

# WYZNACZENIE WARTOŚCI SIŁ WEWNĘTRZNYCH W BLACHACH CZOŁOWYCH POŁĄCZEŃ DOCZOŁOWYCH ZWYKŁYCH

*Stefan Dominikowski*

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

*Piotr Bogacz*

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

**Słowa kluczowe:** *połączenie doczołowe, siły wewnętrzne, blacha czołowa*

**STRESZCZENIE:** W pracy zaproponowano symulacje komputerową połączenia doczołowego zwykłego. Model komputerowy opracowano w oparciu o program Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2010. Przeanalizowano mapy sił wewnętrznych i naprężeń na blachach czołowych połączenia. Analiza map pozwoliła określić przebieg zmienności momentów zginających w dowolnym przekroju połączenia oraz porównać uzyskany wykres momentów z wykresem momentów podanym w literaturze [1], [2], służącym do określenia minimalnej grubości blach czołowych ze względu na efekt dźwigni. W pracy określono również zależność siły obciążającej połączenie od grubości blach czołowych, przy założeniu maksymalnych naprężeń niszczących stal blach czołowych. Jest to jedno z kryteriów wymiarowania połączeń doczołowych. Dla wzorcowego połączenia, wyznaczono również wyteżenie śrub połączenia w zależności od wartości siły obciążającej.

## **Wstęp**

We współczesnych konstrukcjach stalowych do scalania elementów wysyłkowych i montażowych stosowane są przede wszystkim połączenia śrubowe. Złącza doczołowe niesprężone lub sprężone śrubami o wysokiej wytrzymałości należą do nowoczesnych sposobów łączenia rozciąganych oraz zginanych elementów konstrukcji metalowych, w których główna składowa obciążenia jest równoległa do osi śrub. Połączenia te są proste i łatwe do wykonania na budowie w każdych warunkach atmosferycznych, także na dużych wysokościach, bez użycia ciężkiego i specjalistycznego sprzętu. Połączenia te umożliwiają szybki montaż i ewentualny demontaż konstrukcji.

W niniejszej pracy podjęto problem wyteżenia śrub i blach czołowych w prostych rozciąganych połączeniach doczołowych. Do najważniejszych problemów, na które dotychczasowe badania nie dają jednoznacznej odpowiedzi, należą między innymi rozkład sił wewnętrznych w połączeniu (w blachach czołowych i śrubach), sposób wzajemnego oddziaływania na siebie krawędzi blach czołowych, wpływ efektu dźwigni na rzeczywistą nośność połączenia oraz minimalną grubość blach czołowych. Nie dość wyjaśniony jest charakter pracy śrub połączeń i wpływ grubości blach czołowych na charakter pracy blach czołowych połączeń doczołowych.

## **Opis modelu komputerowego**

W celu rozszerzenia poglądu na wyżej wymienione problemy przeprowadzono komputerową symulację rozciąganego połączenia doczołowego prostego w programie Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2010 licencja 3251. Zaprojektowano połączenie doczołowe rozciągane, zwykle w formie połączonych dwu dwuteowników blachownicowych poprzez blachy czołowe, śrubami M16 zamocowanymi w otworach  $\varnothing 18$

*Rys. 1. Model blachy czołowej połączenia.* Grubość blach czołowych połączenia doczołowego  $g_b = 16\text{mm}$ . Grubość blach prętów łączonych  $g_p = 10\text{mm}$ .

Połączenie blach czołowych zamodelowano jako połączenie utwierdzone blach w miejscach zamocowania śrub łączących blachy. Połączenie blach czołowych zrealizowano połączeniem sztywnym poprzez pręt  $\varnothing 16$  symulujący własności śruby M16 kl. 8.8 z zablokowanymi wszystkimi stopniami swobody (Rys. 11). Stal blach czołowych i prętów łączonych przyjęto S235. Śruby zamodelowano ze stali o własnościach mechanicznych zbliżonych do stali śrub klasy 8.8. Dolną część połączenia podparto podporami liniowymi przegubowymi. Do górnego, łączonego pręta blachownicowego przyłożono obciążenie węzłowe skupione. Obciążenie przyłożono do środkowego węzła siatki MES na górnej krawędzi środka blachownicy. Założono siatkowanie Metody Elementów Skończonych metodą Coonsa z możliwością automatycznego dopasowania siatek MES. W otoczeniu połączeń widoczne kody zablokowanych stopni swobody. W następnym etapie symulacji, zmieniano grubości blach czołowych, ustalając zależności siły wywołującej niszczące naprężenia normalne od grubości blach czołowych. Wyznaczono również wartość siły obciążającej połączenie, przy której wyężenia stali śrub są bliskie jedności.

### Analiza wyników

Utworzono mapę naprężeń normalnych na górnych powierzchniach blach czołowych (Rys. 4), mapę momentów zginających  $M_y$  (Rys. 5) oraz mapę przemieszczeń środków siatki MES (Rys. 6). Jednocześnie, w otoczeniu oddziaływania śrub, utworzono wykres zmienności momentów zginających weryfikujący przyjęte w literaturze wykresy momentów zginających [1]; [2] (przekrój A-A) (Rys. 7). Żółtowski [1] podaje wykres momentów zginających na powierzchni styku blach czołowych zakładając zerową wartość momentów na krawędziach podłużnych blach czołowych (Rys. 2).

*Rys. 2 Efekt dźwigni i wykres momentów na powierzchni blachy czołowej połączenia doczołowego [1]; [2]; [3]*

Korzystając z takiego wykresu momentów, wyprowadza znaną zależność normową na minimalną grubość blach czołowych. Zakłada się, że moment  $M_z \approx 0,66 Z \cdot c_l$  (Rys. 2). Wydzielając myślowo pasek blachy czołowej o szerokości  $b_z$ , można określić wartość momentu  $M_z$  [3].

$$M = 0,66 \cdot c \cdot Z = W \cdot f_d \Rightarrow \frac{M}{W} \leq f_d \quad (1)$$

$$W = \frac{1}{6} \cdot b_z \cdot t^2 \quad (2)$$

$$0,66c \cdot Z = 0,167 \cdot b_z \cdot t^2 \cdot f_d \quad (3)$$

$$t = \sqrt{\frac{0,66 \cdot c \cdot S_{Rt}}{0,167 \cdot b_z \cdot f_d}} = 2 \sqrt{\frac{c \cdot S_{Rt}}{b_z \cdot f_d}}$$

Ze względu na ograniczenie wzrostu wartości siły w śrubie wywołanego efektem dźwigni, przyjmuje się minimalną grubość blachy w połączeniu  $t_{\min} = 0,6t$ .

*Rys. 3 Model komputerowy analizowanego połączenia*

Wówczas minimalna grubość blachy wynosi:

$$t_{\min} = 0,6t = 1,2 \sqrt{\frac{c \cdot S_{Rt}}{b_z \cdot f_d}} \quad (4)$$

Zależność powyższa jest ważna przy założeniu zerowej wartości momentu zginającego na krawędziach blach czołowych [5]. W rzeczywistości na krawędziach występują niezerowe, rezydualne wartości momentów zginających oraz naprężeń normalnych (Rys. 3; Rys. 4). Założenie o zerowych momentach na krawędziach blachy jest w świetle analizy map naprężeń (Rys. 3; Rys. 4) dość dobrym przybliżeniem. Wykres momentów (Rys. 2) jest zbliżony do wykresu momentów (Rys. 7), ale przyjmowane wartości  $M_2$  (Rys. 2) są większe niż rzeczywiście występujące (Rys. 7). Spłaszczenie wykresu (Rys. 7) jest spowodowane usztywnieniem krawędzi blachy wzdłuż osi x-x. Występowanie w mianowniku ułamka czynnika  $b_z$  (Rys. 9) paradoksalnie powinno zmniejszyć grubość blach czołowych wraz ze wzrostem rozstawu śrub w połączeniu [5].

*Rys. 4 Mapa naprężeń normalnych w górnych włóknach blach czołowych połączenia*

*Rys. 5 Mapa momentów zginających w górnych włóknach blach czołowych połączenia*

Przypadki opisane w [1], [2] i [4] mają zastosowanie dla stosunkowo cienkich blach czołowych usztywnionych wzdłuż jednego kierunku. Symulacja komputerowa, przedstawiona w niniejszej pracy, uwzględnia usztywnienie blach czołowych wzdłuż obu kierunków; kierunek y-y usztywniony środkami prętów łączonych, a kierunek x-x usztywniony półkami prętów łączonych.

*Rys. 6 Mapa przemieszczeń węzłów siatki MES blach czołowych połączenia*

*Rys. 7 Wykresy momentów zginających  $M_y$  na blachach czołowych połączenia*

Marek [4] opisuje symulacje komputerową połączenia opartą na SBRA (Simulation-Based Reliability Assessment Method) zakładając w miejscach śrub podpory sprężyste, a na krawędziach blach podpory przegubowe (krawędź blachy oparta na krawędzi drugiej blachy). Obie metody uzyskują zerowe momenty na krawędziach blach oraz zakładają przegubowe oparcie blach. Jednocześnie Marek porównuje wyniki symulacji SBRA z zaleceniami EC3 [6], powtórzone w późniejszych wydaniach Eurokodów [7].

*Rys. 8 Deformacja blach czołowych połączenia*

*Rys. 9 Szerokość współdziałania blachy  $b_s$  przypadająca na jedną śrubę oraz odległość  $c$  krawędzi otworu od wewnętrznej krawędzi spoiny [5], [3]*

Wyniki symulacji SBRA są zbliżone do wyników symulacji podanych w niniejszym opracowaniu oraz podanych w [1] i [2]. Są również zbliżone do podanych w EC3. We wzorze na minimalną grubość blachy czołowej należałoby uwzględnić niezerowe wartości momentów na krawędziach blach czołowych (Rys. 5). Zastosowana symulacja komputerowa umożliwiła również określenie zależności siły obciążającej połączenie od grubości blach czołowych połączenia, przy założeniu osiągnięcia w blachach czołowych naprężeń normalnych niszczących połączenie. Założono stal blach czołowych S235. Dla zmienianych grubości blach czołowych, obciążano połączenie siłą, która powodowała osiągnięcie w stali blach czołowych naprężeń normalnych zbliżonych do naprężeń niszczących. Wartości siły osiowej przyjmowano tak, żeby wartość ekstremalnych naprężeń w blachach czołowych była zbliżona do wartości niszczących stal blach czołowych. Dla stali S235 przyjęto wartość  $R_m = 375\text{MPa}$  [5]. Zależności te przedstawia rysunek 10. Zależność ta pozwala określić wartość obciążeń niszczących blachy czołowe połączenia. Dla danej grubości blachy czołowej połączenia można odczytać wartość siły, przy której wartości naprężeń w blachach czołowych są bliskie  $R_m$ .

*Rys. 10 Zależność siły osiowej w połączeniu od grubości blach czołowych połączenia, przy założeniu osiągnięcia w blachach czołowych naprężeń niszczących połączenie*

*Rys. 11 Model połączenia śrubą blach czołowych; pręt  $\varnothing 16$ .  
Stal śruby symulująca stal śruby klasy 8.8*

Obliczenia przeprowadzono dla grubości blach 10-24mm. Krzywa regresji przedstawia prognozę wyników dla grubości blach czołowych do 30mm. Zmierzono jednocześnie wartość siły, przy której wyczerpania stali śrub są bliskie 1. Siła, która wywołuje zerwanie śrub M16 kl. 8.8 w modelowanym połączeniu, wynosi  $P = 320\text{kN}$ . Obciążenie przypadające na 1 śrubę wynosi  $P_1 = 80\text{kN} \cong S_{Rt} = 81,3\text{kN}$  [5]. Nośność śruby w połączeniu, zależy również od grubości blach (efekt dźwigni) i jest ona niższa dla blach o mniejszej grubości (np. dla blachy o grubości 16mm nośność śrub wynosi  $\sim 55\text{kN}$ )

## Podsumowanie

Współczesne metody komputerowej analizy konstrukcji dają możliwości dokładniejszej analizy pracy połączeń; również połączeń półsztywnych. Analiza map momentów zginających (Rys. 5) pozwala potwierdzić przyjęte schematy statyczne pracy blach czołowych. Założenie zerowych momentów zginających na krawędziach blach, jest zbliżone do rozkładu momentów zginających (wektor momentów wzdłuż osi y), uzyskanego w symulacji komputerowej. Na krawędziach blach czołowych występują momenty, których wartości można pominąć w analizie pracy połączenia. Mają one charakter rezydualny.

W śrubach łączących blachy czołowe, oprócz sił rozciągających, występują również momenty zginające (Rys. 5). Wartości momentów zginających śruby połączeń, maleją wraz ze wzrostem grubości blach czołowych połączenia. Wykresy momentów zginających w przekrojach w otoczeniu śrub, uzyskane w symulacji komputerowej, są bardzo zbliżone do wykresu momentów przedstawionych w pracach [1], [2], [3], [4]. Założenia różnych sposobów podparć krawędzi blach mało zmienia charakter rozkładu naprężeń i momentów zginających na blachach czołowych.

Dla dowolnego obciążenia połączenia, sprawa wzajemnego oparcia krawędzi blach, wydaje się nie mieć znaczenia, ponieważ pod wpływem obciążeń następuje rozwarcie blach czołowych co skutkuje brakiem wzajemnego oparcia krawędzi (Rys. 8).

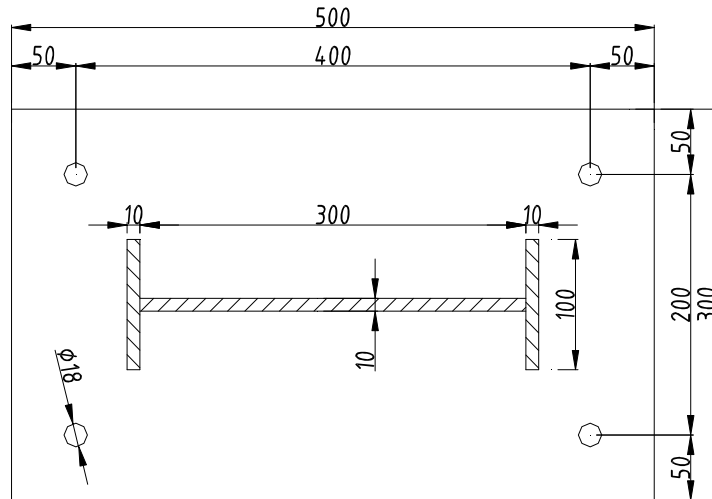
W zastosowanej symulacji, maksymalną wartość naprężeń normalnych na powierzchniach blach czołowych uzyskano w otoczeniu połączenia końców pólek blachownic łączonych (spawanych) z blachami czołowymi. Potwierdza to zasadę koncentracji, w tych miejscach, naprężeń.

Opisana w niniejszej pracy symulacja komputerowa, pozwoliła na wyznaczenie zależności siły obciążającej połączenie, od grubości blach czołowych przy założeniu wystąpienia w blachach czołowych naprężeń normalnych zbliżonych do  $R_m$  (Rys. 10). Umożliwiła również określenie wartości sił niszczących połączenie poprzez zerwanie śrub. Okazało się, że przyjęcie w modelu połączenia utwierdzonego poprzez pręt zamodelowany ze stali o wartościach mechanicznych zbliżonych do stali śrub, pozwoliło uzyskać wartości sił niszczących bardzo zbliżonych do wartości  $S_{Rt}$  [5]. Jednocześnie stwierdzono zmianę wartości siły osiowej  $P$  w śrubach od grubości blach czołowych. Dyskusyjnym wydaje się ogólnie przyjęte założenie o odwrotnie proporcjonalnej zależności grubości blach czołowych i mnożnika normowego  $b_z$  (Rys. 9). Wzrost wartości  $b_z$  paradoksalnie zmniejsza minimalną grubość blach czołowych.

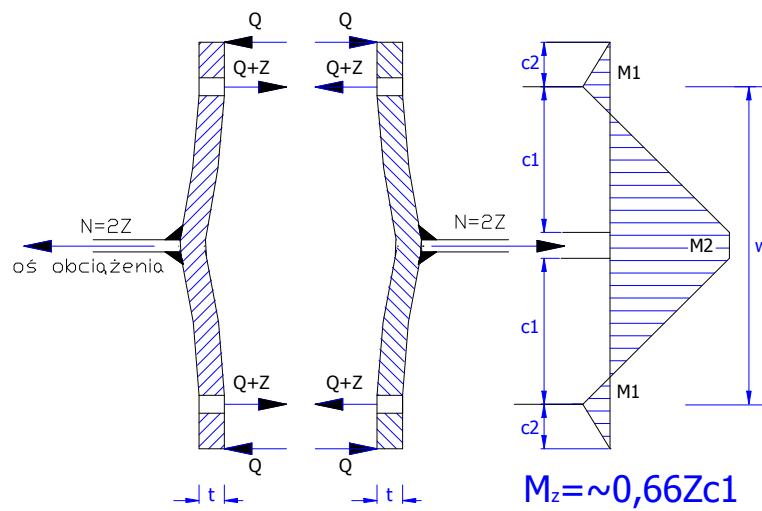
Autorzy niniejszego opracowania zdają sobie sprawę z wycinkowej analizy problemu połączeń semi-rigid i obecnie pracują nad rozszerzeniem analizy połączeń na połączenia o większej komplikacji (zagęszczenie śrub, analiza spoin) oraz nad analizą połączeń doczołowych zginanych.

## Literatura

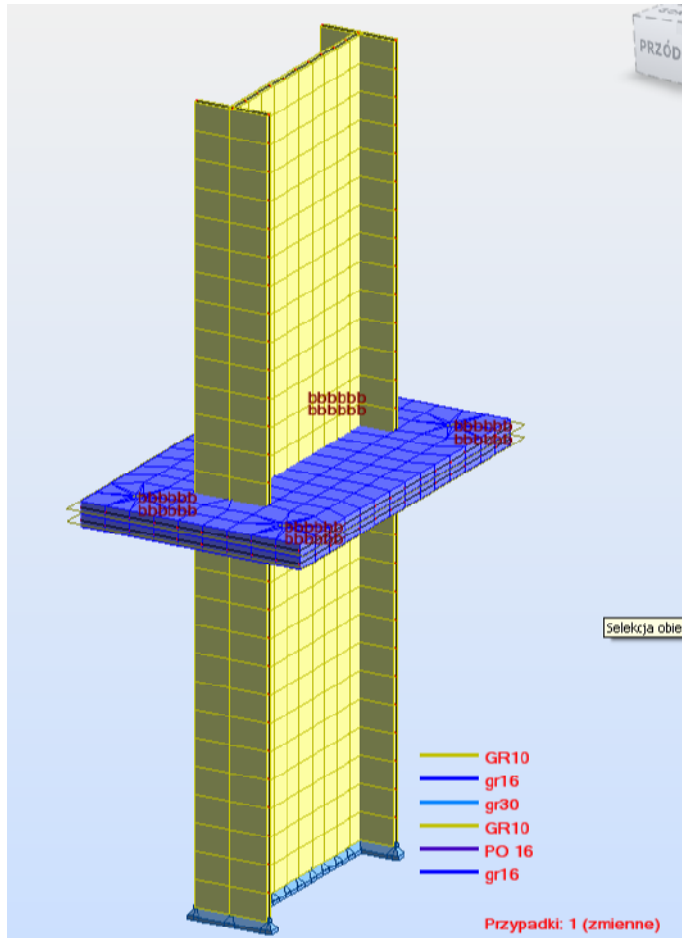
- [1] ŻÓŁTOWSKI W., FILIPOWICZ A., ŁUBIŃSKI M., *Konstrukcje Metalowe. Część 1. Podstawy projektowania*, Arkady 2000r.
- [2] BIEGUS A., *Połączenia śrubowe*, PWN 1997r.
- [3] DOMINIKOWSKI S., BOGACZ P., *Konstrukcje stalowe*, skrypt inedit 2005r.
- [4] MAREK, P., KRIVY V., *Reliability assessment of semi-rigid partial- strength steel joints and structures*, *Konstrukcje stalowe* 5 (63) 2003
- [5] PN-90/B-03200, *Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie*.
- [6] prEN 1993-1-1:2002, *Eurocode 3 Design of steel structures, part 1-1: General rules and rules for buildings CEN may 2002*.
- [7] PN-EN 1993-1-8:2006, *Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych - Część 1-8: Projektowanie węzłów*.



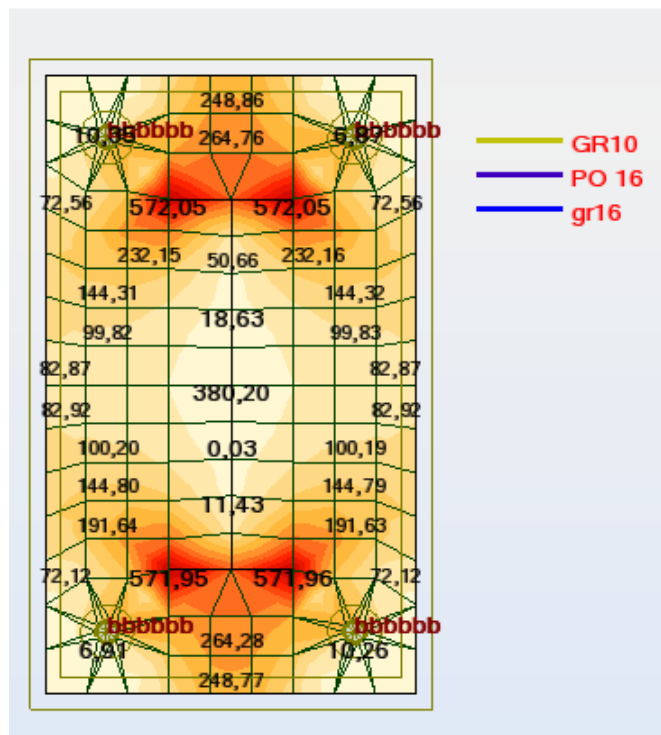
Rys. 1 Model blachy czołowej połączenia



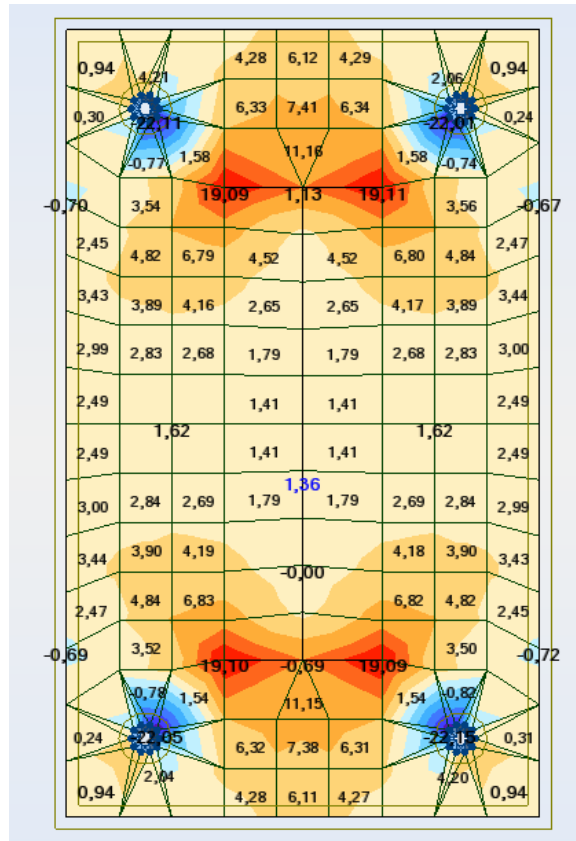
Rys. 2 Efekt dźwigni i wykres momentów na powierzchni blachy czołowej połączenia doczołowego [1]; [2]; [3]



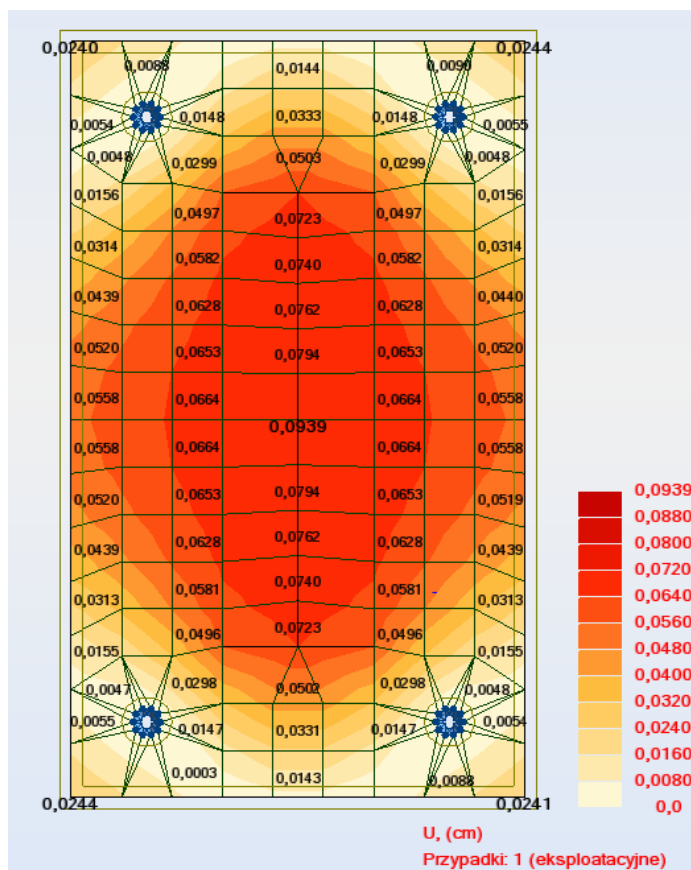
Rys. 3 Model komputerowy analizowanego połączenia



Rys. 4 Mapa naprężeń normalnych w górnych włóknach blach czołowych połączenia

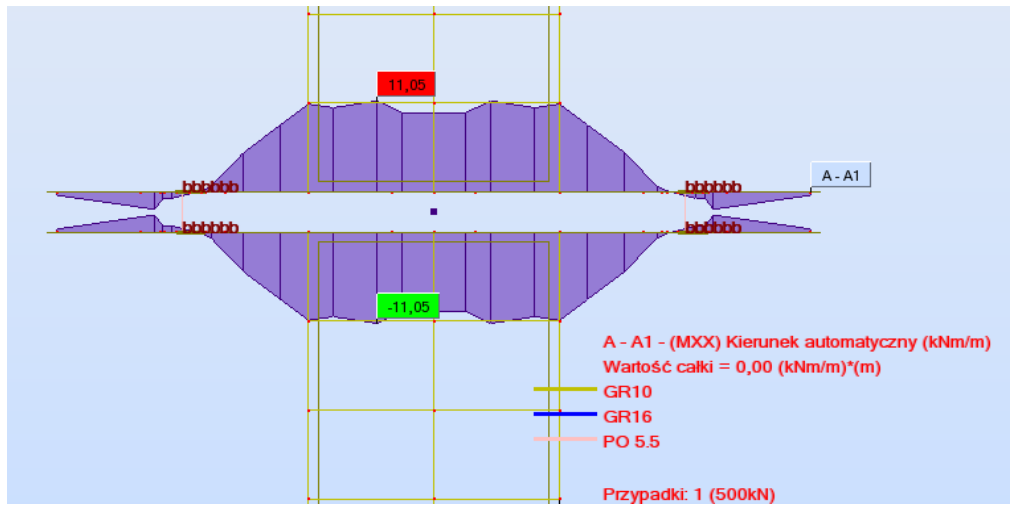


Rys. 5 Mapa momentów zginających w górnych włóknach blach czołowych połączenia

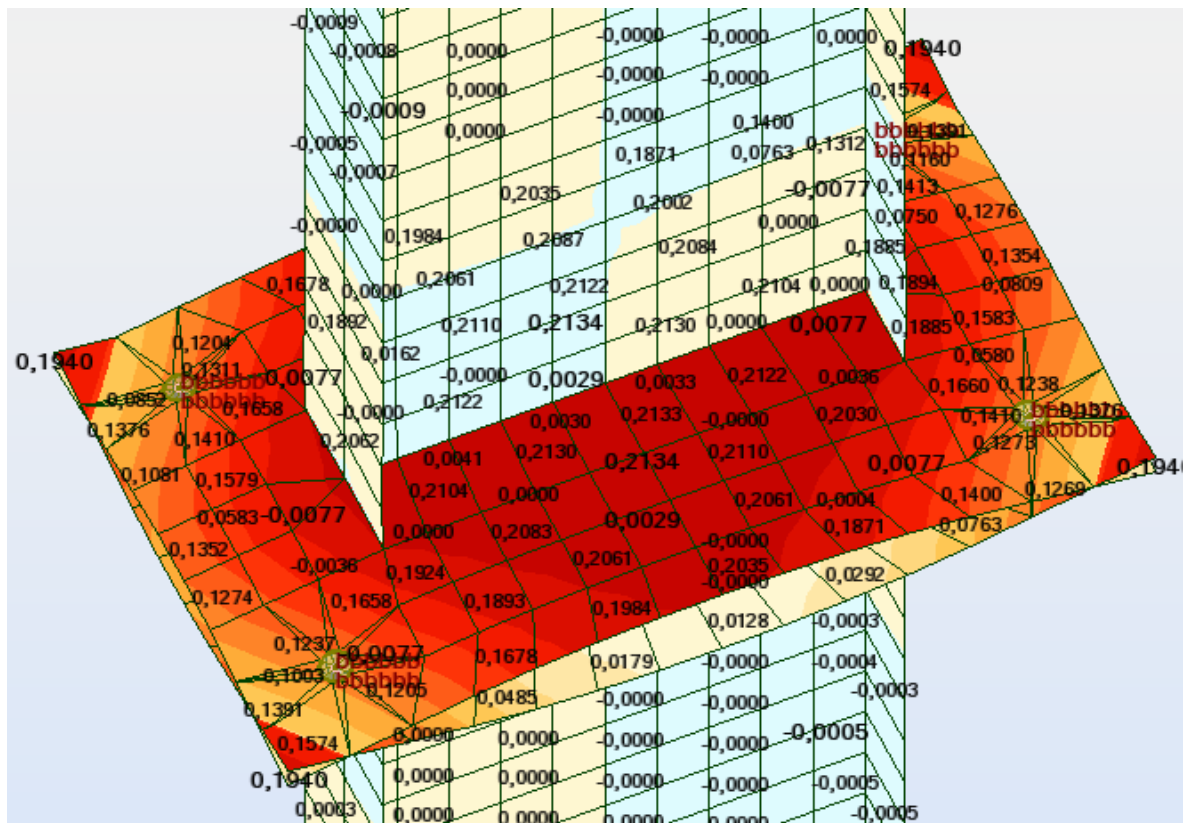


Rys. 6 Mapa przemieszczeń węzłów siatki MES blach czołowych połączenia

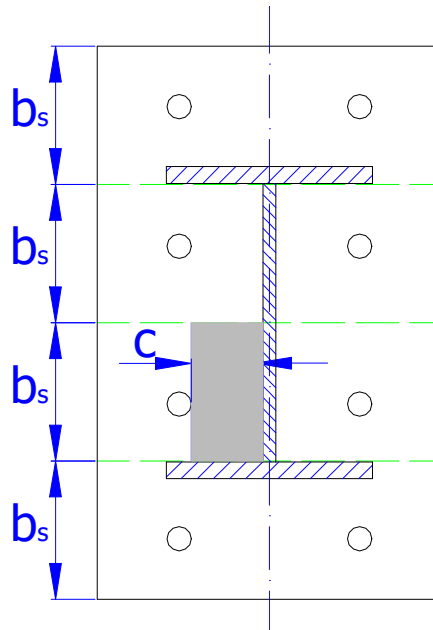




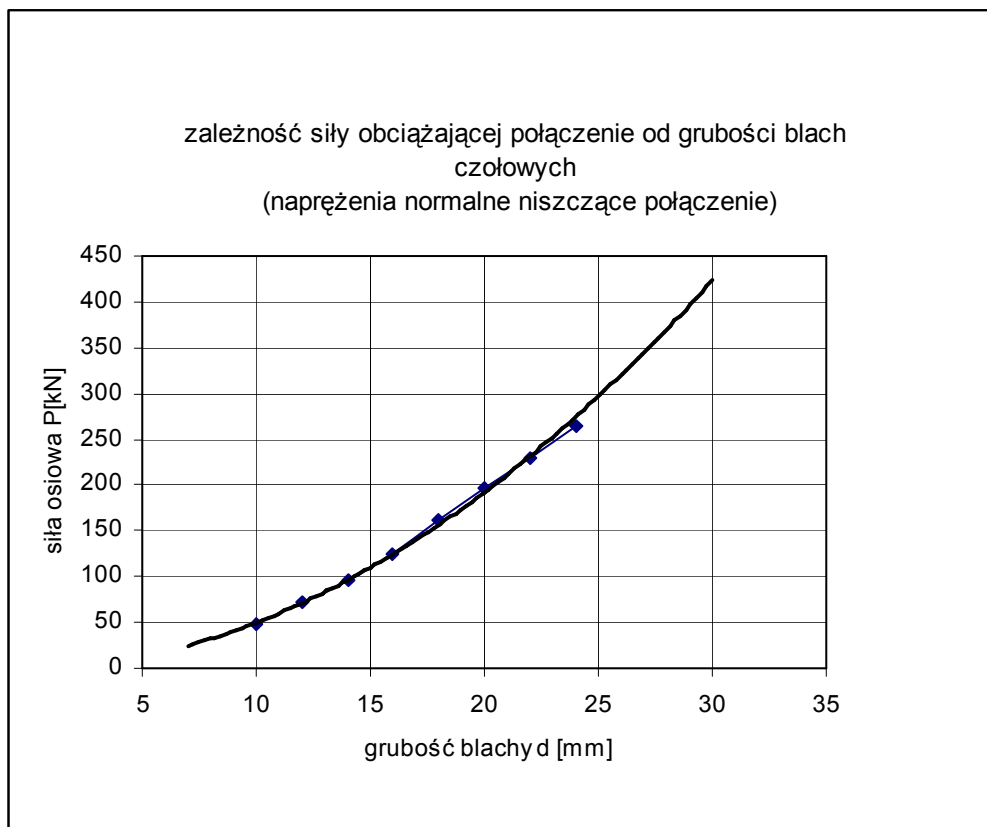
Rys. 7 Wykresy momentów zginających  $M_y$  na blachach czołowych połączenia



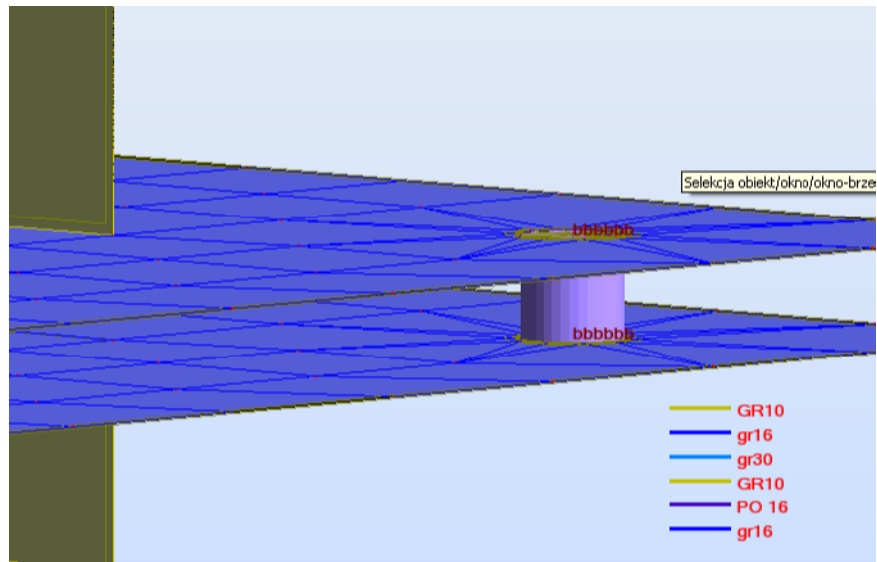
Rys. 8 Deformacja blach czołowych połączenia



Rys. 9 Szerokość współdziałania blachy  $b_s$  przypadająca na jedną śrubę oraz odległość  $c$  krawędzi otworu od wewnętrznej krawędzi spoiny [5], [3]



Rys. 10 Zależność siły osiowej w połączeniu od grubości blach czołowych połączenia, przy założeniu osiągnięcia w blachach czołowych naprężeń niszczących połączenie



*Rys. 11 Model połączenia śrubą blach czołowych; pręt  $\varnothing 16$ .  
Stal śruby symulująca stal śruby klasy 8.8*