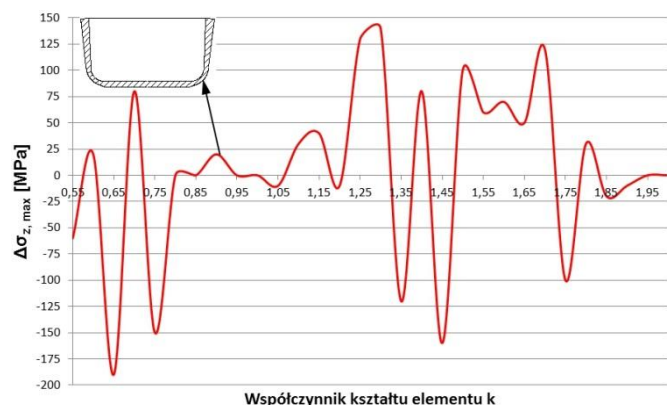
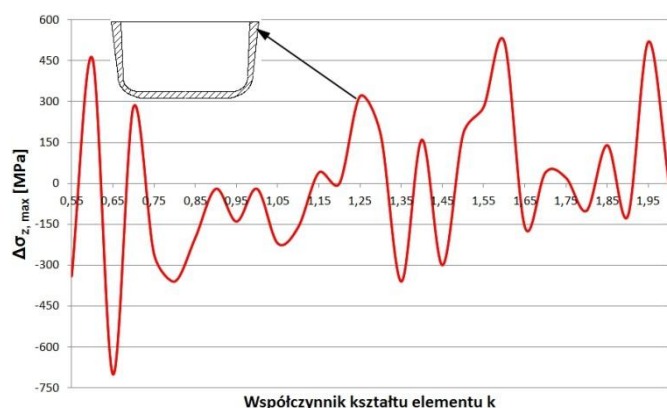




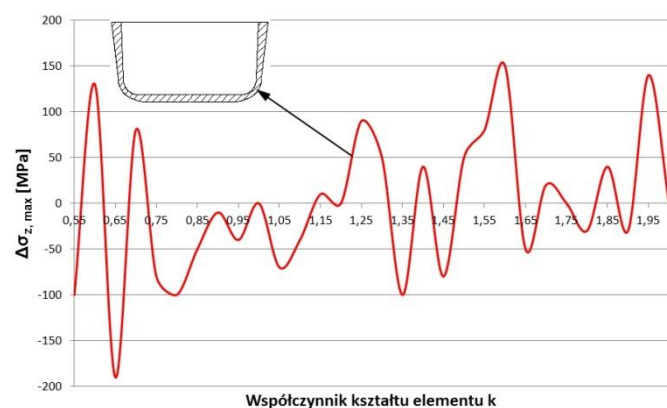
okrągłej krawędzi (rys. 5). Różniła się tylko wartościami. Podział na 3 elementy skończone na grubości blachy ma tą przewagę nad 2 elementami gdyż wierniej jest odtworzone naprężenie i odkształcenie wewnątrz blachy.



**Rys. 3.** Zależność  $\Delta\sigma_{z,max}$  na zaokrągleniu wytłoczki od współczynnika kształtu dla 2 elementów skończonych na grubości blachy

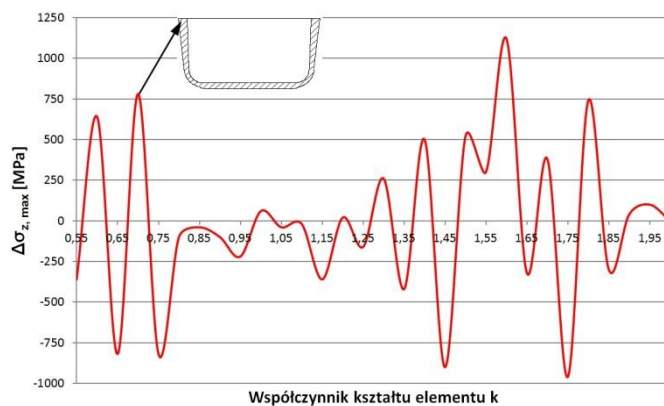


**Rys. 4.** Zależność  $\Delta\sigma_{z,max}$  na obrzeżu wytłoczki od współczynnika kształtu dla 3 elementów skończonych na grubości blachy

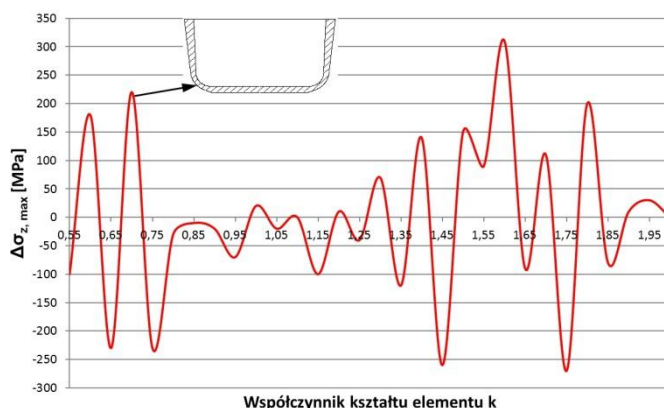


**Rys. 5.** Zależność  $\Delta\sigma_{z,max}$  na zaokrągleniu wytłoczki od współczynnika kształtu dla 3 elementów skończonych na grubości blachy

Przeprowadzono także analizę wrażliwości dla 4 elementów na grubości blachy. Wyniki z obrzeża przedstawiono na rysunku 6, natomiast wyniki z zaokrąglenia krawędzi na rysunku 7. Charakterystyki miały podobny przebieg jak dla 3 i 2 elementów na grubości blachy. W tym przypadku jednak nieliniowość była większa i występowała nawet w obszarze dla  $k = h/l \cong 1$ .



**Rys. 6.** Zależność  $\Delta\sigma_{z,max}$  na obrzeżu wytłoczki od współczynnika kształtu dla 4 elementów skończonych na grubości blachy

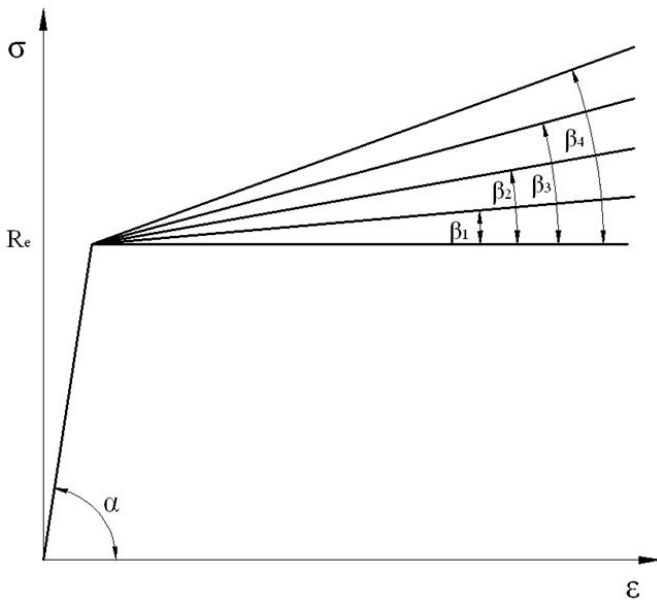


**Rys. 7.** Zależność  $\Delta\sigma_{z,max}$  na zaokrągleniu wytłoczki od współczynnika kształtu dla 4 elementów skończonych na grubości blachy

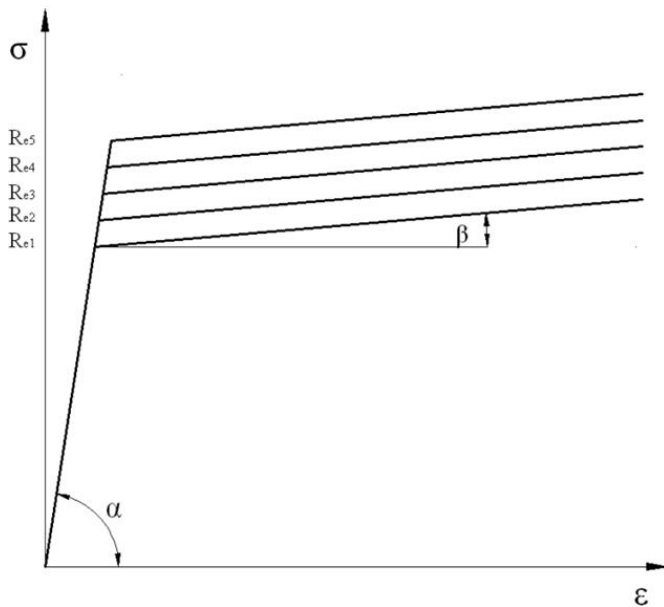
Z przeprowadzonych analiz wrażliwości można wywnioskować, że najlepsze rezultaty osiąga się dla elementów skończonych o współczynnika kształtu  $k = h/l \cong 1$  i dla 3 elementów na grubości blachy. Zwiększanie liczby elementów ponad tą wartość nie polepsza już wyników, a wprowadza większą nieliniowość w całym badanym przedziale oraz wydłuża czas obliczeń numerycznych.

## 2. OKREŚLENIE WPŁYWU WYBRANYCH PARAMETRÓW MATERIAŁOWYCH NA ZMIANĘ WARTOŚCI NAPRĘŻEŃ

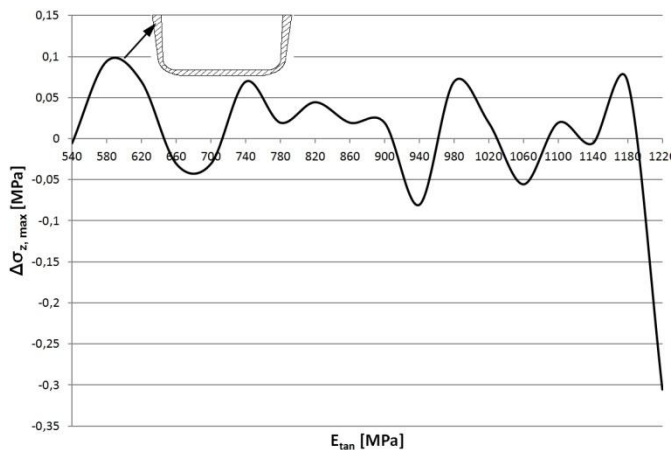
Dokładne wyznaczenie wartości współczynników materiałowych w modelu komputerowym ma kluczowe znaczenie na jakość uzyskanych obliczeń. Do określenia tego posłużono się analizą wrażliwości dwóch wybranych podstawowych parametrów charakteryzujących blachę: granicę plastyczności  $R_e$  i modułumocnienia  $E_{tan}$ . Analizy numeryczne przeprowadzono dla dwóch przypadków. Pierwszy przypadek ze stałą wartością granicy plastyczności  $R_e$  i zmienną wartością umocnienia  $E_{tan}$  (rys. 8), drugi przypadek dla stałej wartości umocnienia  $E_{tan}$  i zmiennej wartości granicy plastyczności  $R_e$  (rys. 9). W pierwszym przypadku przedział zmienności umocnienia zawierał się pomiędzy  $540 \div 1220$  [MPa]. W drugim przedział zmienności granicy plastyczności zawierał się pomiędzy  $120 \div 400$  [MPa]. Wszystkie analizy numeryczne przeprowadzono dla podziału grubości blachy na 3 elementy skończone przy współczynnika kształtu  $k = 1$  i dla stałej liczby elementów skończonych.



Rys. 8. Rodzaje krzywych umocnienia zastosowanych w analizie wrażliwości dla stałej wartości  $R_e$  i zmiennego umocnienia  $E_{tan}$

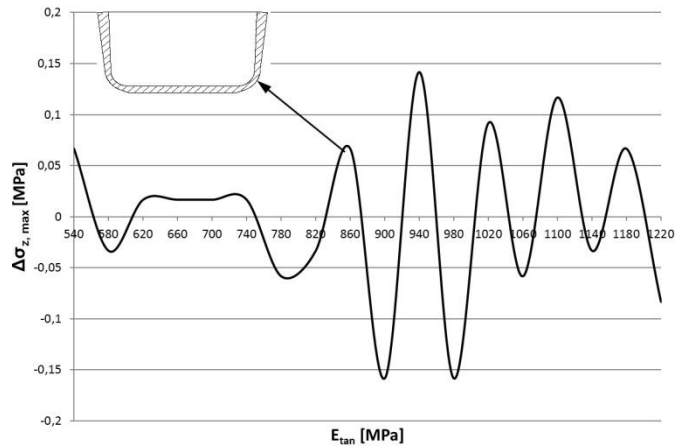


Rys. 9. Rodzaje krzywych umocnienia zastosowanych w analizie wrażliwości dla stałego umocnienia  $E_{tan}$  i zmiennej wartości  $R_e$

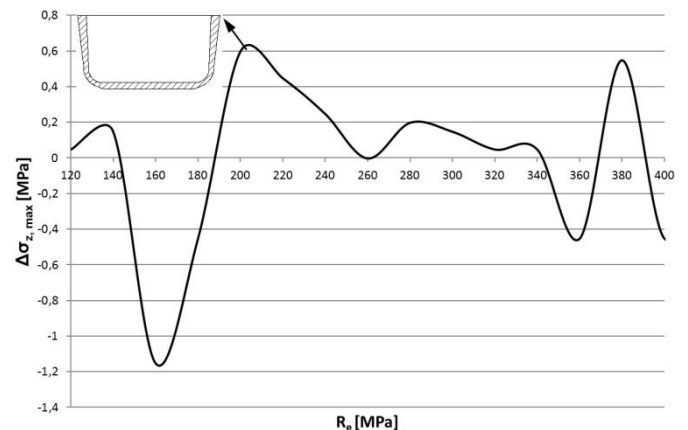


Rys. 10. Zależność stosunku  $\Delta\sigma_{z,max}$  na obrzeżu wtyłoczki od wartości modułu umocnienia

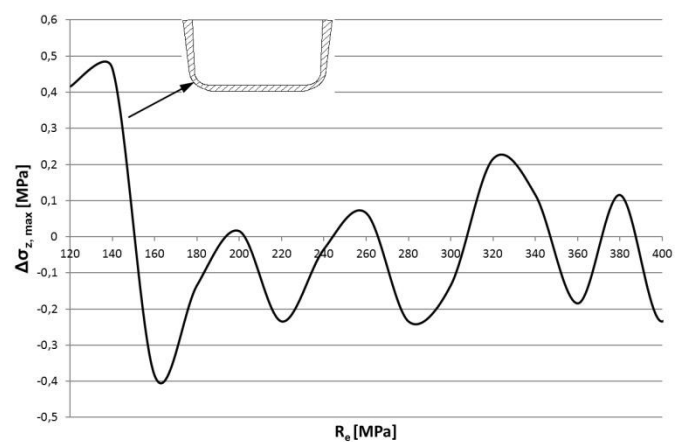
Na rysunku 10 przedstawiono wrażliwość  $\Delta\sigma_{z,max}$  na zmiany modułu umocnienia  $E_{tan}$ . Wartość  $\Delta\sigma_{z,max}$  jest bardzo mała, prawie w całym przedziale zmienności mieści się w zakresie  $-0,1 \div 0,1$ . Dopiero przy maksymalnej wartości umocnienia występuje spadek jej wartości do  $-0,3$ . Na rysunku 11 przedstawiono z kolei wrażliwość  $\Delta\sigma_{z,max}$  na zaokrąglonej krawędzi. W tym obszarze obiekt wykazuje większą wrażliwość powyżej wartości 820 [MPa], która mieści się w zakresie  $-0,16 \div 0,14$ .



Rys. 11. Zależność stosunku  $\Delta\sigma_{z,max}$  na zaokrąglonej krawędzi wtyłoczki od wartości modułu umocnienia



Rys. 12. Zależność stosunku  $\Delta\sigma_{z,max}$  na obrzeżu wtyłoczki od wartości granicy plastyczności



Rys. 13. Zależność stosunku  $\Delta\sigma_{z,max}$  na zaokrąglonej krawędzi wtyłoczki od wartości granicy plastyczności

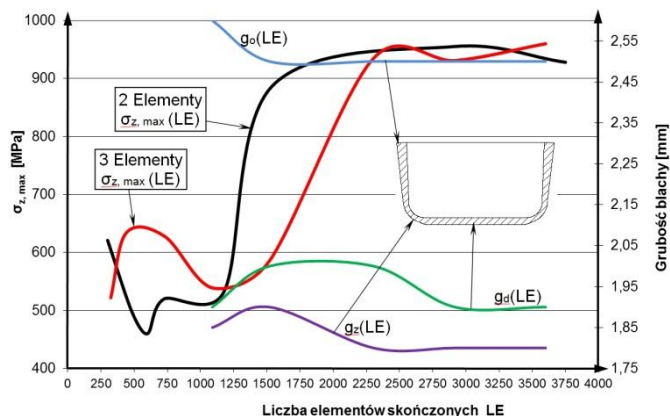
Wrażliwość obiektu na zmiany granicy plastyczności są większe niż dla zmian modułu umocnienia. Wartość  $\Delta\sigma_{z,max}$  w przypadku dla obrzeża zawierała się w przedziale  $-1,2 \div 0,6$  (rys. 12). Wykazywała pewną liniowość w przedziale  $240 \div 340$  [MPa]. Na zaokrąglonej krawędzi obiekt wykazywał mniejszą wrażliwość (rys. 13). W całym przedziale zmienności granicy plastyczności  $\Delta\sigma_{z,max}$  mieściło się bowiem w przedziale  $-0,4 \div 0,5$ .

### 3. NUMERYCZNA ANALIZA WPŁYWU LICZBY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH NA DOKŁADNOŚĆ WYNIKÓW W PROCESIE WYTŁACZANIA

W modelowaniu i symulacji procesu wytłaczania oprócz odpowiedniego doboru warunków technologicznych procesu, czyli: wartości średnic stempla i matrycy, promieni zaokrąglenia ich krawędzi roboczych, bardzo ważne jest dobranie odpowiedniej liczby elementów skończonych, na które zostaną podzielone narzędzia i blacha do wytłaczania. Liczba elementów skończonych wpływa nie tylko na dokładność wyników, ale także na czas obliczeń. Zbytne zwiększanie liczby elementów skończonych powoduje wydłużenie czasu obliczeń, przy czym wzrost ten następuje w postępie geometrycznym [Kald2007b]. Przy przekroczeniu granicznej liczby wzrost dokładności wyników naprężeń i odkształceń jest znikomy w stosunku do wzrostu czasu obliczeń. Celowe jest dlatego określenie minimalnej dopuszczalnej liczby elementów skończonych na blasze, przy której otrzymuje się poprawny wynik symulacji komputerowej. Narzędzia, czyli matryca i stempel będą miały stałą ich liczbę we wszystkich analizach. Porównane będą też wyniki ze względu na liczbę elementów na grubości blachy. Analizy zostaną przeprowadzone dla współczynnika kształtu  $k = 1$ .

Przeprowadzono kilkadziesiąt analiz numerycznych dla różnej liczby elementów skończonych na krążku. Liczba elementów skończonych wynosiła od 250 do 3750. Dodatkowo w celu usystematyzowania wyników analizy przeprowadzone były przy podziale grubości blachy na jeden dwa i trzy elementy.

Na rysunku 14 przedstawiono wykres zestawiający wszystkie wyniki symulacji maksymalnych wartości naprężeń z ostatniego kroku symulacji  $\sigma_{z,max}$ , czyli z finalnego wyrobu, w funkcji liczby elementów skończonych oraz wyniki pomiaru grubości blachy w kilku charakterystycznych miejscach wyrobu. Przy podziale grubości blachy na 1 element skończony nie uzyskano prawidłowych wyników, nawet dla największej liczby elementów około 3750. Blacha ulegała bardzo silnemu pofałdowaniu i w obszarze kontaktu narzędzie-przedmiot występowało bardzo duże wzajemne przenikanie się elementów skończonych, dlatego tych wyników nie zamieszczono na wykresie. Przy podziale grubości blachy na dwa elementy skończone możliwe było już uzyskanie prawidłowych wyników. Zastosowanie jednak zbyt małej liczby poniżej 1500 nie dawało jednoznacznych wyników maksymalnych wartości naprężeń (linia czarna na wykresie). Występowały ich duże rozbieżności, towarzyszyło temu także znaczące przenikanie się obiektów z powodu znacznych rozmiarów elementów. Zbyt duże elementy powodują niestabilność poprzez to, że algorytm wykrywający kontakt pomiędzy nimi jest mniej dokładny dla większych elementów. Mimo stabilności wyników wartości naprężeń powyżej 1500 elementów nie można było zmierzyć grubości blachy na obrzeżu, zaokrągleniu czy w dnie. Spowodowane było to zbyt znaczącą deformacją elementów skończonych by za pomocą naniesionej siatki o jednostkowym skoku 0,01 [mm] można było dokonać pomiaru.



Rys. 14. Dokładność wyników obliczeń w zależności od liczby elementów skończonych

Przy podziale blachy na trzy elementy skończone na grubości, stabilność wyników maksymalnych wartości naprężeń uzyskano przy ilości około 2500 elementów (linia czerwona na wykresie). Znacznie lepiej odwzorowane były też zmiany naprężeń w środku blachy. Pomiar grubości blachy w wytłoczce możliwy był przy zastosowaniu około 1000 elementów (linie: niebieska, zielona i fioletowa na wykresie). Wyniki te były jednak niedokładne i wykazywały duże rozbieżności w stosunku do analiz przeprowadzonych z większą ilością elementów. Szczególnie niestabilne były pomiary grubości blachy w dnie i na zaokrągleniu, czyli tam gdzie występują naprężenia rozciągające. Zastosowanie ponad 3000 elementów skończonych pozwoliło już dokonać precyzyjnego pomiaru grubości. Grubość blachy na obrzeżu wyniosła 2,5 [mm], na zaokrągleniu 1,8 [mm], natomiast w dnie wytłoczki 1,9 [mm]. W każdej z analiz w identyczny sposób przeprowadzono pomiar wysokości gotowego wyrobu. Stwierdzono, że liczba elementów nie ma wpływu na dokładność tego pomiaru. Jedynie dla podziału grubości blachy na jeden element pomiar ten nie był możliwy.

Przeprowadzone analizy porównawcze pozwoliły stwierdzić, że do symulacji procesu wytłaczania niezbędne jest zastosowanie, co najmniej trzech elementów skończonych na grubości blachy, aby otrzymać prawidłowe wyniki naprężeń w wytłoczce i dokonać pomiarów grubości blachy w charakterystycznych miejscach. Dodatkowo całkowita ilość elementów skończonych nie powinna być mniejsza niż około 3000. Należy podkreślić, że dotyczy to ćwiartki obiektu. Do zamodelowania całego obiektu trzeba by użyć ponad 12000 elementów. Celowe jest symulowanie tylko wycinka obiektu, nie tylko ze względu na kołową symetrię, ale także ze względu na krótszy czas obliczeń. W celu jeszcze dokładniejszych wyników naprężeń i odkształceń należałoby zwiększyć liczbę elementów na grubości blachy a także ich ogólną liczbę. Do pomiarów grubości blachy w wytłoczce lub jej wysokości nie jest to wymagane, gdyż nie zwiększa dokładności wyników, a wydłuża jedynie czas obliczeń.

### PODSUMOWANIE

Przeprowadzona analiza wrażliwości w procesie wytłaczania pokazuje na jakie problemy należy zwrócić szczególną uwagę, aby uzyskane wyniki numeryczne były zgodne z uzyskanymi z eksperymentu [5, 6, 7].

Dzięki zbadaniu wpływu współczynnika kształtu na  $\Delta\sigma_{z,max}$  określono wrażliwość układu na kształt elementów skończonych. Stwierdzono, że najbardziej stabilne wyniki uzyskiwane są dla elementów o kształcie zbliżonym do kwadratowych i przy podziale na 3 elementy skończone na grubości blachy. Większa ilość elementów nie powoduje znaczącego zwiększenia dokładności wyników, a jedynie znaczne wydłużenie czasu obliczeń.

Określenie wrażliwości wybranych parametrów materiałowych na  $\Delta\sigma_{z,max}$  miało na celu wyznaczenie obszaru, w którym zmiany parametrów nie wpływają znacząco na dokładność wyników. Stwierdzono, że dokładne określenie granicy plastyczności ma większe znaczenie dla dokładności wyników niż dokładne wyznaczenie modułu umocnienia.

Określono także jaki wpływ na dokładność wyników ma liczba elementów skończonych w analizowanym krążku. Zbyt mała liczba elementów daje dobrych rezultatów. Nie jest możliwe określenie grubości lub wyznaczenie naprężeń. Zbyt duże zwiększenie liczby elementów, poza wydłużonym czasem obliczeń, nie przynosi żadnych efektów.

Ustalono, że współczynnik kształtu powinien być równy 1, a całkowita liczba elementów skończonych na krążku, w przypadku zastosowania ćwiartki obiektów i dla podziału krążka na 3 elementy na grubości, nie powinna być mniejsza niż 3000. Poniżej tej wartości nie uzyskuje się stabilnych wyników.

## BIBLIOGRAFIA

1. Bohdal L., Kukielka L., Kukielka K., Kulakowska A., Malag L., Patyk R. (2014), *Three Dimensional Finite Element Simulation of Sheet Metal Blanking Process*. Applied Mechanics and Materials, vol. 474, pp. 430-435.
2. Bohdal Ł., Walczak P. (2015), *Eco-modeling of metal sheet cutting with disc shears*. Annual Set The Environment Protection 2013, vol. 15, pp. 863-872.
3. Bohdal L., Kukielka L. (2014), *Application of variational and FEM methods to the modelling and numerical analysis of guillotining process for geometrical and physical nonlinearity*. Mechanika 2014, Vol. 20(2), pp. 197-204
4. Chodor J., Kaldunski P. (2014), *Experimental researches of influence of sliding burnishing technological conditions for surface roughness of 41Cr4 steel product*, IBEN, Gorzów Wielkopolski
5. Kaldunski P., Chodor J. (2014), *Numerical analysis of the deep drawing proces by finite element method for anisotropic model of object*, IBEN, Gorzów Wielkopolski.
6. Malag L., Kukielka L., Kukielka K., Kulakowska A., Bohdal L., Patyk R. (2014), *Problems Determining of the Mechanical Properties of Metallic Materials from the Tensile Test in the Aspect of Numerical Calculations of the Technological Processes*. Applied Mechanics and Materials, vol. 474, pp. 454-459.
7. Patyk R., Kukielka L., Kukielka K., Kulakowska A., Malag L., Bohdal L. (2014), *Numerical Study of the Influence of Surface Regular Asperities Prepared in Previous Treatment by Embossing Process on the Object Surface Layer State after Burnishing*. Applied Mechanics and Materials, vol. 474, pp. 448-453.

*disc. Presents relations of reduced stresses compared to the shape factor at the circumference of the disc. Was carried out an analysis of how changes in the yield stress and tangent modulus at reduced stresses. Has been verified the effect at the accuracy of the results has a finite number of elements in the disc discretization.*

Autorzy:

dr inż. **Paweł Kaldunski** – Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów, email: pawel.kaldunski@tu.koszalin.pl

dr inż. **Jarosław Chodór** – Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów, email: jaroslaw.chodor@tu.koszalin.pl

dr inż. **Agnieszka Kulakowska** – Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów, email: agnieszka.kulakowska@tu.koszalin.pl

dr inż. **Łukasz Bohdal** – Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów, email: lukasz.bohdal@tu.koszalin.pl

## SENSITIVITY ANALISYS IN DEEP DRAWING PROCESS

### Abstract

*Article presents the influence of the shape factor, precision of determining the materials coefficients and the number of finite elements for the accuracy of the results in the deep drawing simulation. Shape factor is defined as the ratio of the dimensions in the horizontal plane finite element at the periphery of the*