

Józef PARCHAŃSKI<sup>1)</sup>, Dwayne DAVID<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Instytut Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej

<sup>2)</sup> Badacz niezależny

## SYMULACYJNE BADANIA NAPRĘŻEŃ W ŚRUBACH

**Streszczenie.** Przedstawiono symulacyjne badania rozłożenia naprężeń w określonych miejscach śruby M20x130, zrealizowane metodą elementów skończonych (MES), za pomocą programu PRO-MES 4.4. Przeprowadzono analizę wyników badań symulacyjnych.

## SIMULATION TESTS OF STRESS WITHIN BOLTS

**Summary.** The results of simulation tests of the stress present at definite points within an M20 x 130 bolt, conducted using the finite elements method (Polish abbreviation MES) and PRO-MES 4.4 software are presented in the paper. An analysis of these results is also presented hereafter.

### 1. SYMULACYJNE BADANIA NAPRĘŻEŃ W ŚRUBACH M12x60 ORAZ M20x130

#### 1.1. Wprowadzenie

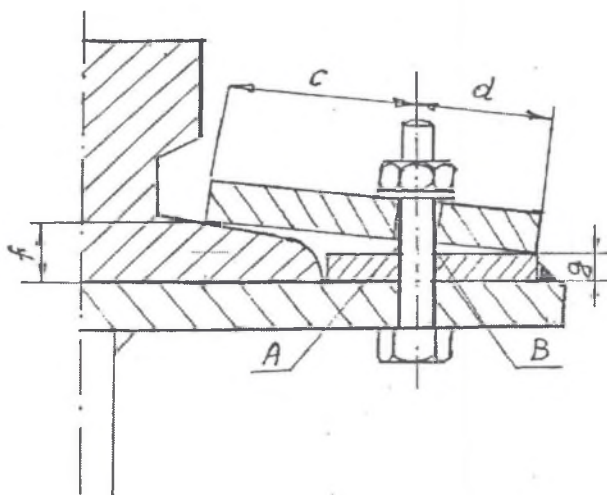
Celem badań jest określenie przyczyny rozrywania śrub M12x60 łączących konstrukcję magazynu karoserii samochodów, z konstrukcją dachu hali produkcyjnej. Problem dotyczy wyjaśnienia, czy konstrukcja dachu, do której podwieszono magazyn pustych karoserii samochodów osobowych nie zawali się, zwłaszcza zimą, gdy dach będzie jeszcze dodatkowo obciążony grubą warstwą śniegu.

Należy odpowiedzieć na pytanie, czy projektant lub wykonawca konstrukcji magazynu karoserii zastosował mało wytrzymałe śruby, czy też sztywność konstrukcji dachu jest za mała i jego nadmierne odkształcenie lokalne powoduje przeciążenie niektórych śrub M12x60, a w konsekwencji ich rozrywanie.

Z kolei śruby M20x130 zastosowano do zamocowania szyn jezdnych do podtorza suwnicy o udźwigu 40 ton. Zastanawia fakt, że maksymalna wartość siły działającej na śruby podczas przejazdu suwnicy jest ponad sześciokrotnie mniejsza niż znamionowa wytrzymałość śrub na rozciąganie. Stwierdzono za pomocą pomiarów, że przejazd suwnicy powoduje zmniejszenie siły rozrywającej poszczególne śruby. Mimo tego śruby ulegają rozrywaniu, a ich części

spadające z wysokości ok. 12 m stanowią zagrożenie dla zdrowia pracowników zatrudnionych na parterze.

Z oględzin miejsca zamocowania śrub wynika, że na większość śrub działają siły osiowe oraz zginające (rys. 1). Naprężenie rozciągające po stronie A śruby jest większe niż po stronie B, jeżeli grubość  $f > g$  i zależy od momentu, z jakim dokręcono nakrętkę śruby oraz od wartości  $c$  i  $d$ . Naprężenie po stronie A jest sumą naprężenia rozciągającego osiowego i naprężenia rozciągającego spowodowanego zginaniem śruby. Naprężenie po stronie B jest różnicą naprężenia rozciągającego osiowego i naprężenia ściskającego spowodowanego zginaniem śruby.



Rys. 1. Szkic śrubowego połączenia suwnicy – przed dokręceniem nakrętki

Fig. 1. Bolt connection of the overhead crane

Stwierdzono, że w normach [3, 4] podano dopuszczalne momenty dokręcania połączeń gwintowanych obciążonych statycznie, o gwintach normalnych oraz drobnozwojowych, o różnych klasach własności mechanicznych śrub i wkrętów, ale rozciąganych wyłącznie siłą osiową.

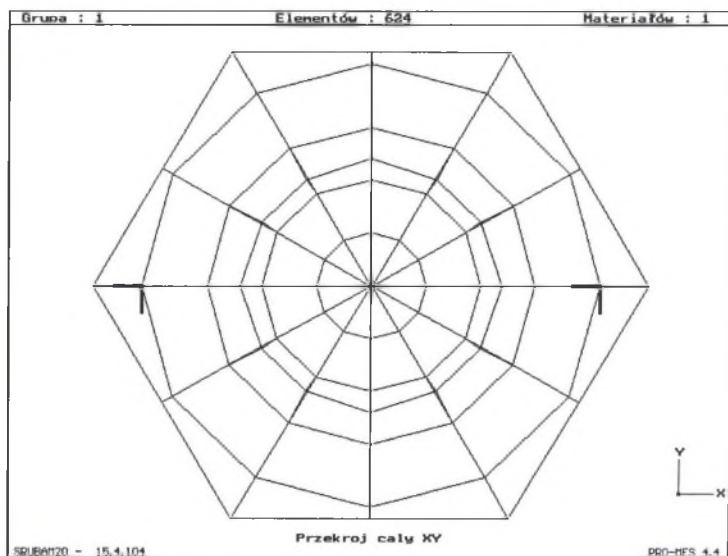
Aby określić przyczynę rozrywania ww. śrub, przeprowadzono symulacyjne badania naprężeń w całej objętości śrub w przypadku:

- śruby rozciąganej siłą osiową ( $\alpha = 0^\circ$ ),
- śruby rozciąganej siłą działającą pod kątem  $\alpha$  względem osi śruby (np.  $\alpha = 1, 2, 3, 4^\circ$ ).

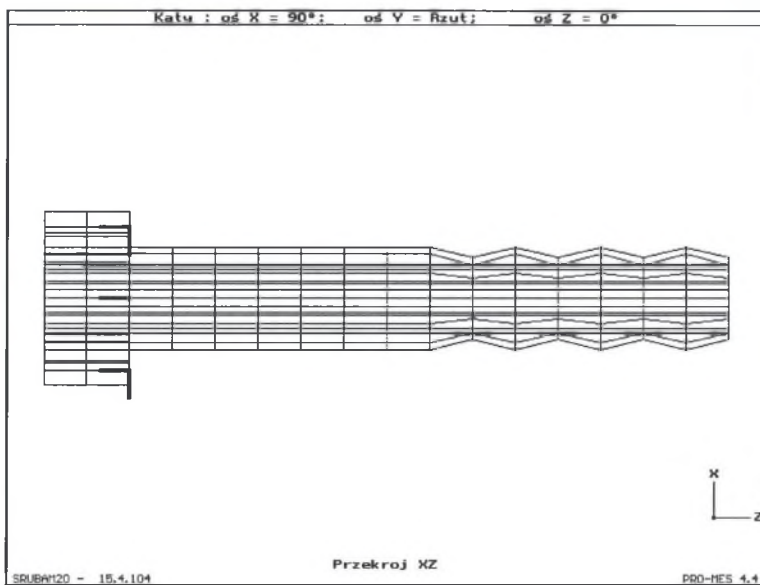
## 1.2. Dyskretny model śruby i wyniki obliczeń symulacyjnych

Walcową część śruby zamodelowano za pomocą trzech współosiowych rur (warstw) – rys. 2. Każdą rurę podzielono na 16 pierścieni (rys. 3), a każdy pierścień na 12 elementów (rys. 4) – razem  $3 \times 16 \times 12 = 576$  elementów. Łeb śruby zamodelowano za pomocą 4 pierścieni, a każdy pierścień podzielono na 12 elementów – razem  $4 \times 12 = 48$  elementów. Każdy element opisano za pomocą 8 węzłów (rys. 5). Ostatecznie dyskretny model śruby składa się z 624

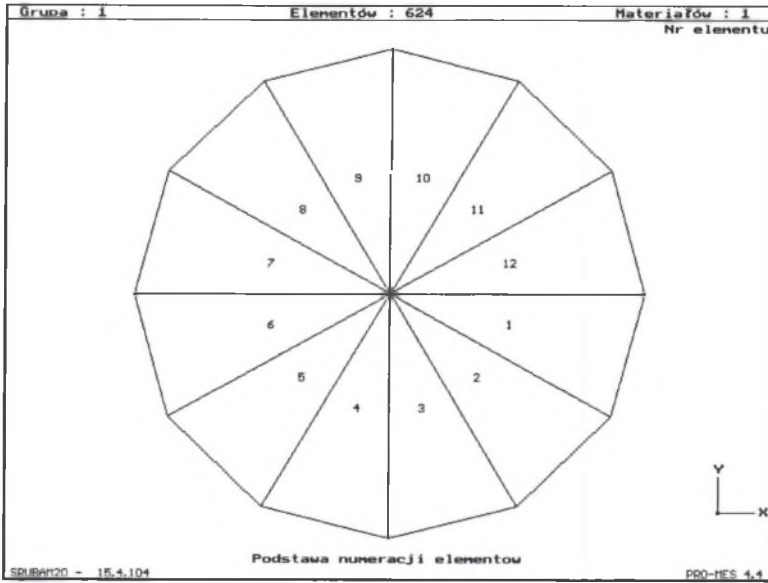
elementów oraz 888 węzłów. Układ węzłów u podstawy łba modelu śruby przedstawiono na rys. 6, a przestrzenny układ elementów i węzłów przedstawiono na rys. 7.



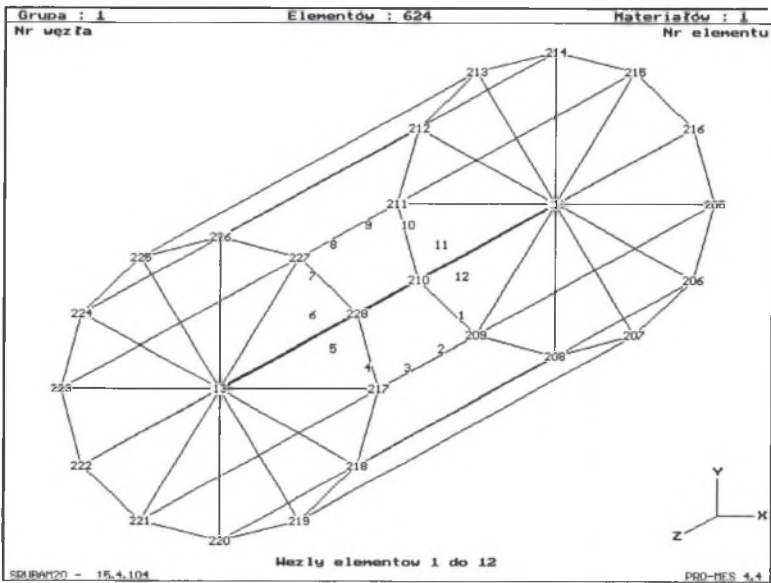
Rys. 2. Podział modelu śruby na rury (warstwy)  
Fig. 2. The subdivision of the bolt model into cylinder (layers)



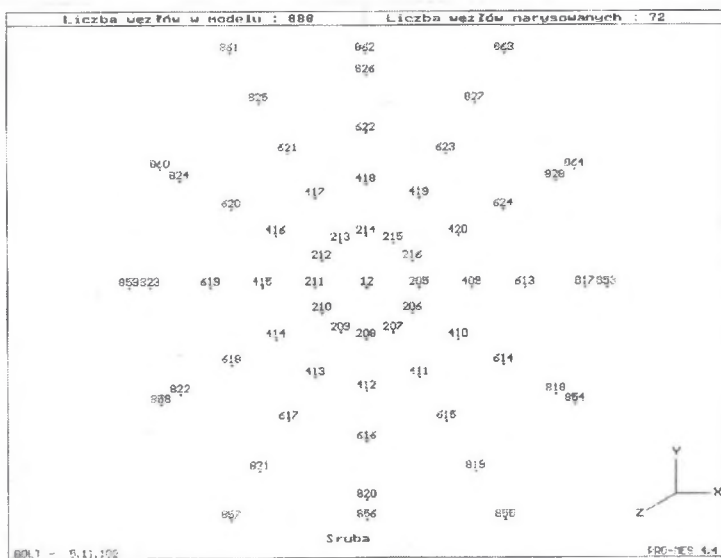
Rys. 3. Podział modelu śruby na 16 pierścieni  
Fig. 3. The subdivision of the bolt model into 16 rings



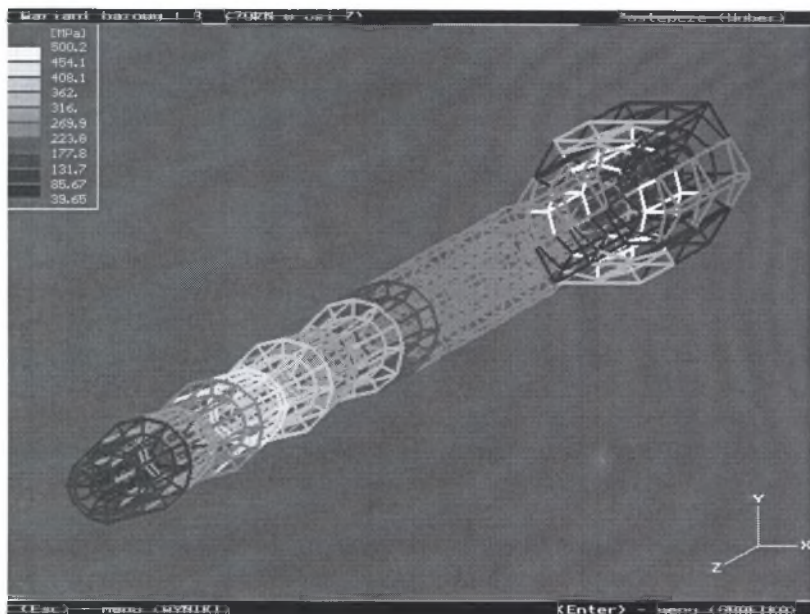
Rys. 4. Podział pierścieni na 12 elementów  
Fig. 4. The subdivision of the rings into 12 elements



Rys. 5. Opis elementów za pomocą węzłów  
Fig. 5. The forming of the elements by definition of the nodes



Rys. 6. Układ węzłów u podstawy łba modelu śruby  
 Fig. 6. The layout of the nodes AT the base of the model bolt head



Rys. 7. Przestrzenny układ elementów i węzłów modelu śruby  
 Fig. 7. The spatial layout of the elements and nodes of the screw model



Metodą elementów skończonych (MES), za pomocą programu PRO-MES 4.4, przy założeniu, że na śrubę np. M20x130 działa rozciągająca siła osiowa ( $\alpha = 0^\circ$ ), obliczono naprężenia na zewnętrznych ścianach rdzenia oraz poszczególnych rur (warstw):  $\sigma_x$  działające na śruby w kierunku osi X,  $\sigma_y$  w kierunku osi Y oraz  $\sigma_z$  działające wzdłuż śruby (oś Z). Następnie obliczono naprężenia  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  i  $\sigma_z$  przy założeniu, że siła rozciągająca działa na śrubę pod kątem  $\alpha = (1, 2, 3 \text{ i } 4^\circ)$  względem osi Z w płaszczyźnie XZ. Wybrane wykresy wartości naprężeń w funkcji długości śruby przedstawiono na rysunkach 8÷14.

Przy sile osiowej ( $\alpha = 0^\circ$ ) wartości naprężeń w poszczególnych przekrojach śruby są takie same w osiach: (+ X), (- X) oraz (+ Y) i (- Y) – rys. 8 oraz rys. 10. Przy sile działającej pod kątem  $\alpha > 0^\circ$  względem osi Z, np. w płaszczyźnie X-Z, wartości naprężeń  $\sigma_z$  rozciągające śrubę zgodnie z osią Z są inne, np. na zewnętrznej ścianie (+ X) – rys. 9a oraz rysunki 11a÷14a, a inne na ścianie (- X) – rys. 9b oraz 11b÷14b. W tym przypadku śruba jest rozciągana i równocześnie zginana. Oś Y jest w tym przypadku osią obojętną, więc naprężenia  $\sigma_z$  w osi ( $\pm Y$ ) są takie, jak przy kącie  $\alpha = 0^\circ$ . Ponieważ maksymalna wartość naprężenia na ścianie rdzenia nawet przy  $\alpha = 4^\circ$  nie przekracza 420 MPa, więc przedstawiono tylko dwa wykresy dla:  $\alpha = 0^\circ$  (rys. 8) i  $\alpha = 4^\circ$  (rys. 9). W miarę oddalania się od rdzenia śruby (+ x rosnące), naprężenie rozciągające na zewnętrznych ścianach poszczególnych rur (warstw) mają coraz większe wartości, ponieważ do rozciągającego naprężenia od osiowej składowej siły dodaje się rozciągające naprężenie spowodowane zginaniem śruby w płaszczyźnie X-Y.

Natomiast po stronie (- X) naprężenia rozciągające mają coraz mniejsze wartości, ponieważ od naprężenia rozciągającego od osiowej składowej siły odejmuje się naprężenie ściskające spowodowane zginaniem śruby. Maksymalne wartości naprężeń zarówno rozciągających, jak i ściskających występują przy łbie śruby. Przy kącie  $\alpha \geq 2^\circ$  naprężenie na zewnętrznej ścianie (- X) przy łbie śruby przyjmuje wartości ujemne, czyli jest naprężeniem ściskającym. Przy kącie  $\alpha = 2^\circ$  naprężenie na zewnętrznej ścianie (+ X) przy łbie śruby (element 409) ma wartość 690 MPa. Przy  $\alpha = 3^\circ$  naprężenie wynosi aż 878 MPa, a przy  $\alpha = 4^\circ$  wyniosłoby 1020 MPa, gdyby śruba nie uległa rozerwaniu. Stwierdzono, że naprężenie w elemencie 409 można oszacować ze wzoru

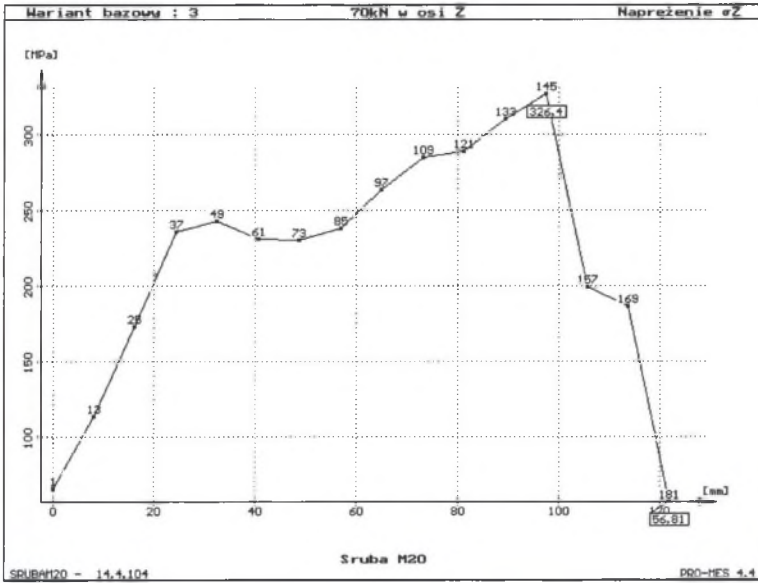
$$\sigma_\alpha = \sigma_0 (1 + 0,57 \alpha) \quad (1)$$

gdzie  $\sigma_0$ ,  $\sigma_\alpha$  są odpowiednio naprężeniami przy:  $\alpha = 0^\circ$  i  $\alpha > 0^\circ$ . Wykresy naprężeń  $\sigma_z$  na zewnętrznych ścianach modelu śruby M20x130 rozciąganej siłą 70 kN przedstawiono na wykresach: rys. 10 – siła działająca osiowo, a) ściana (+ x), b) ściana (- x); rysunki 11÷14 siła działająca pod kątem  $\alpha$  od osi Z w płaszczyźnie X-Z, a) ściana (+ x), b) ściana (- x): rys. 11 – kąt  $\alpha = 1^\circ$ , rys. 12 – kąt  $\alpha = 2^\circ$ , rys. 13 – kąt  $\alpha = 3^\circ$  oraz rys. 14 – kąt  $\alpha = 4^\circ$ .

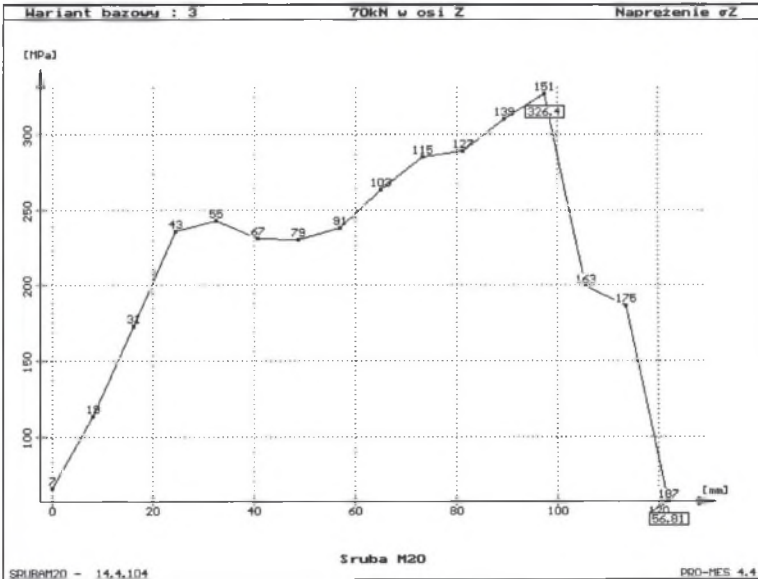
Obliczono również naprężenie rozciągające  $\sigma_z$  działające w kierunku osi śruby (oś Z) dla  $\alpha = 0^\circ$  oraz dla  $\alpha = 1, 2, 3 \text{ i } 4^\circ$ , w funkcji osi X i Y. Wybrane wykresy naprężeń działających przy łbie śruby, w połowie długości śruby oraz na końcu obciążenia śruby (nakrętka) przedstawiono na rysunkach 15÷19.

Podczas działania siły osiowej ( $\alpha = 0^\circ$ ), wykresy naprężeń  $\sigma_z$  w osiach X oraz Y są jednakowe w przekrojach na poszczególnych długościach modelu śruby – porównaj wykresy na rysunkach: 15a z 15b, 16a z 16b oraz 18a z 18b. Natomiast przy sile nieosiowej działającej pod kątem  $\alpha$  od osi Z w płaszczyźnie np. X-Z, naprężenie  $\sigma_z$  na osi X znacząco różni się od naprężenia na osi Y – porównaj wykresy na rysunkach: 17a z 17b ( w połowie długości śruby) oraz 19a z 19b (w 15 pierścieniu śruby - nakrętka).

a)



b)



Rys. 8. Naprężenie  $\sigma_z$  na zewnętrznej ścianie rdzenia modelu śruby, siła 70 kN, osiowa ( $\alpha = 0^\circ$ ): a) ściana (+ x), b) ściana (- x)

Fig. 8. The  $\sigma_z$  stress on the outer wall of the bolt model core, a 70 kN axial force ( $\alpha = 0^\circ$ ): a) the (+x) wall, b) the (-x) wall

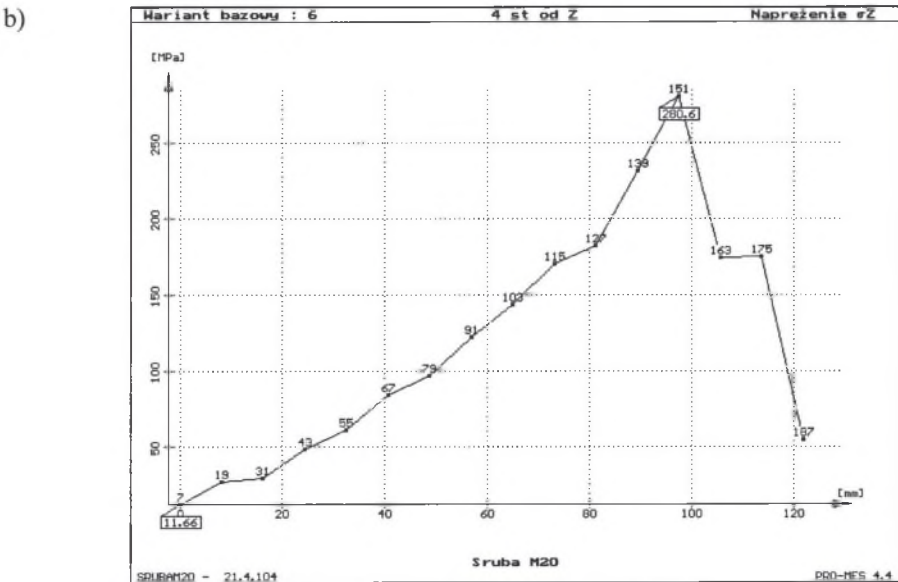
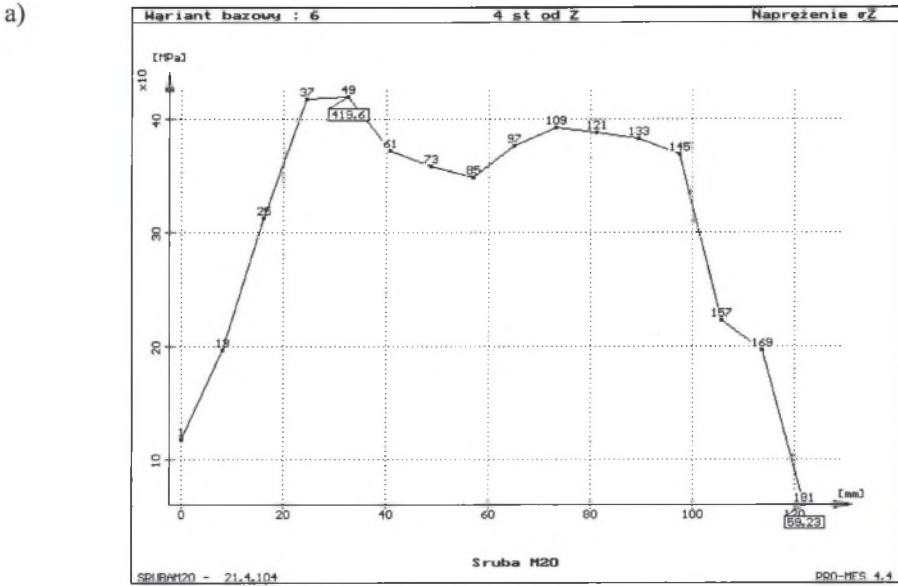


Fig. 9. Naprężenie  $\sigma_Z$  na zewnętrznej ścianie rdzenia modelu śruby, siła 70 kN, kąt  $\alpha = 4^\circ$ :

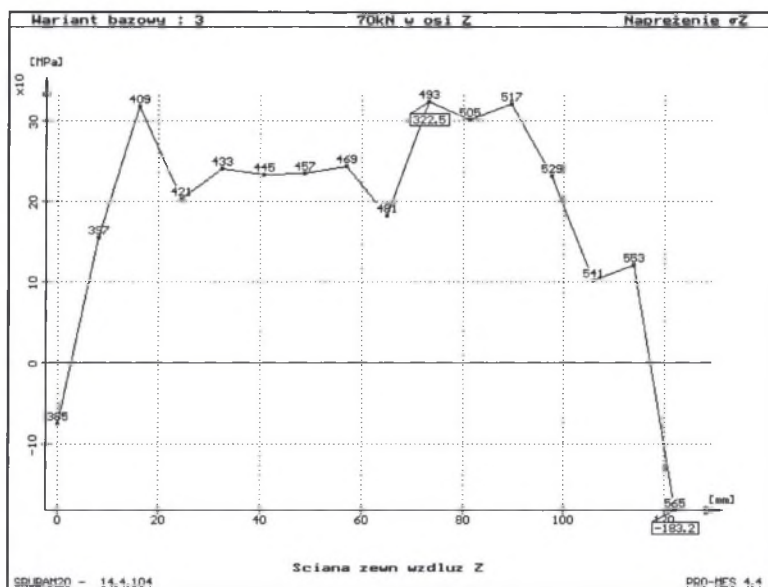
a) ściana (+ x), b) ściana (- x)

Fig. 9. The  $\sigma_Z$  stress on the outer wall of the bolt model core, a 70 kN force at an angle  $\alpha = 4^\circ$ :

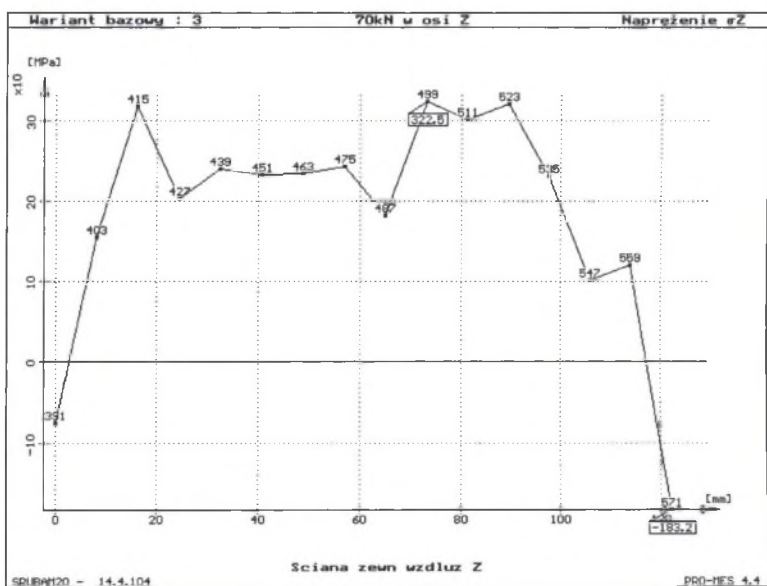
a) the (+x) wall, b) the (-x) wall



a)



b)

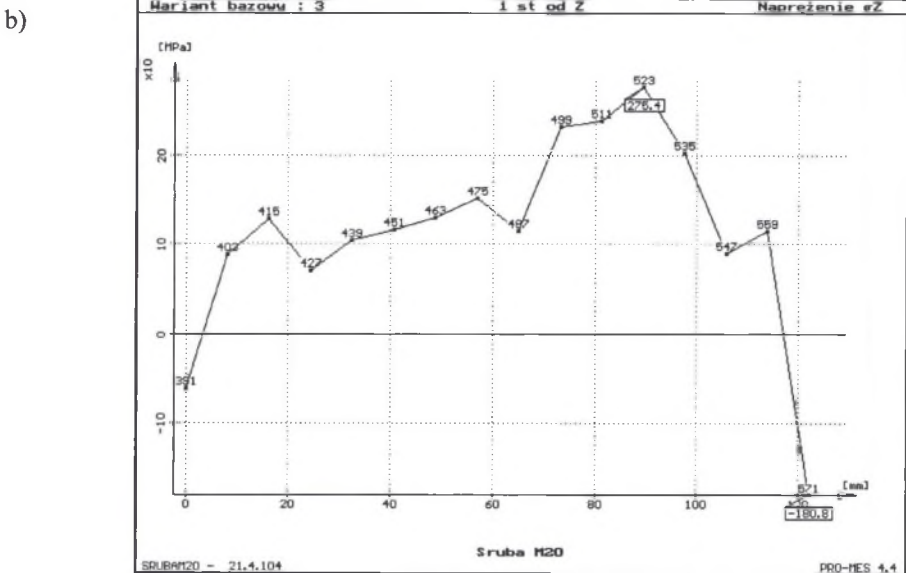
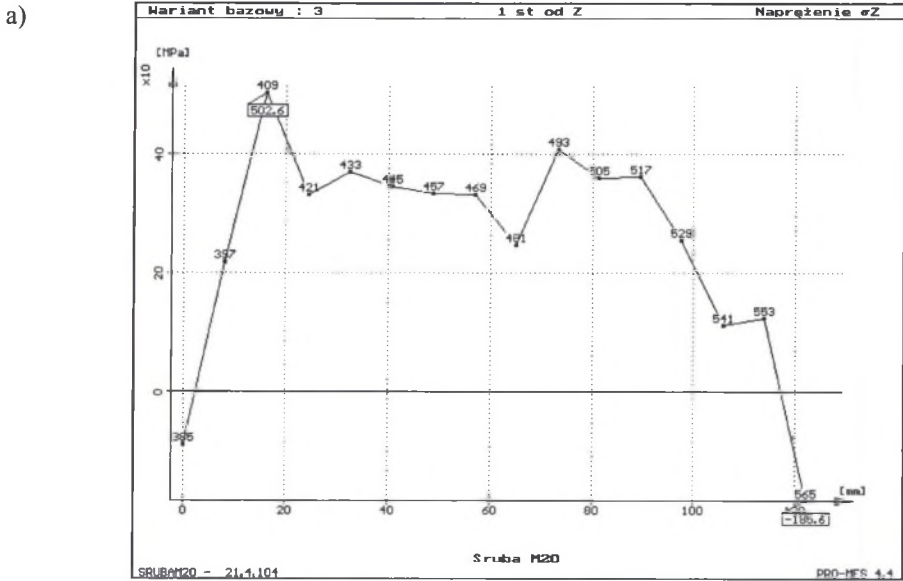


Rys. 10. Naprężenie  $\sigma_z$  na zewnętrznej ścianie modelu śruby, siła 70 kN, osiowa ( $\alpha = 0^\circ$ ):

a) ściana (+ x), b) ściana (- x)

Fig. 10. The  $\sigma_z$  stress on the outer wall of the bolt model core, a 70 kN axial force ( $\alpha = 0^\circ$ ):

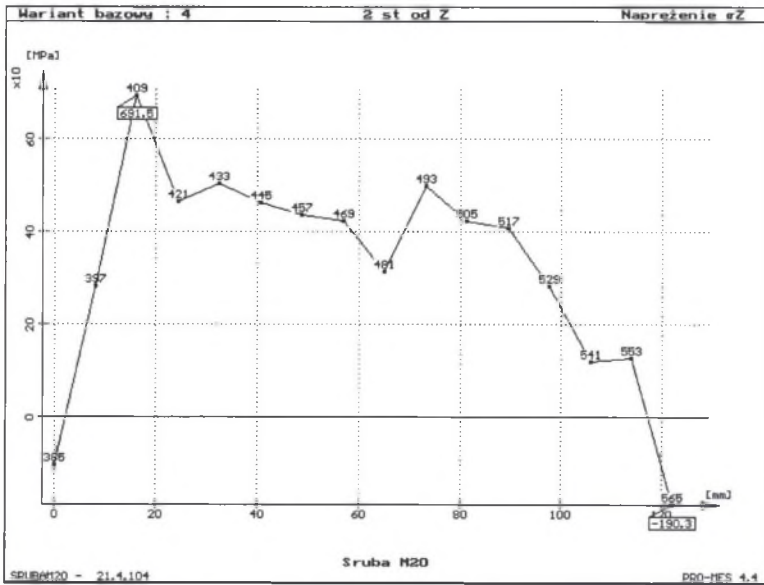
a) the (+x) wall, b) the (-x) wall



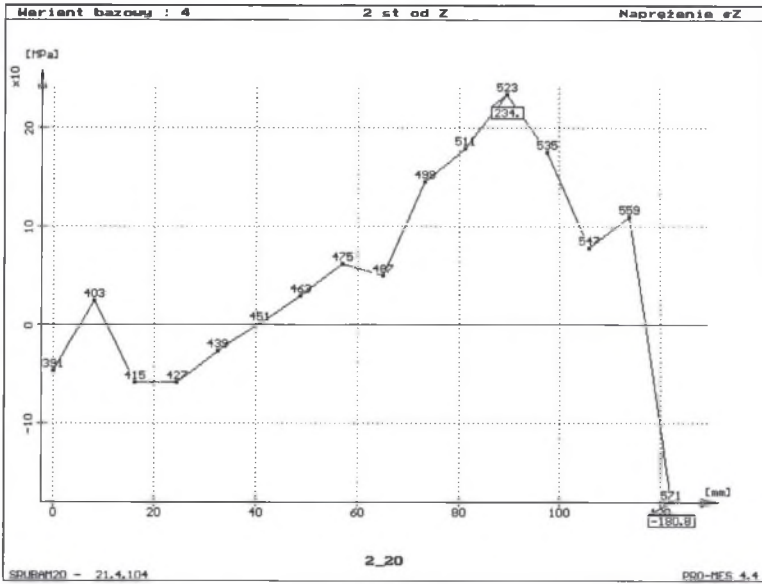
Rys. 11. Naprężenie  $\sigma_Z$  na zewnętrznej ścianie modelu śruby, siła 70 kN, kąt  $\alpha = 1^\circ$ :  
 a) ściana (+ x), b) ściana (- x)

Fig. 11. The  $\sigma_Z$  stress on the outer wall of the bolt model core, a 70 kN force at an angle  $\alpha = 1^\circ$ : a) the (+x) wall, b) the (-x) wall

a)



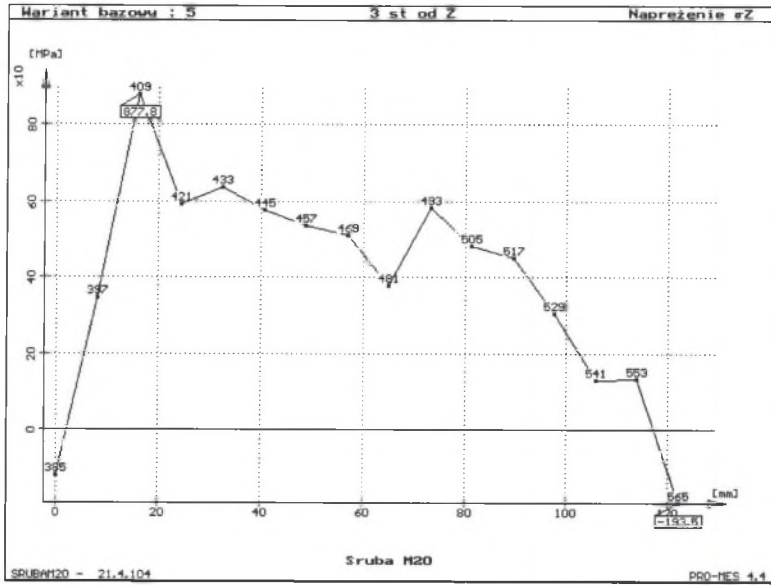
b)

Rys.12. Naprężenie  $\sigma_Z$  na zewnętrznej ścianie modelu śruby, siła 70 kN, kąt  $\alpha = 2^\circ$ :

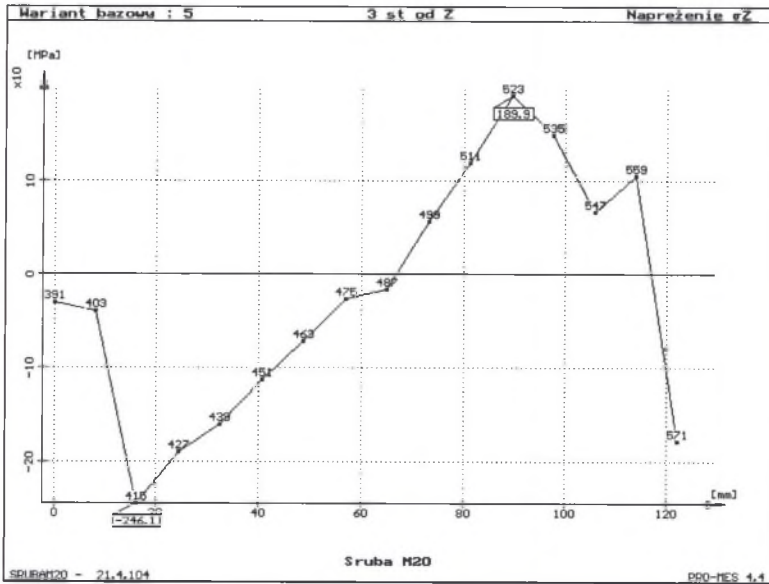
a) ściana (+ x), b) ściana (- x)

Fig. 12. The  $\sigma_Z$  stress on the outer wall of the bolt model core, a 70 kN force at an angle  $\alpha = 2^\circ$ : a) the (+x) wall, b) the (-x) wall

a)



b)

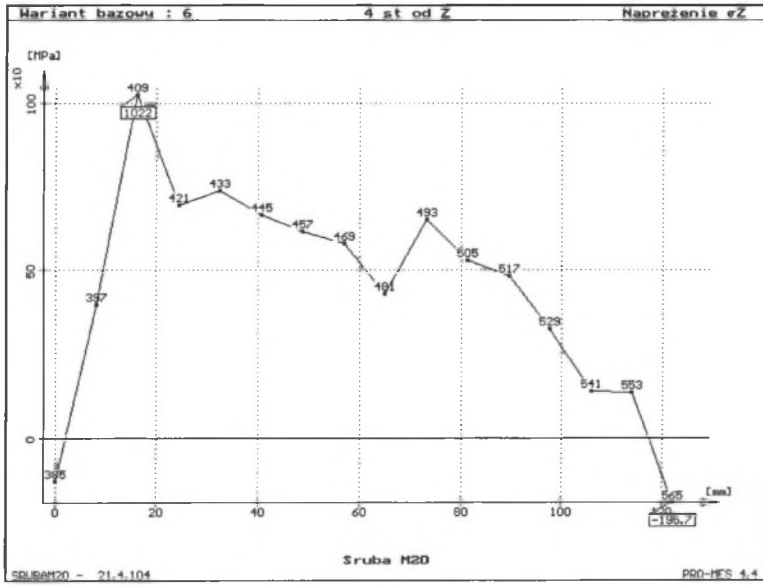


Rys. 13. Naprężenie  $\sigma_z$  na zewnętrznej ścianie modelu śruby, siła 70 kN, kąt  $\alpha = 3^\circ$ :

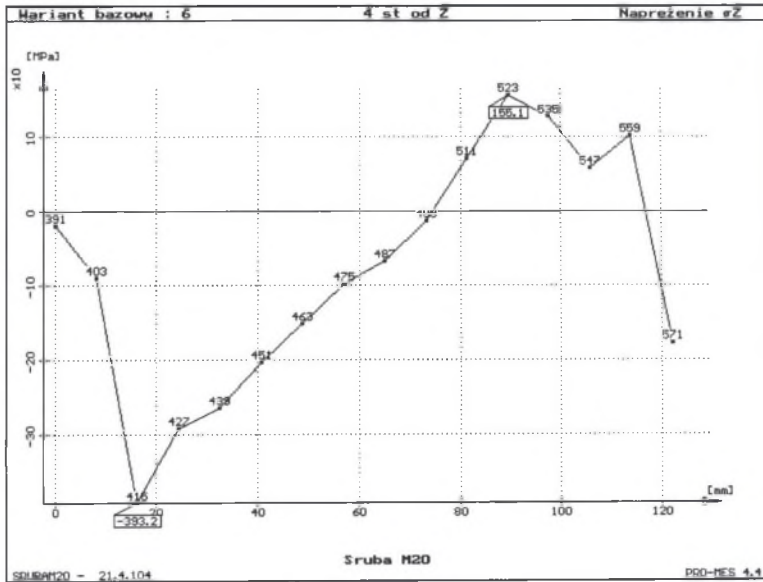
a) ściana (+x), b) ściana (-x)

Fig. 13. The  $\sigma_z$  stress on the outer wall of the bolt model core, a 70 kN force at an angle  $\alpha = 3^\circ$ : a) the (+x) wall, b) the (-x) wall

a)

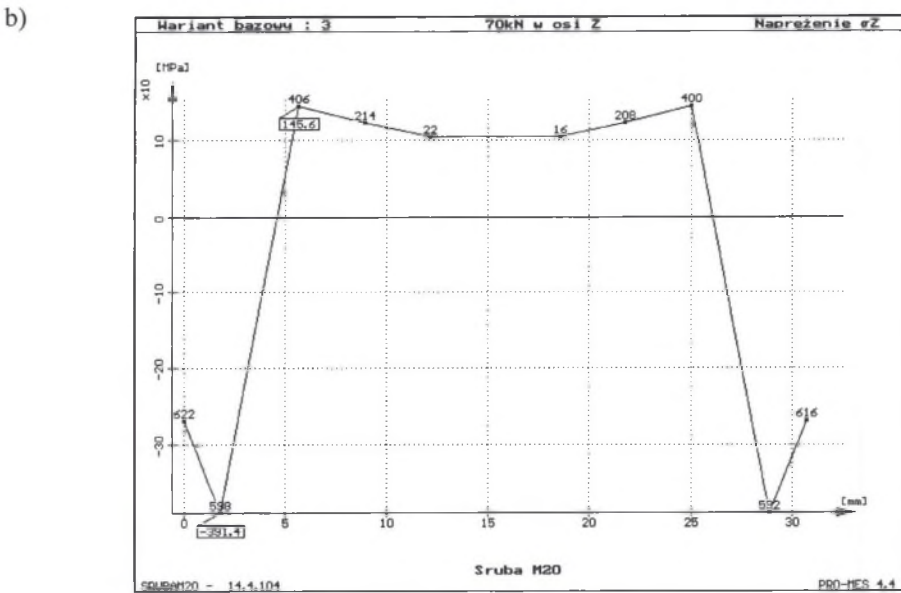
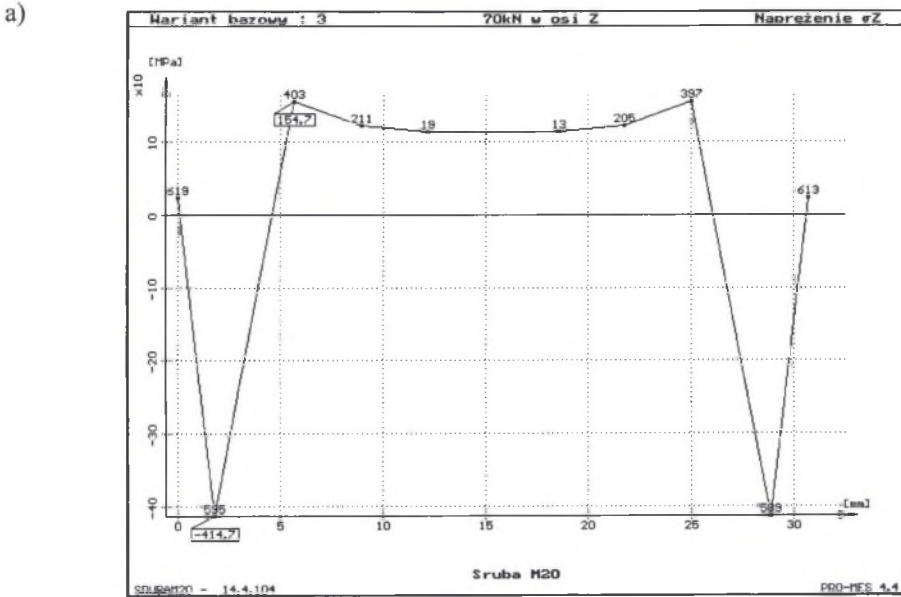


b)

Rys. 14. Naprężenie  $\sigma_Z$  na zewnętrznej ścianie modelu śruby, siła 70 kN, kąt  $\alpha = 4^\circ$ :

a) ściana (+ x), b) ściana (- x)

Fig. 14. The  $\sigma_Z$  stress on the outer wall of the bolt model core, a 70 kN force at an angle  $\alpha = 4^\circ$ : a) the (+x) wall, b) the (-x) wall



Rys. 15. Naprężenie  $\sigma_z$ , łeb modelu śruby (drugi pierścień), siła 70 kN, osiowa ( $\alpha = 0^\circ$ ):

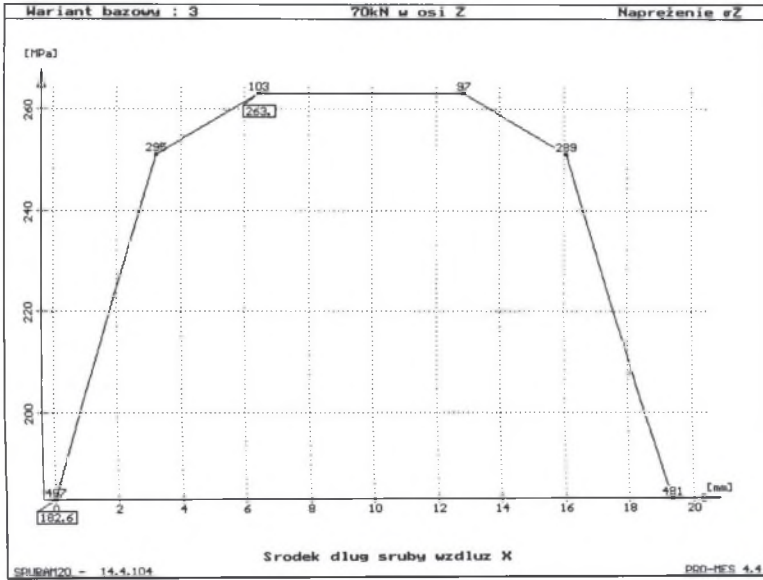
a) wzdłuż osi X, b) wzdłuż osi Y

Fig. 15. The  $\sigma_z$  stress on the bolt model head (second ring), a 70 kN axial force  $\alpha = 0^\circ$ :

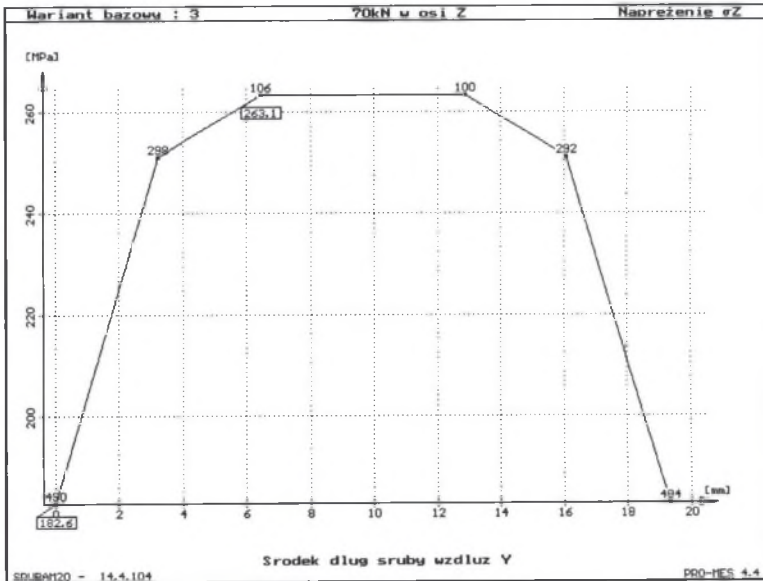
a) along the X axis, b) along the Y axis



a)



b)

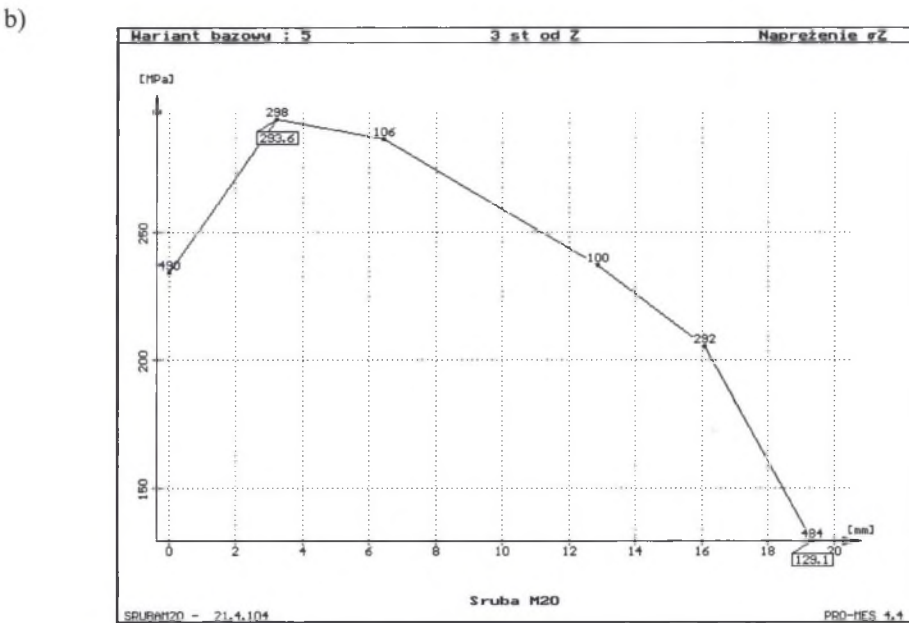
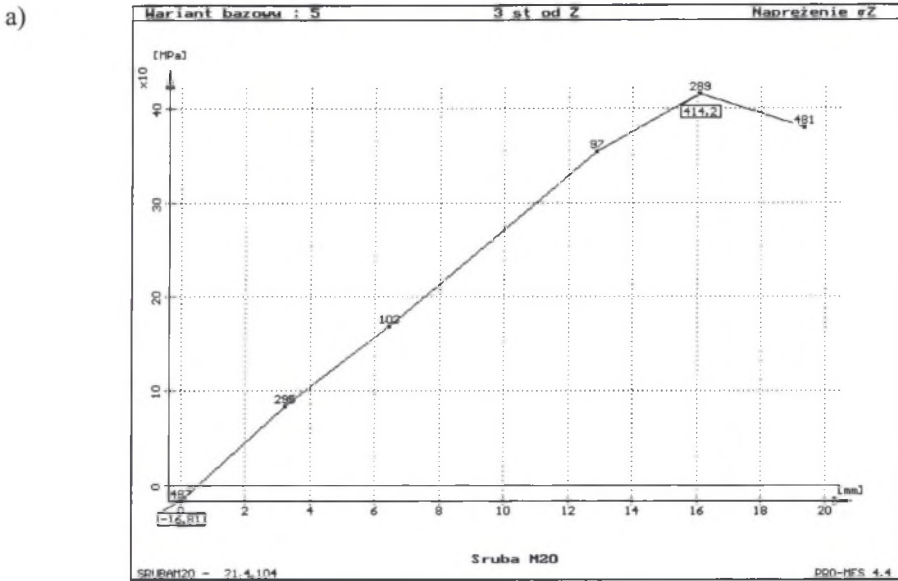


Rys. 16. Naprężenie  $\sigma_z$  w środku długości modelu śruby, siła 70 kN, osiowa ( $\alpha = 0^\circ$ ):

a) wzdłuż osi X, b) wzdłuż osi Y

Fig. 16. The  $\sigma_z$  stress in the middle of the bolt length (second ring), a 70 kN axial force  $\alpha = 0^\circ$ :

a) along the X axis, b) along the Y axis

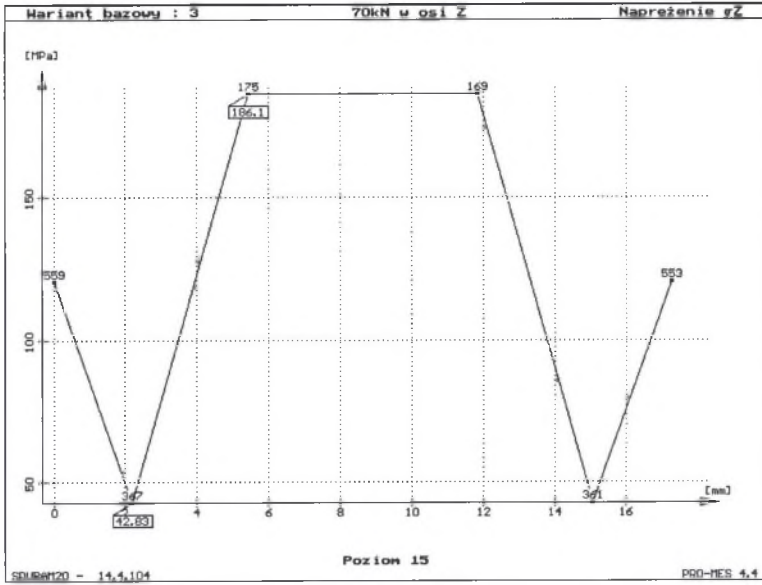


Rys. 17. Naprężenie  $\sigma_Z$  w środku długości modelu śruby, siła 70 kN, kąt  $\alpha = 4^\circ$ :

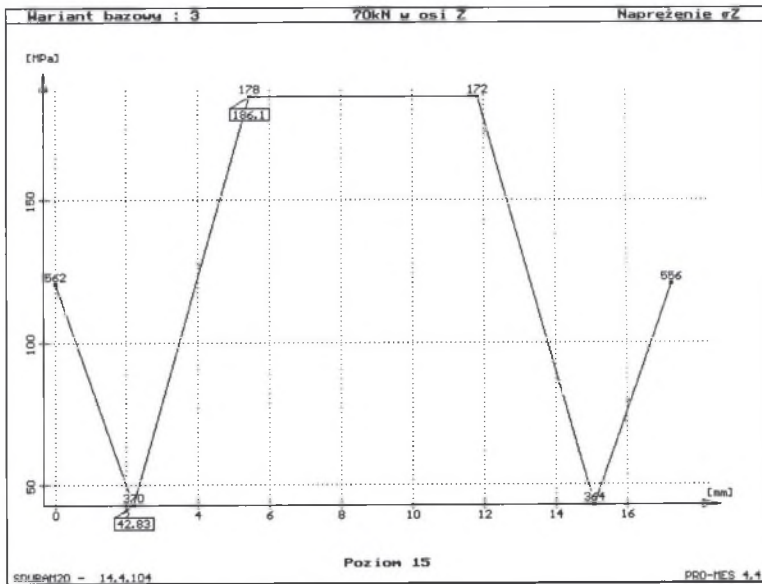
a) wzdłuż osi X, b) wzdłuż osi Y

Fig. 17. The  $\sigma_Z$  stress in the middle of the bolt length (second ring), a 70 kN force at an angle  $\alpha = 4^\circ$ : a) along the X axis, b) along the Y axis

a)



b)

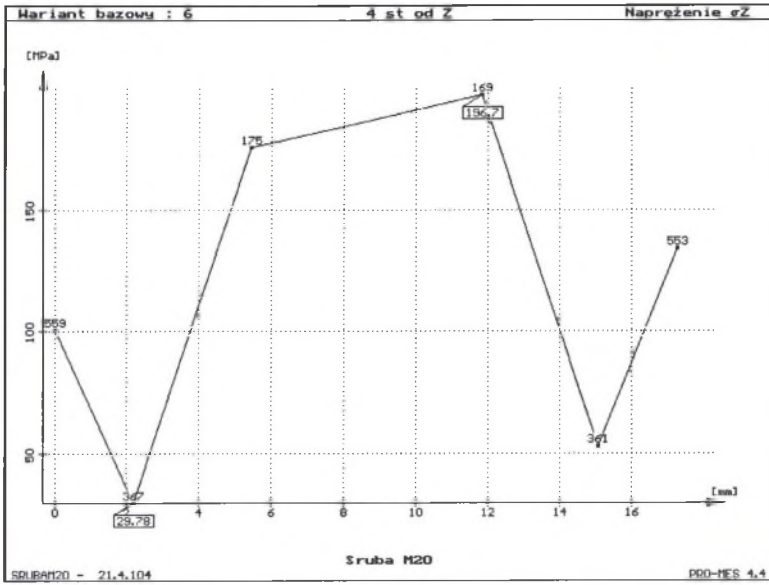
Rys. 18. Naprężenie  $\sigma_Z$  w pierścieniu 15 modelu śruby (nakrętka), siła 70 kN, osiowa ( $\alpha = 0^\circ$ ):

a) wzdłuż osi X, b) wzdłuż osi Y

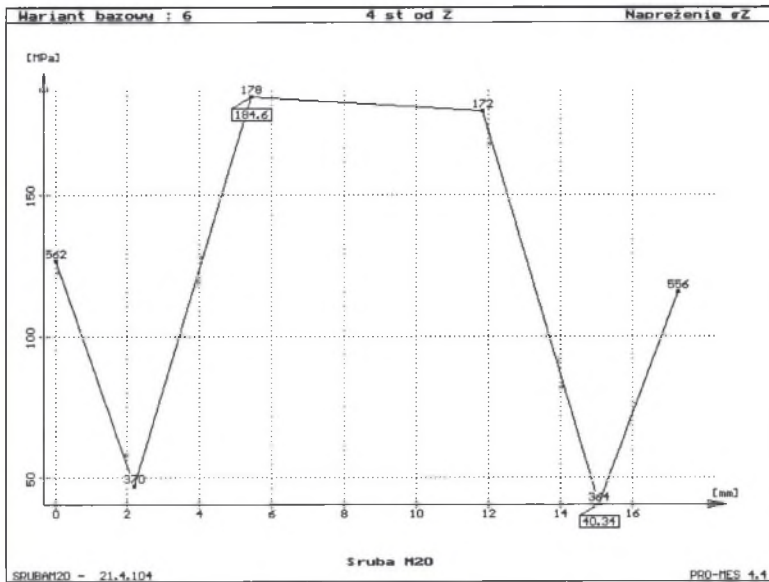
Fig. 18. The  $\sigma_Z$  stress in the 15<sup>th</sup> ring of the bolt model (nut), a 70 kN axial force  $\alpha = 0^\circ$ :

a) along the X axis, b) along the Y axis

a)



b)



Rys. 19. Naprężenie  $\sigma_Z$  w pierścieniu 15 modelu śruby (nakrętka), siła 70 kN, kąt  $\alpha = 4^\circ$ :  
 a) wzdłuż osi X, b) wzdłuż osi Y  
 Fig. 19. The  $\sigma_Z$  stress in the 15<sup>th</sup> ring of the bolt model (nut), a 70 kN force at an angle  $\alpha = 4^\circ$ :  
 a) along the X axis, b) along the Y axis

### 3. WNIOSKI

Z przeprowadzonych oględzin dużej liczby połączeń śrubowych wynika, że ok. 90% śrub jest obciążanych nieosiowo, tzn., że są rozciągane i równocześnie zginane (jak na rys. 1).

Z przeprowadzonych badań symulacyjnych wynika, że wartości naprężeń  $\sigma_x$  i  $\sigma_y$  są znacznie mniejsze niż naprężenia  $\sigma_z$  rozciągające śrubę w kierunku osi Z (oś śruby). Z rysunków 10÷14 wynika, że w przypadku siły działającej pod kątem  $\alpha > 0^\circ$  względem osi śruby (oś Z), np. w płaszczyźnie XZ, maksymalne naprężenia  $\sigma_z$  w funkcji osi X zarówno przy łbie śruby, jak również w połowie długości śruby mają znacznie większe wartości, niż przy rozciąganiu śruby siłą osiową o tej samej wartości. Stąd wniosek, że w przypadku gdy śruba jest rozciągana siłą nieosiową, może ulec rozerwaniu nawet wówczas, gdy nakrętka jest dokręcona momentem mniejszym niż podanym w odpowiedniej normie i obciążona siłą nieosiową mniejszą niż znamionowa wartość siły podanej przez producenta śrub dla konkretnego typu śruby. Należy zawsze stosować podkładki pod nakrętki lub łby o takich kształtach, aby śruby były zawsze rozciągane tylko siłą osiową (bez zginania). Uwzględnić należy też fakt zmniejszania się dynamicznej wytrzymałości materiału śrub w miarę zwiększania się liczby zmiennych naprężeń działających w śrubach (teoria Wöhlera).

Celem doświadczalnej weryfikacji wyników badań symulacyjnych aktualnie jest wykonywany unikatowy przetwornik umożliwiający pomiary naprężeń w wybranych miejscach na zewnętrznych powierzchniach śrub M20x130.

### LITERATURA

1. Poradnik inżyniera. Matematyka, t. 2. WNT, Warszawa 1987.
2. Grajek K.: PRO-MES 4.3. Przewodnik po systemie. Gliwice 1995.
3. PN-EN/20898-7; 1997 ISO 898-7. Właściwości mechaniczne części złącznych.
4. PN-82/M-82054.03+11. Śruby, wkręty i nakrętki.

### Abstract

Discret models of an M12 x 60 and M20 x 30 bolts were developed. The rod parts of the bolts were subdivided into 3 concentric cylinders (Fig. 2). Each cylinder was subdivided into 16 rings (Fig. 3), each consisting of 12 elements. The special layout of the elements and nodes is shown in Fig. 7. The  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  and  $\sigma_z$  stress distribution within the bolt models was determined using the finite elements method and PRO-MES 4.4 software using the assumption that 70kN forces were acting on the bolts at different angles, stretching it. The angles were  $0^\circ$ ,  $1^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $3^\circ$  and  $4^\circ$  off the Z axis, in the XZ plane.

Chosen stress distribution values are presented in the figures 8 – 14. The largest stress values, especially tensile stress values, occur on the outer surface of the rod part of the bolts, near the head, in the XZ plane. An analysis of the results obtained shows that in the case of non axial forces ( $\alpha > 0^\circ$ ), the bolts may be broken even when the nut is tightened to a lower torque and is stretched by a non axial force lower than the nominal tensile force listed in the standards [3, 4].

The tests also revealed that there is always the need to use specially shaped washers, which would ensure that the bolts were always loaded axially, without bending.

Wpłynęło do Redakcji dnia 14 kwietnia 2004 r.

Recenzent: Dr hab. inż. Adam Kowalczyk, prof. Pol. Rzeszowskiej