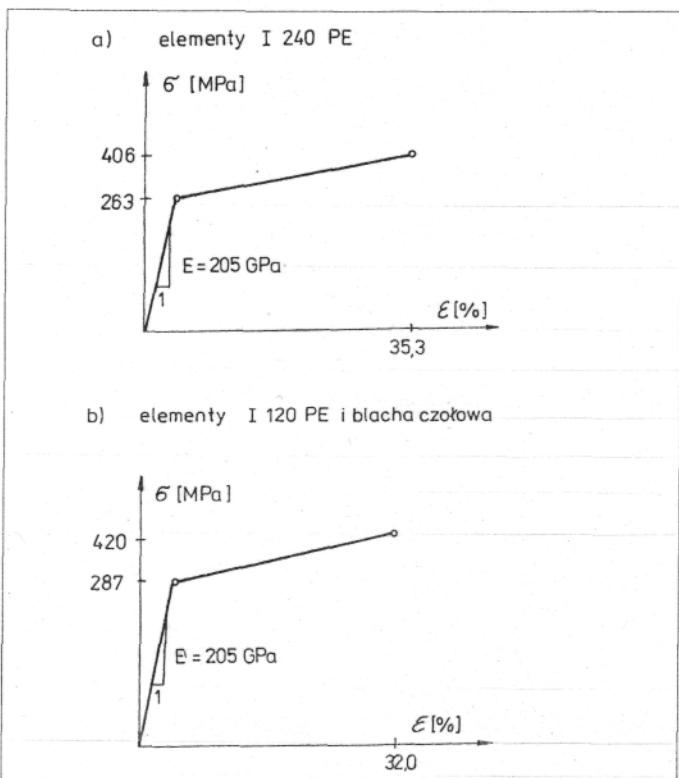


Rys. 4. Sposób dyskretyzacji ramy z węzłami spawanymi na elementy powłokowe

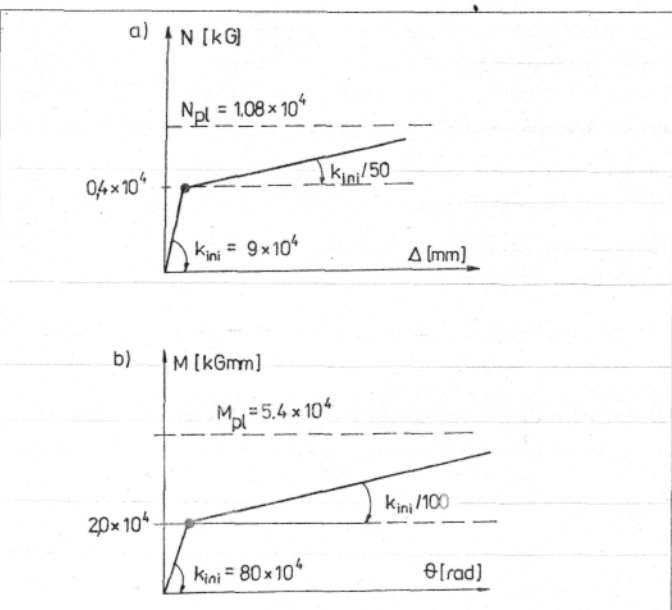
rys. 2a. Chociaż model powłokowy pozwala na istotne zmniejszenie liczby stopni swobody w stosunku do modelu trójwymiarowego, jego zastosowanie prowadzi w efekcie i tak do otrzymania zadania obliczeniowego o dużej liczbie niewiadomych kinematycznych w rozwiązywanym przyrostowym równaniu równowagi. W połączeniach śrubowych z blachami czołowymi, pokazanych na rys. 2b-e, może być uwzględniony kontakt powierzchni środkowych pasa słupa i blachy czołowej rygla, jako pewne przybliżenie stanu rzeczywistego. Założono niewielką lukę początkową pomiędzy powierzchniami kontaktu, a w strefach kontaktu małe poślizgi, przy przyjęciu współczynnika tarcia 0,18, jak dla powierzchni nie obrabionych mechanicznie. Śruby zastąpione zostały elementami sprężyn o charakterystykach liniowych bądź nieliniowych. Modelowana była sztywność osiowa i gięciowa łącznika.

• **Numeryczna realizacja sposobu obciążenia konstrukcji.** Obciążenie ramy pokazanej na rys. 1 stanowi skupiona siła pozioma, przyłożona w dolnym przekroju lewego słupa. Założono, że obciążenie jest przekazywane przez bardzo sztywny trzpień. Ponieważ trudno jest sprecyzować poprawnie sposób rozdziału obciążenia na węzły konstrukcji zdyskretyzowanej na elementy skończone, przyjęto, że rama jest obciążona wymuszonym przemieszczeniem, występującym w teoretycznym punkcie przyłożenia obciążenia skupionego i zgodnym z kierunkiem działania tego obciążenia. Zakres zmienności przemieszczenia wymuszającego odpowiedź konstrukcji przyjęto w przedziale od 0 do 200 mm. Symetrycznie w stosunku do punktu przyłożenia siły, względem osi pionowej, jest umiejscowiona nieprzesuwana podpora, o rozwiązaniu konstrukcyjnym analogicznym do rozwiązania elementu, za którego pośrednictwem obciążenie jest przekazywane na układ. Z warunku równowagi konstrukcji jako ciała sztywnego wynika, że siłę odpowiadającą wymuszonemu przemieszczeniu obliczać można jako poziomą reakcję konstrukcji w punkcie podparcia. Reakcję obliczano jako sumę reakcji poziomych występujących w węzłach siatki podziału słupa na elementy skończone, przy czym uwzględ-

dniano tylko te węzły siatki, w których występuje docisk pomiędzy słupem ramy a sztywnym trzpieniem podpory. Jako zależność charakteryzującą odpowiedź konstrukcji przyjęto reakcję działającą na podporze w zależności od przemieszczenia wymuszającego odpowiedź konstrukcji.



Rys. 5. Modele konstytutywne przyjęte do opisu zachowania się materiału, z którego wykonano węzłowe i prętowe elementy ramy

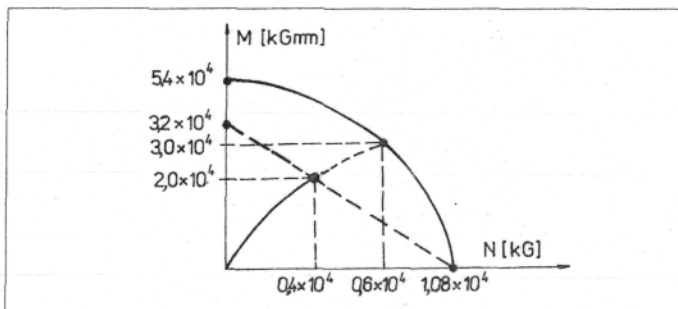


Rys. 6. Modele konstytutywne przyjęte do opisu zachowania się łączników śrubowych modelowanych elementami sprężyn translacyjnych i obrotowych

• **Opis zachowania się materiału i przyjęte charakterystyki łączników.** Na rysunku 5 przedstawiono przyjętą w analizie charakterystykę $\sigma - \epsilon$ materiału elementów ramy wykonanych ze stali St3S. Przyjęto równania konstytutywne jak dla materiału sprężysto-plastycznego ze wzmocnieniem kinematycznym.

Na rysunku 6 przedstawiono nieliniowe charakterystyki łącznika śrubowego M12, klasy 10.9, modelowanego przez spręży-

ny o odpowiednio dobranych funkcjach biliniowych $F - \Delta$ dla stanu osiowych odkształceń trzpienia śruby oraz $M - \theta$ dla stanu zginania trzpienia śruby. Początkowe sztywności określono uwzględniając efektywną długość śruby równą grubości łączonych elementów oraz połowę grubości łba i nakrętki, zgodnie z zaleceniami EC3 [1]. Początkowy obszar liniowej pracy łącznika jest ograniczony krzywą stanu sprężystego, pokazaną na rys. 7. Stan sprężysty pracy łącznika kończy się, gdy siła osio-



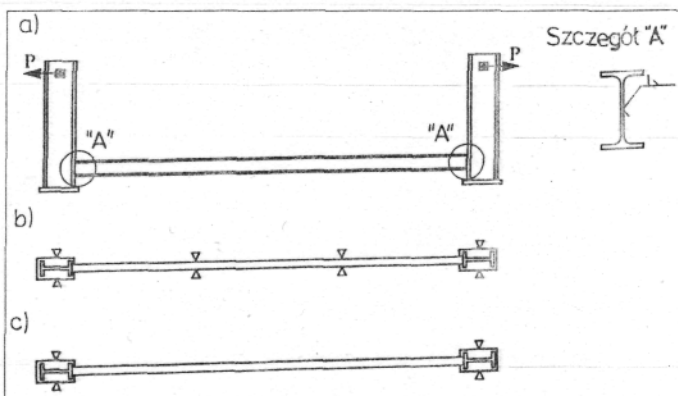
Rys. 7. Obszary sprężystego i sprężysto-plastycznego zachowania się łącznika śrubowego z uwzględnieniem interakcji $M - N$

wa generowana w trzpieniu śruby przekroczy około 67% siły granicznej, związanej z jego uplastycznieniem, przy jednoczesnym działaniu momentu zginającego wynoszącego około 37% momentu granicznego, związanej z utworzeniem się przegubu plastycznego w trzpieniu śruby. Przyjęto, że powyżej tej granicy sztywności sprężyn zmniejszają się. W celu uproszczenia analizy założono, że w zakresie niesprężystym charakterystyki sprężyn są opisane odcinkami liniowymi o sztywności zredukowanej odpowiednio do 1/50 początkowej sztywności przy rozciąganiu i 1/100 początkowej sztywności przy zginaniu.

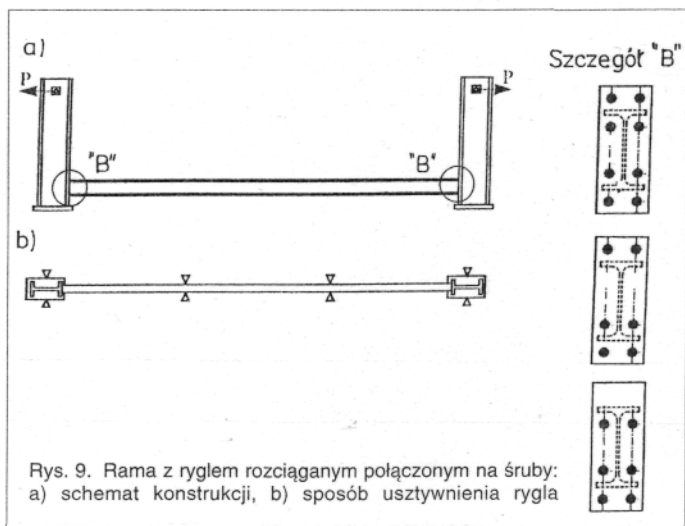
• **Metody analizy.** Rozwiązano trzy klasy zagadnień opisujących zachowanie ramy przedstawionej na rys. 1, w których przeprowadzono:

- a) analizę wartości własnych i wektorów własnych ramy o węzłach spawanych (rys. 8),
- b) geometrycznie liniową analizę ramy o węzłach spawanych, jak w a), oraz o węzłach z blachami czołowymi i różną liczbą łączników w strefie rozciąganego pasa ryglu (rys. 9),
- c) geometrycznie nieliniową analizę ramy o węzłach spawanych (rys. 10).

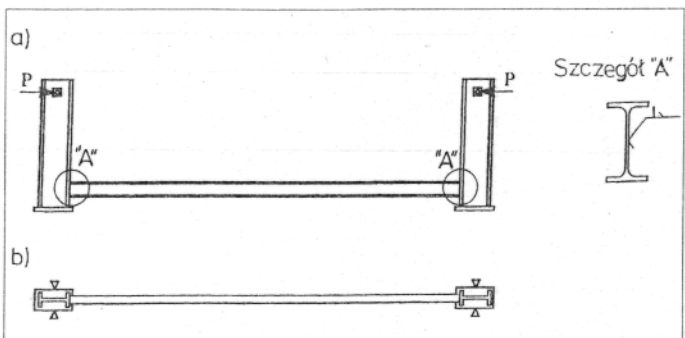
W programie ABAQUS, wykorzystanym w obliczeniach, jest zastosowana metoda *Newtona-Raphsona* rozwiązywania przrostowego równania równowagi oraz jest przyjmowany niejawny schemat całkowania równań konstytutywnych z algorytmiczną macierzą konstytutywną [16]. Do badania ścieżek równowagi po osiągnięciu punktu granicznego jest stosowana metoda *Riksa* [14].



Rys. 8. Rama z ryglem rozciągającym spawanym: a) schemat konstrukcji, b) rygiel usztywniony w odstępach co 1/3 rozpiętości, c) rygiel bez usztywnień międzywęzłowych



Rys. 9. Rama z rygłem rozciągającym połączonym na śruby: a) schemat konstrukcji, b) sposób usztywnienia rygla



Rys. 10. Rama z rygłem ściskającym: a) schemat konstrukcji, b) sposób usztywnienia rygla

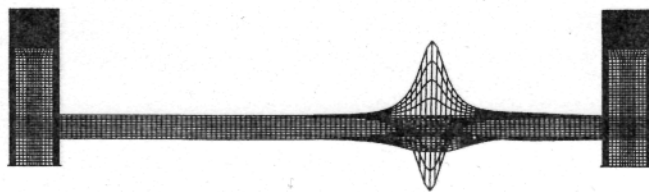
• Wyniki obliczeń

• **Problem wartości własnych i wektorów własnych.**

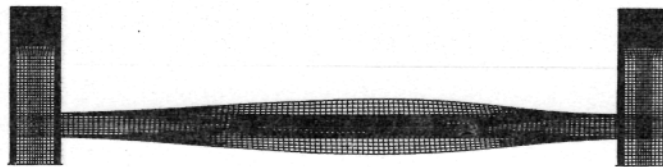
Problem wartości własnych i wektorów własnych rozwiązano w wypadku ramy spawanej, w której siła obciążająca układ powodowała rozciąganie rygli (rys. 8). Oszacowano 6 kolejnych postaci utraty stateczności ramy stężonej poprzecznie w końcowych przekrojach słupów i w przekrojach rygli w odstępach co 1/3 jego rozpiętości oraz ramy, której rygiel nie jest stężony poprzecznie. Informacja o postaci utraty stateczności ramy pozwala stwierdzić, które z układów są bardziej wrażliwe na „płytkowe” formy utraty stateczności, związane z lokalnym wybrzuszeniem pasów i środnika rygli o dwuteowym przekroju poprzecznym, a które są mniej wrażliwe na te formy utraty stateczności, a bardziej wrażliwe na formy „prętowe”, związane z nieeulerowskim wyboczeniem rygla.

Z porównania wyników widać, że zastosowanie stężeń poprzecznych w odstępach co 1/3 rozpiętości rygla wymusza pojawienie się „wyżej energetycznych” postaci utraty stateczności. Dominują formy związane z lokalną utratą stateczności pasów i środnika rygli. Pojawiają się wyłącznie te formy utraty stateczności, przy czym wyraźnie zaobserwować można, że obszar najbardziej wrażliwy na miejscową utratę stateczności jest zlokalizowany między połączeniem rygla ze słupem a pierwszym usztywnieniem rygla w przęśle, od strony podporu ramy (pierwszą postać własną odkształcenia rygla przedstawiono na rys. 11).

W układach z ryglami, które nie są usztywnione między ich połączeniami ze słupem, pojawiają się „niższe energetyczne” postaci utraty stateczności. Dominują formy „prętowe” związane z giętno-skrętnym wyboczeniem układu. Obciążenie krytyczne ram z ryglami nie usztywnionymi w płaszczyźnie do nich prostopadłej, odpowiadające pojawieniu się pierwszej wartości wła-



Rys. 11. Rama stężona, pierwsza postać wyboczenia

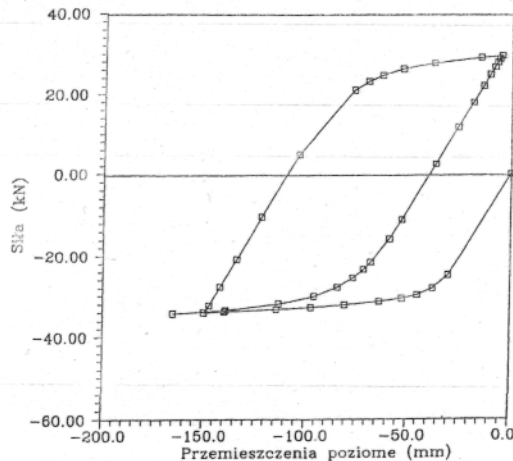


Rys. 12. Rama niestężona, pierwsza postać wyboczenia

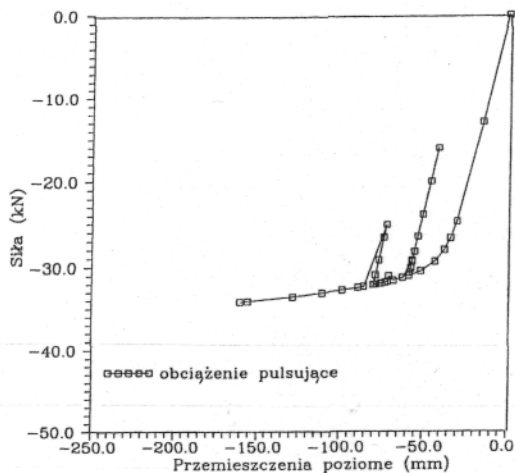
snej, jest ponad 2,5-krotnie mniejsze od obciążenia krytycznego ram z ryglami usztywnionymi poprzecznie w odstępach co 1/3 rozpiętości (rys. 12). Przestrzenny charakter utraty stateczności ram z ryglami rozciągającymi nie usztywnionymi w płaszczyźnie do nich prostopadłej potwierdza zjawisko znane z teorii stateczności prętów cienkościennych, że zwichrzenie zginanych elementów konstrukcji jest możliwe również wówczas, gdy występuje osiowa siła rozciągająca [17].

• **Geometrycznie liniowa analiza ramy z ryglami rozciągającymi.**

Przyjęto ramę o węzłach spawanych jako układ porównawczy dla ram z połączeniami na śruby. Analizę ścieżki równowagi ramy spawanej przeprowadzono przy założeniu obciążenia cyklicznie zmiennego. W analizie tej chodziło o sprawdzenie technicznej możliwości numerycznego badania przystosowania się konstrukcji do obciążeń o wartości większej od maksymalnej dla zakresu liniowo-sprężystego. Przede wszystkim oceniano czas obliczeń wymagany do realizacji pętli histerezy w programie obciążeń zmiennych w czasie. Na rysunku 13 przedstawiono pętlę histerezy dla jednego cyklu obciążeń i sytuacji, gdy początek cyklu rozpoczyna się w punkcie bliskim nośności granicznej układu. Czas realizacji tego zadania obliczeniowego wyniósł na komputerze Cray CS6400 ponad 4 doby, co wskazuje, że nie istnieje praktyczna możliwość komputerowej symulacji zachowania się bardziej skomplikowanych układów konstrukcyjnych poddanych obciążeniom cyklicznym. Geometrycznie liniowa analiza pozwala na wystarczająco dokładne śledzenie ścieżki równowagi układu, gdy w poprzecznie stężonym ryglu występuje siła rozciągająca. Przy odciążeniu układu, znak siły w ryglu ulega zmianie. Układ z rygłem zginanym i ściskającym staje się



Rys. 13. Rama rozciągana, zależność siła – obciążenie przemienne

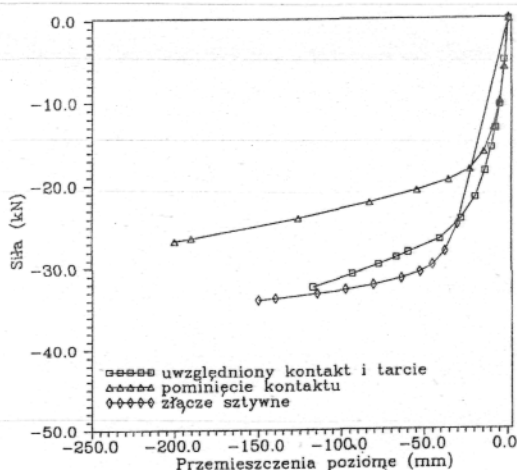


Rys. 14. Rama rozciągnięta, zależność siła – obciążenie tętniące

bardziej wrażliwy na różne formy utraty stateczności. Badanie statecznościowego zachowania się układu pod obciążeniem cyklicznym wymaga więc zastosowania analizy geometrycznie nieliniowej. Powodowałoby to znaczne wydłużenie czasu obliczeń.

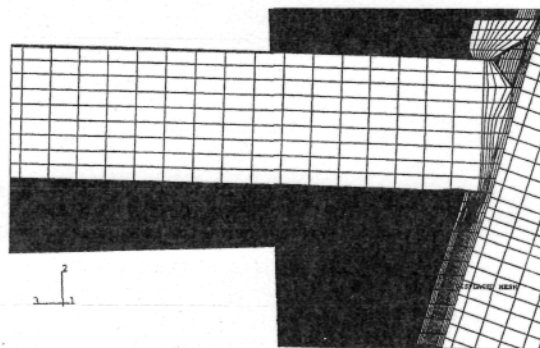
Na rysunku 14 przedstawiono zależność siła – przemieszczenie badanej ramy przy numerycznej realizacji dwóch cykli odciążenia typu tętniącego. Taki program obciążenia jest najczęściej realizowany w budowlanych konstrukcjach stalowych, gdyż zmienny składnik obciążenia stanowi od 25 do 50% obciążenia maksymalnego. Rzeczywisty czas realizacji tego zadania obliczeniowego uległ skróceniu o ponad 50% w stosunku do zadania przedstawionego na rys. 13. Każde z zadań, w których symulowano obciążenia zmienne konstrukcji, prowadzi jednak do bardzo czasowo- i kosztochłonných obliczeń, co praktycznie przekreśla możliwość stosowania takiej analizy w praktycznym projektowaniu. W wypadku analizowanych ram z węzłami spawanymi, uplastycznieniu ulegają przywęzłowe odcinki pasów ryglu oraz fragmenty pasa i środnika słupa.

W wypadku ram z węzłami śrubowymi badano zależności obciążenia-przemieszczenie, gdy jest uwzględniony kontakt powierzchni środkowych płyty czołowej i pasa słupa oraz przy pominięciu kontaktu. Zależności porównano z charakterystyką odpowiedzi ramy spawanej. Na rysunku 15 przedstawiono wyniki obliczeń ramy z łącznikami śrubowymi rozmieszczonymi jak na rys. 3a. Zastosowanie opracowanego modelu zachowania się ramy z węzłami śrubowymi wskazuje, że początkowa sztywność

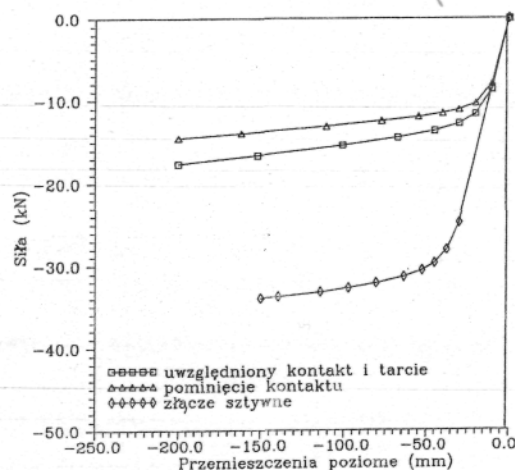


Rys. 15. Ścieżki równowagi ramy ze złączem spawanym (nominalnie sztywne) i złączem śrubowym według rys. 3a)

układu z łącznikami śrubowymi jest większa w porównaniu z układem o węzłach spawanych. Wraz ze zwiększeniem obciążenia, zmniejsza się sztywność układu z łącznikami śrubowymi i odpowiadające mu krzywe obciążenie-przemieszczenie „układają się” poniżej krzywej dotyczącej złącza spawanego. Obliczenia wykazały, że bardzo istotnym czynnikiem wpływającym na charakter ścieżki równowagi i obciążenie graniczne układu z węzłami śrubowymi jest zjawisko kontaktu i tarcia między elementami składowymi złącza. W analizowanym połączeniu z ośmioma śrubami pominięcie wpływu kontaktu i tarcia w złączu powoduje zmniejszenie obciążenia granicznego układu o około 18%. Po uwzględnieniu tych czynników, nośność układu zbliża się do nośności ramy z węzłami spawanymi.



Rys. 16. Postać zniszczenia złącza według rys. 3a)

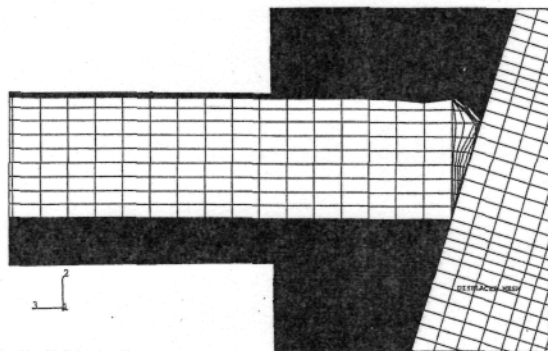


Rys. 17. Ścieżki równowagi ramy ze złączem spawanym (nominalnie sztywne) i złączem śrubowym według rys. 3b)

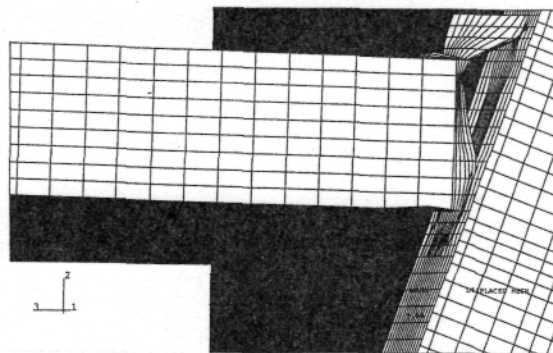
Analiza stanu naprężenia w przywęzłowych strefach pasa i środnika „prętowych” elementów ramy wskazuje, że praktycznie nie ma odkształceń plastycznych w ryglu i słupie. Oznacza to, że odkształcenia plastyczne występują głównie w blasze czołowej złącza i koncentrują się w zewnętrznej linii łączników śrubowych, poza obrysem przekroju ryglu.

Na rysunku 16 przedstawiono charakter zniszczenia złącza. Zaobserwować można tworzenie się stref załomów plastycznych blachy czołowej, które sygnalizują ujawnienie się stanu granicznego konstrukcji.

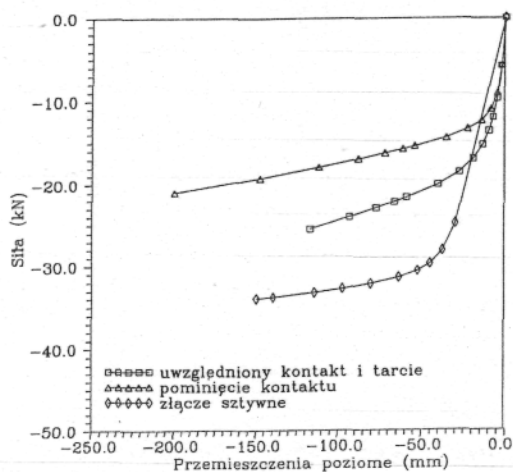
Rysunek 17 zawiera wyniki obliczeń ramy z łącznikami śrubowymi, rozmieszczonymi jak na rys. 3b. Nośność graniczna ramy z węzłami śrubowymi, gdy w strefie rozciąganego pasa ryglu stosowano tylko dwa łączniki śrubowe usytuowane poniżej pasa ryglu, jest znacznie mniejsza niż nośność układu z węzłami spawanymi. W wypadku tego typu złącza nie obserwuje się zjawiska „przesztywnienia” układu w początkowej fazie obciążenia. Wpływ zjawiska kontaktu i tarcia między blachą czołową i pasem słupa jest w przypadku tego złącza porównywalny z występującym w złączu z ośmioma śrubami (por. rys. 15). Obserwuje



Rys. 18. Postać zniszczenia złącza według rys. 3b)



Rys. 20. Postać zniszczenia złącza według rys. 3c)



Rys. 19. Ścieżki równowagi ramy ze złączem spawanym (nominalnie sztywne) i złączem śrubowym według rys. 3c)

się także podobną tendencją w przebiegu zależności obciążenie-przemieszczenie, gdy jest uwzględniony kontakt i tarcie oraz gdy czynniki te są pominięte w modelu obliczeniowym. Uwzględnienie wpływu kontaktu i tarcia powoduje zwiększenie obciążenia granicznego o około 22%.

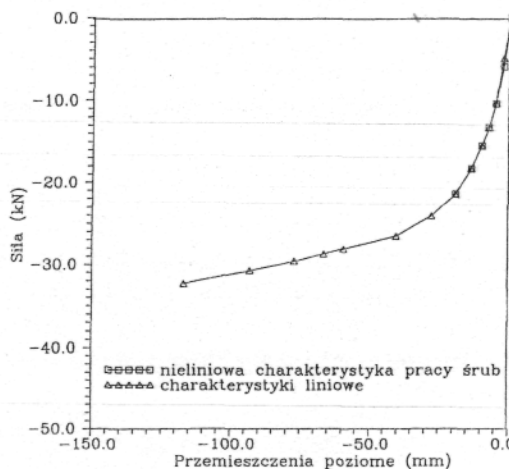
Na rysunku 18 przedstawiono mechanizm zniszczenia złącza. Wyraźnie widać duże obroty lokalne rygła, związane z dużymi odkształceniami plastycznymi blachy czołowej. Dużym odkształceniom giętnym blachy czołowej w pobliżu łączników w strefie rozciągania złącza towarzyszy quasi-sztywny obrót swobodnej części blachy czołowej, wystającej poza obrys rozciągającego pasa rygła.

Na rysunku 19 pokazano wyniki obliczeń ramy z łącznikami śrubowymi, rozmieszczonymi jak na rys. 3c. Nośność graniczna ramy z węzłami śrubowymi, gdy w strefie rozciągającego pasa rygła zastosowano tylko dwa łączniki śrubowe usytuowane poza pasem rygła, jest mniejsza niż nośność układu z czterema łącznikami symetrycznie rozmieszczonymi po obu stronach rozciągającego pasa rygła (rys. 3a) i większa niż nośność układu z dwoma łącznikami umieszczonymi poniżej rozciągającego pasa rygła (rys. 3b). Podobnie jak w przypadku złącza z ośmioma śrubami (rys. 15) i tu występuje „przesztywnienie” obliczanego układu w początkowej fazie obciążenia. Wpływ zjawiska kontaktu i tarcia elementów złącza jest istotny i zbliżony do występującego w pozostałych połączeniach śrubowych. Uwzględnienie wpływu kontaktu i tarcia powoduje zwiększenie obciążenia granicznego o około 19%.

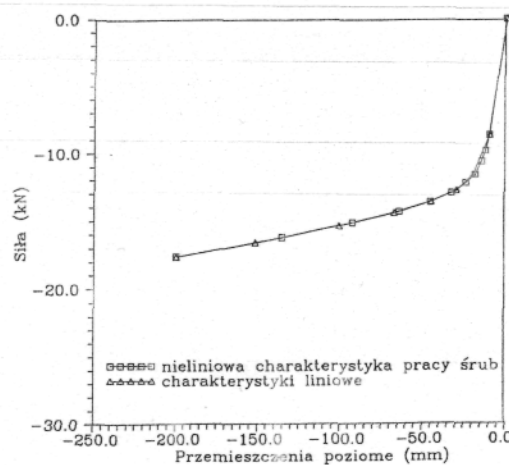
Na rysunku 20 przedstawiono mechanizm zniszczenia złącza. Wyraźnie widać „oderwanie” blachy czołowej od łożyska słupa i tendencję tworzenia się linii załomów w linii śrub oraz na krawędzi pasa rozciągającego rygła, na odcinku blachy czołowej wystającym poza obrys przekroju rygła. Analizując zachowanie złączy śrubowych, porównano ścieżki równowagi uzyskane dla nie-

liniowych charakterystyk sprężyn modelujących zachowanie się łączników śrubowych (rys. 6) oraz przy założeniu liniowego zachowania się łącznika z pominięciem efektu uplastycznienia łączników i związanej z tym degradacji sztywności łącznika na rozciąganie i zginanie. Na rysunkach 21 i 22 przedstawiono porównanie wyników dotyczących ramy z połączeniami jak na rys. 3a.

Ścieżki równowagi układów ramowych w obu przypadkach pokrywają się, co sugeruje, że nie występuje uplastycznienie łączników. Analiza siły osiowej i momentu zginającego w sprężynach modelujących łączniki śrubowe potwierdza to spostrzeżenie, gdyż ścieżki równowagi $F - M$ łączników nie przecinają krzywej sprężystej (por. rys. 7).



Rys. 21. Porównanie zachowania ramy z uwzględnieniem nieliniowych charakterystyk śrub i z pominięciem charakterystyk nieliniowych; rama ze złączem śrubowym według rys. 3a) z uwzględnieniem tarcia

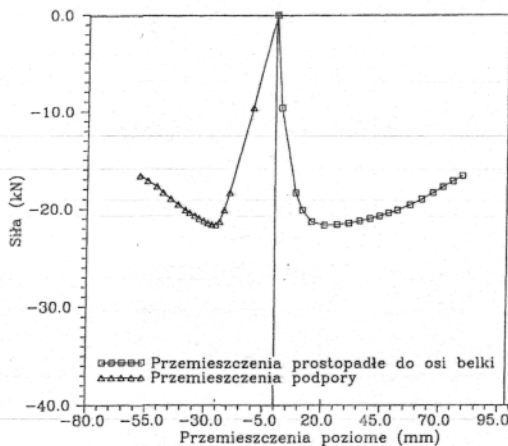


Rys. 22. Porównanie zachowania ramy z uwzględnieniem nieliniowych charakterystyk śrub i z pominięciem charakterystyk nieliniowych; rama ze złączem śrubowym według rys. 3a) bez uwzględnienia tarcia

• **Geometrycznie nieliniowa analiza ramy spawanej z rygłem ściskany.** Analizowano ścieżkę równowagi ramy o węzłach spawanych, przy zwrocie siły obciążającej powodującym ścisnienie rygla. Ze względu na brak możliwości przechodzenia ze statecznej gałęzi ścieżki równowagi na gałąź niestateczną, rozwiązano zagadnienie nośności pokrytycznej ramy posługując się analogią pręta *Roordy* [15]. Metoda ta została zastosowana w pracy [9] do analizy miejscowej utraty stateczności i stanów pokrytycznych środników belek zginanych. Polega ona na tym, że na oryginalny kształt ramy, w naszym wypadku konstrukcji powłokowej, narzucono układ imperfekcji geometrycznych zgodnych z pierwszą postacią utraty stateczności układu idealnego. Maksymalną imperfekcję przyjęto równą grubości środnika przekroju rygla.

Wyniki analizy przedstawiono na rys. 23. W początkowej fazie obciążenia przemieszczenie boczne przekroju środkowego rygla, charakterystyczne dla stanu pokrytycznego (prostopadle do płaszczyzny ramy), zwiększa się wolniej niż przemieszczenie w miejscu i na kierunku siły obciążającej układ ramowy. W miarę zbliżania się do punktu granicznego na ścieżce równowagi, przemieszczenie boczne środkowego przekroju rygla zaczyna przyspieszać i w stanie granicznym układu wynosi 20 mm, w porównaniu z 25 mm dla przemieszczenia pod siłą obciążającą ramę.

Postać zniszczenia ramy jest charakterystyczna dla przestrzennej formy utraty stateczności rygla ramy.



Rys. 23. Przemieszczenia niestężonej ramy z rygłem ściskany; rama ze złączem spawanym

Uwagi końcowe

Zaawansowane modelowanie zachowania się ram stalowych z węzłami podatnymi może być prowadzone z wykorzystaniem techniki MES. Użytkownik ma możliwość korzystania z wielu profesjonalnych pakietów obliczeniowych dostępnych na rynku informatycznym. W przedstawionych przez autorów badaniach zachowania się ram z węzłami podatnymi wykorzystano program ABAQUS, wersja 5.6-1. Chociaż wskazano na teoretyczną możliwość ścisłego modelowania dowolnego układu konstrukcyjnego z wykorzystaniem bryłowych elementów skończonych, to praktyczna realizacja konkretnych zadań obliczeniowych była możliwa dopiero wówczas, gdy uproszczono założenia do dyskretyzacji MES, zastępując bryłowe elementy skończone elementami powłokowymi. Model powłokowy konstrukcji z węzłami podatnymi jest modelem stosunkowo oszczędnym, gdyż pozwala na istotne zmniejszenie liczby stopni swobody w stosunku do modelu bryłowego. Mimo tego uproszczenia w modelowaniu, zastosowanie modelu powłokowego do rozwiązania konkretnych zadań obliczeniowych doprowadziło i tak do konieczności rozwiązywania przyrostowego równania równowagi o dużej liczbie niewiadomych. Uproszczenie sposobu dyskretyzacji MES dało jednak praktyczną możliwość uwzględnienia

wpływu kontaktu i tarcia między elementami składowymi złączy śrubowych na ocenę przebiegu ścieżki równowagi oraz poziomu obciążenia granicznego.

Na podstawie analizy wybranych układów ramowych o podatnych węzłach śrubowych stwierdzono, że w zaawansowanym modelowaniu zachowania się układów prętowych nie można pominąć zjawisk kontaktu i tarcia między elementami złącza. Uwzględnienie efektu kontaktu i tarcia prowadzi do podwyższenia obciążenia granicznego średnio o około 20% dla ram skutecznie zabezpieczonych przed przestrzenną formą utraty stateczności. W badanych ramach podatnych o węzłach śrubowych obciążenie graniczne bardzo wyraźnie zależy od liczby łączników oraz od ich usytuowania w stosunku do „punktu docisku” elementów złącza. Przeprowadzona analiza potwierdziła znane zjawisko, że większą nośność wykazują układy ze złączami o większej liczbie łączników, umieszczonych jak najdalej od strefy docisku połączenia. Dla przyjętej grubości blachy czołowej oraz średnicy śrub, uplastycznieniu ulegała jedynie blacha czołowa. Śruby zachowywały się liniowo-sprężysto w całym zakresie zmienności obciążenia. Mechanizm zniszczenia złącza jest związany z tworzeniem się załomów plastycznych w blachach czołowych.

W układach z ryglami nie podpartymi z płaszczyzny ramy i z węzłami o pełnej nośności występuje odmienny mechanizm zniszczenia, który jest związany z przestrzenną utratą stateczności rygla. Rozwiązano problem własny i geometrycznie nieliniowe zagadnienie nośności ramy, w której obciążenie powoduje ścisnienie rygla. Właściwa statecznościowa analiza zachowania się ramy dotyczyła układu imperfekcyjnego. W celu określenia najbardziej niekorzystnych form utraty stateczności ramy idealnej rozwiązano problem wartości własnych i wektorów własnych. Na geometrię ramy idealnej nałożono imperfekcje zgodne z pierwszą postacią wybożenia oraz przyjęto, że największa imperfekcja jest równa grubości środnika rygla. Wykorzystanie modelu powłokowego umożliwiło obserwację zjawisk stateczności miejscowej i stateczności ogólnej, związanej z utratą płaskiej postaci zginania układu. W punkcie granicznym na ścieżce równowagi przemieszczenia charakterystyczne dla pokrytycznego zachowania się układu osiągają wartości zbliżone do występujących w płaszczyźnie układu.

PIŚMIENNICTWO

- [1] ENV-1993-1-1 Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1-General Rules and Rules for Buildings.
- [2] *Giżejowski M.*: Nośność sprężysto-plastycznych belek ciągłych o przekrojach otwartych. Studia z Zakresu Inżynierii. KILiW PAN, PWN, Warszawa 1986.
- [3] *Giżejowski M.*: Projektowanie ram przechyłowych o węzłach podatnych – stan aktualny i kierunki rozwoju. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 3/1998.
- [4] *Giżejowski M.*: Zunifikowany system klasyfikacji przekrojów dla zintegrowanej analizy ram stalowych. Mat. XLIV Konferencji Naukowej KILiW PAN i KN PZITB, Poznań–Krynica 1998.
- [5] *Giżejowski M.*: Projektowanie ram o węzłach podatnych wspomaganie komputerowo. Mat. Konferencji Naukowej „Węzły podatne w konstrukcjach stalowych”, Warsztat II (red. A. Kozłowski), Rzeszów 1998.
- [6] *Hasan R., Kishi N., Chen W.F., Matsuoka K.G.*: $M - \theta$ Relationship of End-Plate Connections. Proc. 4th Pacific Structural Steel Conference, Vol. 2 Structural Connections, Singapore 1995.
- [7] *Hibbit, Karlsson, Sorensen*: Abaqus 5.6, User's Manual, Inc. Pawtucket, RI, 1989.
- [8] *Kamiński P., Kapela P., Nawrot T., Postek E., Woźniak G.*: Assessment of the state of steel structures. ITB, Warszawa 1987.
- [9] *Massonet Ch.*: Zagadnienia inżynierskie stateczności konstrukcji. Współczesne metody analizy stateczności konstrukcji. Zakliczyn, Ossolineum 1981.
- [10] *Murzewski J.*: Teoria losowej nośności konstrukcji prętowych. Studia z Zakresu Inżynierii, nr 15, KILiW PAN, PWN, Warszawa 1976.
- [11] PN-90/B-03200 Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [12] *Postek E., Hien T.D.*: On the application of the sensitivity analysis to the design of spatial bar structures. „Arch. Civ. Eng.”, 38 (1-2), 1992.
- [13] *Postek E.*: Numeryczna analiza wrażliwości na parametry projektowe dużych nieliniowych układów konstrukcyjnych. IPPT, 1996.
- [14] *Riks E.*: An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems. „Int. J. Solids Struct.”, 15/1979.
- [15] *Roorda J.*: Problemy stateczności konstrukcji. Współczesne metody analizy stateczności konstrukcji. Zakliczyn, Ossolineum 1981.
- [16] *Simo J.C., Taylor R.L.*: Consistent tangent operators for rate-dependent plasticity. „Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.”, vol. 48, 1985.
- [17] *Weiss S., Giżejowski M.*: Stateczność konstrukcji metalowych. Układy prętowe. Arkady, Warszawa 1991.