

EDWARD LISOWSKI\*

## ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCI ZAKRYWEK KORONOWYCH W SYSTEMIE ABAQUS

### STRESS ANALYSIS OF CROWN CLOSURES USING ABAQUS SOFTWARE

#### Streszczenie

W artykule podjęto zagadnienie obniżenia masy zakrywek koronowych stosowanych do zamykania butelek z obrzeżem. Zakrywki koronowe są produkowane w dużych ilościach, dlatego nawet niewielkie obniżenie masy daje znaczące efekty ekonomiczne. Analizę wytrzymałościową przeprowadzono z wykorzystaniem programu ABAQUS.

*Słowa kluczowe: zamknięcia koronowe, modelowanie MES*

#### Abstract

In this paper problem of lowering mass of crown closures was taken up. The crown closures are used for corking bottles with edges. They are produced in large quantities, so even small reduction of mass can give significant economical results. Strength analysis was carried out using the ABAQUS software.

*Keywords: modelling, crown closures, FEM analysis*

\* Prof. dr hab. inż. Edward Lisowski, Instytut Informatyki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

### Oznaczenia

- $lz$  – liczba zębów
- $ra$  – mniejszy promień czaszy zakrywki
- $rb$  – mniejszy promień czaszy zakrywki
- $g$  – grubość blachy zakrywki
- $s1$  – grubość zęba
- $s2$  – szerokość wrębu
- $h1$  – wysokość zęba
- $h2$  – głębokość wrębu
- $h3$  – wysokość zahaczenia wrębu
- $z$  – liczba zębów

### 1. Wstęp

Zamknięcia koronowe do butelek z obrzeżem, popularnie nazywane „kapslem”, zbudowane jest z zakrywki metalowej i miękkiej uszczelki. Zakrywka koronowa w swojej istocie jest najprostszym i dotychczas najtańszym zamknięciem. Została ona opatentowana w 1890 roku w USA [3]. Posiadała 24 ząbki oraz podklejaną miękką uszczelkę. Obecnie zakrywki wykonywane są ze stalowego płaskiego krążka przy swobodnym formowaniu przez tłoczenie stemplem przez otwór z wewnętrznymi ząbkami. Zakrywka z uszczelką po założeniu na butelkę i zaciśnięciu zahacza wrębami o obrzeże na szyjce butelki. Szczelność zamknięcia uzyskuje się za pomocą uszczelki wykonanej z miękkiego materiału, np. polietylenu lub polichlorku winylu. Zakrywka z kolei musi posiadać odpowiednią grubość zapewniającą uzyskanie takiej wytrzymałości, by pod wpływem zmian ciśnienia nie następowała deformacja powodująca utratę szczelności butelki. Automatyzacja operacji butelkowania napojów spowodowała standaryzację butelek i zakrywek koronowych do butelek, zarówno z główką gwintowaną, jak i niegwintowaną. Główki butelek niegwintowanych znormalizowane zostały w wielu normach krajowych i zaleceniach międzynarodowych [3, 4, 5].

Metalowe zakrywki koronowe zdefiniowane są w polskiej normie [5] jako wyrób ukształtowany w formie miseczki z obrzeżem ząbkowanym, potocznie zwanym „koroną”. Standardowa grubość blachy waha się w granicach  $g = 0,20$  do  $0,26$  mm, a standardowa liczba ząbków w kapslu wynosi obecnie  $z = 21$ . Próby zmiany geometrii i liczby ząbków korony są widoczne w wielu opisach patentowych. Z opisu patentowego [7] znane jest australijskie rozwiązanie zakrywki, która posiada ząbki o stałej szerokości, a szerokość ząbków jest większa od szerokości wrębów. Z opisu patentowego [8] znane jest rozwiązanie amerykańskiej firmy Zapata Technologies Inc., która zaleca stosowanie od 28 do 32 ząbków na obrzeżu, celem uzyskania podwyższonej wytrzymałości między koroną a główką butelki. Z międzynarodowego opisu zgłoszeniowego [9] znane jest rozwiązanie amerykańskiej firmy Crown Packaging Technology Inc., która zaleca stosowanie 21 lub 27 ząbków do zamykania butelek. W rozwiązaniu tym maksymalna szerokość każdego wrębu jest również większa niż maksymalna szerokość każdego ząbka. Dla  $z = 21$  ząbków max. szerokość wrębu  $s2 = 3,3$  mm, a ząbka  $s1 = 1,85$  mm.

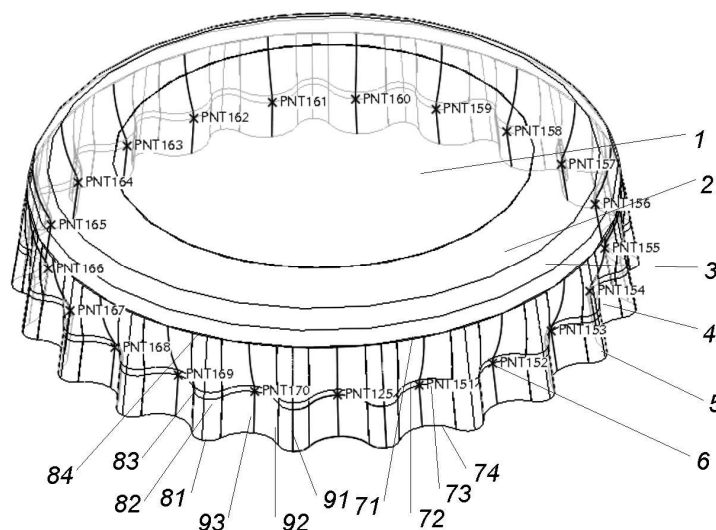
To z pozoru proste urządzenie do zamykania butelek pomimo wielu prac rozwojowo badawczych nie zostało od początku jego wynalezienia w jakiś istotny sposób zmienione.

Z obecnego stanu wiedzy nie można ściśle ustalić, jaka liczba ząbków dla zakrywki jest optymalna, jak również, czy wymiary, takie jak grubość blachy promienie zaokrąglenia są optymalne. Osobnym zagadnieniem pozostaje kształt czaszy zakrywki, który ma istotne znaczenie dla wytrzymałość i sztywność kapsla.

Zagadnienie podjęte w niniejszym artykule powstało z inspiracji firmy Can-Pack S.A., której inżynierowie postanowili podjąć zadanie ulepszenia zakrywki koronowej wykorzystując z jednej strony nowe możliwości obliczeniowe, z drugiej zaś dostępność nowych materiałów. W artykule przedstawiono fragment tych prac, które pokazują możliwości obniżenia grubości blachy stosowanej na zakrywki.

## 2. Parametryczny model powierzchniowy zakrywki

Model powierzchni środkowej zakrywki zdefiniowano jako zbiór połączonych płyt powierzchniowych zbudowanych na odpowiednich krzywych, co pokazano na rys. 1. W zakrywce wyróżniono następujące płyty powierzchniowe: 1 – fragment czaszy kulistej, na którą działa ciśnienie płynu, 2 – strefa uszczelniania, 3 – zaokrąglenie narożnikowe, 4 – wrób koronki, 5 – ząbek koronki, 6 – punkt zahaczenia na butelkę, od 71 do 74 – krzywe przekroju wrębu, od 81 do 84 – krzywe przekroju zęba, od 91 do 93 – krzywe prowadzące odpowiednio wzdłuż zęba i wrębu.

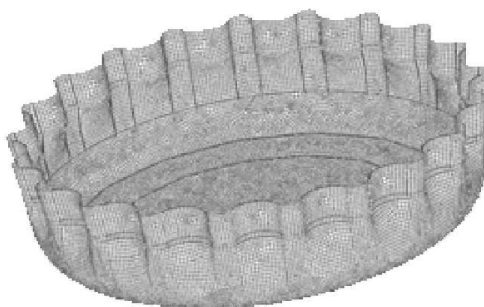


Rys. 1. Model szkieletowy zakrywki koronowej  
Fig. 1. Wire model of crown closure

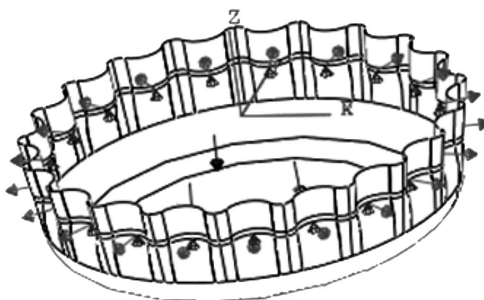
## 3. Model MES w programie ABAQUS

Model MES zbudowano w programie ABAQUS. Na krzywych jak na rysunku 1 rozpięto powierzchnie i dokonano podziału na powierzchni wrębów (*Partition*), tak by

możliwe było utworzenie węzłów siatki w punktach 6 (rys. 1). Przy budowie siatki MES zastosowano metodę QUAD-dominated, i wygenerowano 36 000 elementów (rys. 2). Przy ustaleniu obciążeń i definicji stopni swobody przyjęto założenia upraszczające, polegające na pominięciu zjawisk kontaktowych współpracy zakrywki z butelką i zastąpieniu ich odpowiednimi warunkami brzegowymi (rys. 3).



Rys. 2. Dyskretny model zakrywki  
Fig. 2. Mesh of the crown closure

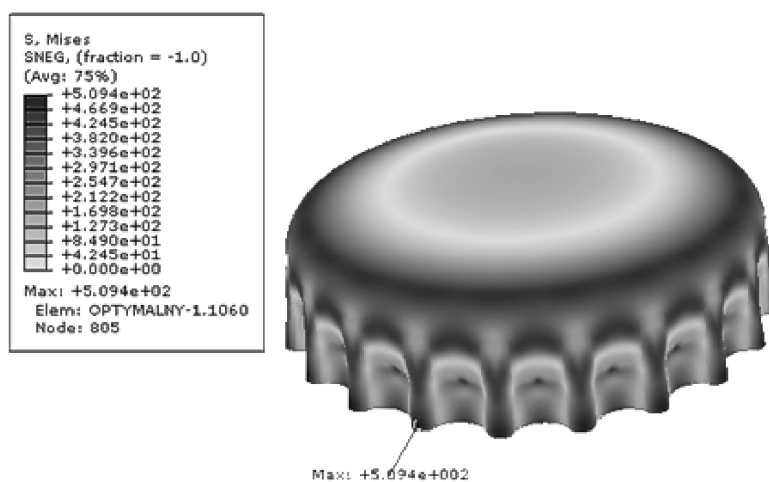


Rys. 3. Schemat obciążenia  
Fig. 3. Loads operating on the crown closure

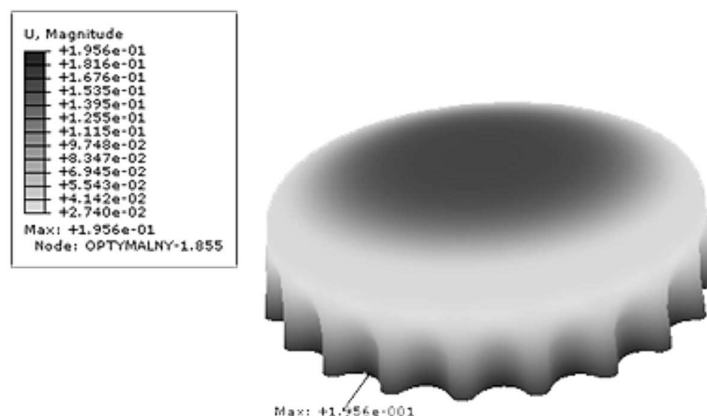
#### 4. Optymalizacja parametryczna

Mając zbudowane modele parametryczne geometrii oraz model MES, sformułowano zagadnienie poszukiwania rozwiązań spełniających postawione wymaganie, jakim było nie przekroczenie granicy plastyczności  $Re = 620$  MPa przy ciśnieniu roboczym w butelce 0,69 MPa. Do tej analizy założono stałą liczbę ząbków  $z = 21$ . Jako funkcję celu przyjęto minimum masy, natomiast ograniczeniami były dopuszczalne przemieszczenia w kierunku promieniowym oraz dopuszczalne naprężenia. Zmiennymi decyzyjnymi były:  $lz$  – liczba zębów,  $ra$  – większy promień czaszy zakrywki,  $rb$  – mniejszy promień czaszy zakrywki,  $g$  – grubość blachy zakrywki,  $s1$  – grubość zęba,  $s2$  – szerokość wrębu,  $h1$  – wysokość zęba.

Optymalizację prowadzono metodą bezpośredniego przeszukiwania zmiennych decyzyjnych w zbiorze rozwiązań dopuszczalnych, generując automatycznie do każdego rozwiązania zmieniony model i siatkę MES. W wyniku przeprowadzonej optymalizacji otrzymano rozwiązanie o ok. 30% mniejszej masie w stosunku do rozwiązania standardowego. Na rysunkach 4 oraz 5 przedstawiono mapy naprężeń zredukowanych HMM oraz przemieszczeń wypadkowych dla rozwiązania po optymalizacji. Maksymalne naprężenia HMM wystąpiły na końcu ząbka i wynosiły 510 MPa, i były znacznie niższe od granicy  $R_e = 620$  MPa zastosowanej stali, natomiast maksymalne przemieszczenia zredukowane wyniosły poniżej 0,2 mm, co jest satysfakcjonującym wynikiem.



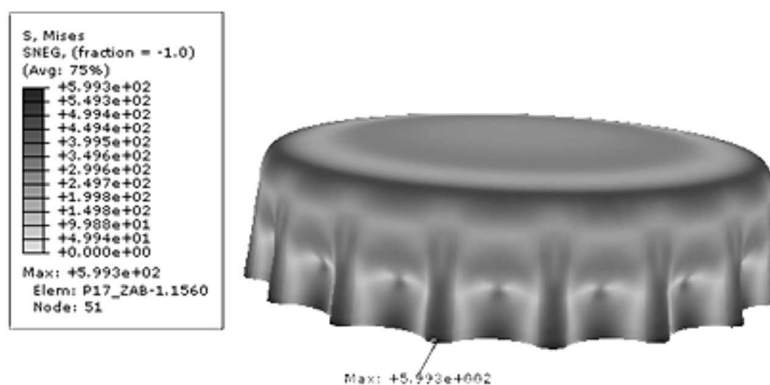
Rys. 4. Mapa naprężeń HMM zakrywki otrzymanej po optymalizacji  
Fig. 4. Map of HMM stress after optimization



Rys. 5. Mapa przemieszczeń zredukowanych po optymalizacji  
Fig. 5. Displacement magnitude after optimization

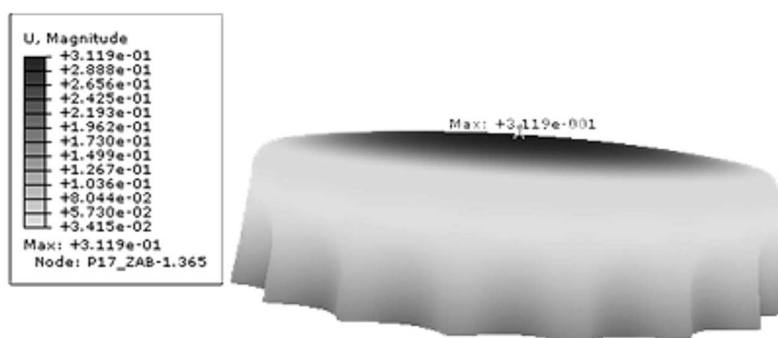
### 5. Badanie wpływu ilości zębów

Korzystając z opracowanego modelu parametrycznego, założono stałe parametry zakrywki i zmieniano liczbę zębów  $z = 17$  do 31. Na rysunkach 6 i 7 pokazano wyniki dla liczby zębów  $z = 17$ , a na rysunkach 7 i 8 dla liczby zębów 31. Jak wynika z rys. 6 zmniejszenie liczby zębów do 17 spowodowało znaczny wzrost wartości naprężeń HMH w ząbkach. Podobna sytuacja wystąpiła dla liczby zębów  $z = 31$ , przy tej liczbie zębów znacząco wzrosła wartość naprężeń. Optymalna liczba zębów ze względów wytrzymałościowych mieści się w przedziale 21 a 25, a więc rozwiązanie [3] opatentowane już w 1890 roku mieści się w tym zakresie.



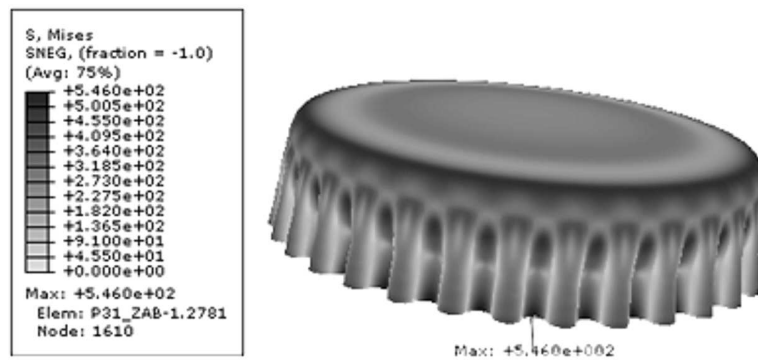
Rys. 6. Mapa naprężeń HMH dla liczby zębów  $z = 17$

Fig. 6. Map of HMH stress for  $z = 17$

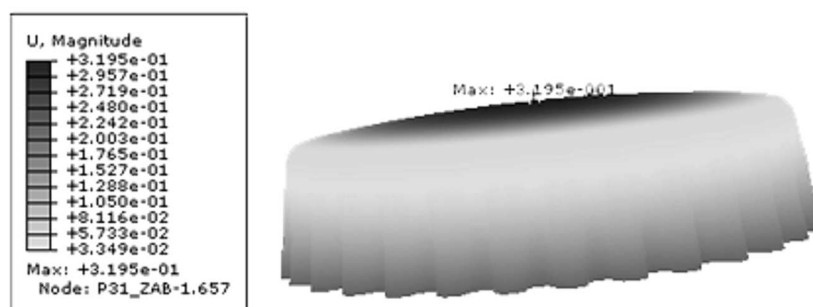


Rys. 7. Mapa naprężeń HMH dla liczby zębów  $z = 17$

Fig. 7. Displacement magnitude for  $z = 17$



Rys. 8. Mapa naprężeń HMH dla liczby zębów  $z = 31$   
Fig. 8. Map of HMH stress for  $z = 31$



Rys. 9. Mapa naprężeń HMH dla liczby zębów  $z = 31$   
Fig. 9. Displacement magnitude for  $z = 31$

## 6. Wnioski

Modelowanie koronowych zakrywek metalowych jest złożonym zadaniem, które może sprawiać wiele problemów. Przyjęcie założeń upraszczających zastępujących złożone zjawiska współpracy zakrywki z butelką odpowiednimi warunkami brzegowymi we współrzędnych cylindrycznych w sposób wystarczający pozwoliły na poszukiwanie nowych rozwiązań. Przeprowadzona optymalizacja pozwoliła na znaczące obniżenie masy zakrywki o około 30% w porównaniu do rozwiązań standardowych. Osobnym zagadnieniem pozostaje proces tłoczenia zakrywki. Symulację tłoczenia prowadzono w zastosowanym programie ABAQUS, co pozwoliło na opracowanie nowych narzędzi tłoczenia. Nowe opracowane rozwiązania są obecnie na etapie prototypów i badań na stanowisku laboratoryjnym. Wstępne wyniki tych badań potwierdzają słuszność przyjętych modeli obliczeniowych.

## Literatura

- [1] Fish J., Belytschko T., *A First Course in Finite Elements*, JohnWiley & Sons, Ltd England 2007.
- [2] Lisowski E., *Automatyzacja i integracja zadań projektowania z przykładami dla systemu Pro/EngineerWildfire*, Wydawnictwo PK, 2007.
- [3] Painter W., *Bottle-sealing device*, Patent US468258, 1890.
- [4] Norma PN-EN14634:2010, *Opakowania szklane – Główka do zamknięcia koronowego 26 H 180 – Wymiary*.
- [5] Norma PN-EN14635:2010, *Opakowania szklane – Główka do zamknięcia koronowego 26 H 126 – Wymiary*.
- [6] Norma PN-O-79571:1996, *Zamknięcia metalowe – Zamknięcia koronowe*.
- [7] Tucker L.R., *Crown Closure*, Patent US4337871 (Int.Cl.3 B65D 41/12), 1980.
- [8] Shapcott M., *Bottle cap*, Patent US5458253 (Int.Cl.6 B65D 41/12), 1995.
- [9] Crown Packaging Technology Inc., Bourque H.R., Perkins E.W., *Twist off crown*, Patent WO2009131885 (Int.Cl. 2006.01 B65D 41/12, B65D51/48), 2009.