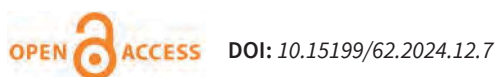


Maximizing the axial load strength of PET bottles from the point of view of their transportation

Maksymalizacja wytrzymałości na obciążenie osiowe butelek PET z punktu widzenia ich transportu



A numerical anal. using the finite element method (FEM) was carried out to det. the shape of the upper part of a PET (polyethylene terephthalate) bottle with the highest possible axial strength under load conditions during transport. The adopted numerical model was verified exptl.

Keywords: SBM technology, axial strength of PET packaging, FEM analysis

Światowy rynek opakowań na płyny gazowane i niegazowane obejmuje setki miliardów sztuk¹⁾. Najpopularniejsze rodzaje opakowań to butelki PET, aluminiowe puszki, kartony i szklane butelki. Wśród tych opakowań dominującą pozycję pod względem produkcji zajmują butelki PET²⁾. Opakowania z PET wytwarzane są metodą dwustopniowego rozdmuchu z jednoczesnym rozciąganiem z półfabrykatów w postaci preform. Tendencja zmniejszania masy wytwarzanych opakowań staje się istotnym problemem w transporcie butelek PET, z powodu malejącej ich wytrzymałości. Obecnie światowe tendencje zmierzają w kierunku minimalizacji masy opakowań PET nie tylko ze względu na koszty, ale także z powodu ograniczeń ilości tworzywa wprowadzanego na rynek. Zmniejszenie masy opakowań PET powoduje wiele problemów, a najbardziej istotny dotyczy transportu butelek na paletach. Zbyt mała wytrzymałość osiowa butelek uniemożliwia ich transport na

paletach. Obciążenie masą butelek ułożonych w warstwach odkształca te znajdujące się najniżej. Praktyka transportowa pokazuje, że o wytrzymałości przewożonych opakowań PET decyduje wytrzymałość osiowa ich górnej części (czaszy)³⁻⁵⁾. Celem badań, których częściowe wyniki przedstawiono w pracy, było opracowanie nowego kształtu butelek PET (6 L) do magazynowania wody niegazowanej. Analizy przeprowadzono najpierw za pomocą metody elementów skończonych (MES). Następnie otrzymane wyniki zweryfikowano doświadczalnie.

Słowa kluczowe: technologia SBM, wytrzymałość osiowa opakowań PET, analiza MES

paletach. Obciążenie masą butelek ułożonych w warstwach odkształca te znajdujące się najniżej. Praktyka transportowa pokazuje, że o wytrzymałości przewożonych opakowań PET decyduje wytrzymałość osiowa ich górnej części (czaszy)³⁻⁵⁾.

Celem badań, których częściowe wyniki przedstawiono w pracy, było opracowanie nowego kształtu butelek PET (6 L) do magazynowania wody niegazowanej. Analizy przeprowadzono najpierw za pomocą metody elementów skończonych (MES). Następnie otrzymane wyniki zweryfikowano doświadczalnie.

Część doświadczalna

Analiza numeryczna

Analizę numeryczną za pomocą metody elementów skończonych (MES) przeprowadzono, wykorzystując pro-



Dr hab. inż. Waldemar KARASZEWSKI (ORCID: 0000-0003-3085-9468) ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Politechniki Gdańskiej. Na tym samym wydziale w 1999 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych, a w 2013 r. stopień doktora habilitowanego w dziedzinie budowa i eksploatacja maszyn. Obecnie jest zatrudniony na stanowisku profesora na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa PG. Specjalność – inżynieria mechaniczna.



Dr inż. Rafał GAWARKIEWICZ (ORCID: 0000-0002-4838-546X) ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Politechniki Gdańskiej. Na tym samym wydziale w 2004 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych w dziedzinie budowa i eksploatacja maszyn. Obecnie jest zatrudniony na stanowisku adiunkta na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa PG. Specjalność – inżynieria łozyskowa.

* Adres do korespondencji:

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa, Politechnika Gdańska, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, tel.: (58) 347-29-29, e-mail: walkaras@pg.edu.pl

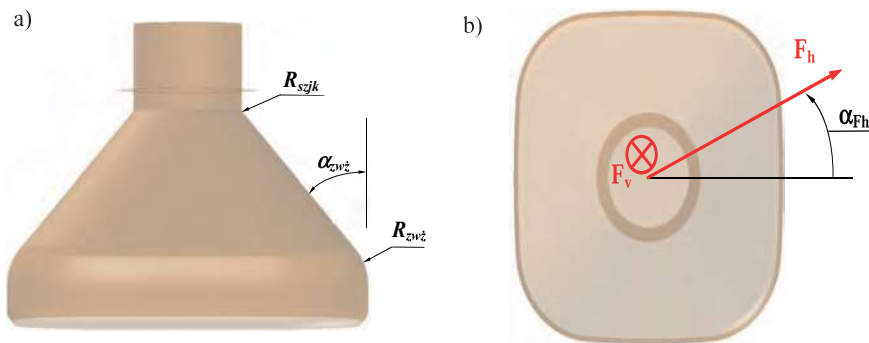


Fig. 1. Calculated upper part of the 6-liter bottle: a) parameters the effect of which on the load capacity was analyzed: R_{zwz} – radius of the rounding of the bottle cup, R_{szjk} – radius of the rounding at the neck, α_{zwz} – angle of inclination of the cup, F_v – axial loading force, F_h – transverse loading force

Rys. 1. Fragment obliczanej górnej części butelki 6-L: a) parametry geometrii, których wpływ na obciążalność analizowano: R_{zwz} – promień zaokrąglenia czaszy, R_{szjk} – promień zaokrąglenia przy szyjce, α_{zwz} – kąt nachylenia powierzchni czaszy, F_v – siła obciążająca osiowa, F_h – siła obciążająca poprzeczna

gram ANSYS. Do odwzorowania geometrii czasz butelek i nakrętek na nich osadzonych przyjęto modele powłokowe. Przykładowy model geometrii czaszy butelki 6-L przedstawiono na rys. 1. Przedstawiono na nim także parametry geometrii, których wpływ na obciążalność czaszy butelki analizowano: R_{zwz} – promień zaokrąglenia zwężenia czaszy, R_{szjk} – promień zaokrąglenia przy szyjce i α_{zwz} – kąt pochylenia powierzchni zwężenia.

Zastosowany podział na elementy skończone wraz z odebranymi stopniami swobody (U i ROT) oraz przyłożonym obciążeniem (F) przedstawiono na rys. 2. Wszystkie symulacje wykonano z uwzględnieniem efektu dużych przemieszczeń. Każdorazowo sprawdzano, przy jakiej części zadanego obciążenia obliczenia przestawały być zbieżne, co przyjmowano jako osiągnięcie stanu niestateczności geometrycznej czaszy butelki. Największą wartość obciążającej siły, przy której program jeszcze uzyskiwał zbieżność obliczeń, przyjmowano jako wartość maksymalną (obciążalność) dla danej geometrii. W ten sposób najpierw wyznaczono obciążalność dla butelki o bazowej geometrii, zwanej w dalszej części opracowania obciążalnością bazową. Parametry bazowej geometrii to: $R_{zwz} = 24$ mm, $R_{szjk} = 6,5$ mm, $\alpha_{zwz} = 45^\circ$. Następnie przeprowadzono analizy dla zmienionych kombinacji parametrów geometrii i dla każdej z nich wyznaczano maksymalną siłę, przy której obliczenia jeszcze były zbieżne. Uzyskiwane wartości sił odnoszono do wartości siły dla bazowej geometrii butelki.

W symulacjach przyjęto wiele uproszczeń. Założono linowy model materiału butelki. Nie definiowano także

granicy plastyczności R_c ani tym bardziej doraźnej wytrzymałości na rozerwanie R_m . Głównym powodem tego uproszczenia była nieznaną strukturę fazową (charakterystyki) materiału butelek. Mimo tak rażąco odmiennego (od rzeczywistości) modelu materiału, autorzy opracowania uznali, że w zakresie przeprowadzanych obliczeń i uzyskiwanych przemieszczeń w analizowanych przypadkach (do początku utraty stateczności geometrii butelki) można uznać linowy model materiału za wystarczający. Ponadto analizy miały jedynie charakter porównawczy, dlatego przyjęte uproszczenie dotyczące materiału można było zaakceptować.

Nie uwzględniono w geometrii linii śrubowej gwintu zarówno butelki, jak i nakrętki. Połączenie gwintowe butelka-nakrętka zamodelowano jedną ścianką będącą kontynuacją szyjki butelki nad kołnierzem. Ściance nad kołnierzem nadano grubość 3 mm, kołnierzowi 1,5 mm. Uproszczenie to nie miało wpływu na poszukiwane wyniki, gdyż ta część geometrii była na tyle sztywna w porównaniu z całą resztą geometrii butelki, że nie miała praktycznego wpływu na analizowaną deformację części butelki poniżej kołnierza (i praktycznie szyjki).

Obciążenie F rozłożono na jednej linii (okręgu) (rys. 2a) na zakończeniu butelki. Uproszczenie to nie miało istotnego wpływu na „rozchodzenie” się obciążenia w głąb czaszy i wywołane nim naprężenia oraz przemieszczenia. Obciążenie zwiększano stopniowo i równomiernie o kolejne 0,5% do maksymalnej wartości (150 N), stąd z tą samą rozdzielczością wyznaczano obciążalność. W przypadku przykładania obciążenia zginającego F_h (rys. 1b) przyjmowano 5% aktualnej wartości siły ściskającej.

W przypadku butelki obciążonej jedynie siłą pionową węzłom dolnej krawędzi modelu odebrano pionowe stopnie swobody oraz rotacyjne stopnie swobody w płaszczyznach prostopadłych do płaszczyzny podstawy (rys. 2a), co było bardziej zgodne z rzeczywistością, ale było to możliwe dzięki zamodelowaniu fragmentu pionowej ścianki butelki do połowy wysokości pierwszego rowka obwodowego. Ten dodatkowy dolny fragment modelu, zdaniem autorów, zapewniał dość dobre usztywnienie czaszy. W celu uniknięcia błędów niepełnego uwarunkowania modelu, górnym węzłem, gdzie była przykładana siła ściskająca, odebrano translacyjne stopnie swobody w płaszczyźnie poziomej (równoległej do podstawy butelki).

W analizie numerycznej nie uwzględniono wpływu temperatury na właściwości materiału butelki, a badania doświadczalne przeprowadzono w tej samej temperaturze. Dla dolnej części ścianki modelowanej geometrii, dla której nie zmierzono jej grubości, przyjęto wartość grubości z najbliższego punktu pomiarowego (zakładając, że gru-



Dr inż. Paweł WAWRZYŃIAK (ORCID: 0000-0002-0494-7213) ukończył studia na Wydziale Mechanicznym, a następnie na Wydziale Automatyki i Robotyki Politechniki Gdańskiej. W 2017 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych w dziedzinie budowa i eksploatacja maszyn na Wydziale Mechanicznym tej samej uczelni. Obecnie jest zatrudniony na stanowisku adiunkta na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej. Specjalność – inżynieria mechaniczna.

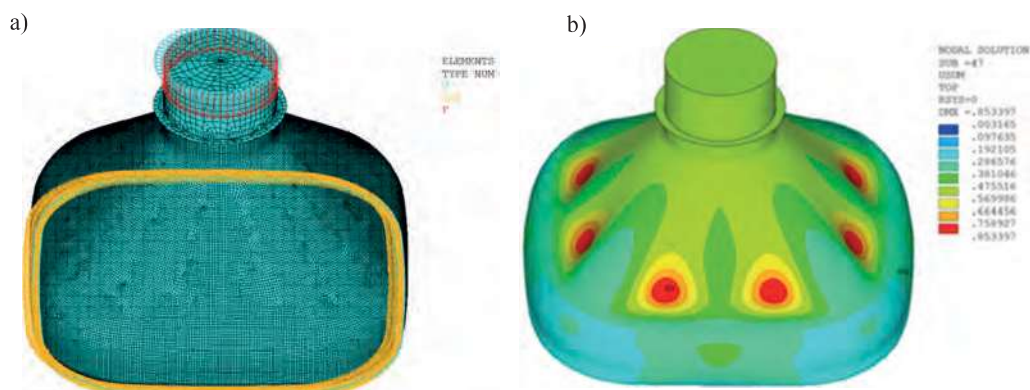


Fig. 2. Numerical modelling of upper part of the 6-L bottle: a) division of finite elements, boundary conditions: U, ROT and loading F, b) total displacements, mm (10× scale) caused by compressive force (F_v)

Rys. 2. Numeryczne modelowanie czaszy butelki 6-L: a) podział na elementy skończone, odebrane stopnie swobody: U, ROT oraz obciążenie F, b) przemieszczenia całkowite, mm (w skali 10×) spowodowane siłą ściskającą (F_v)

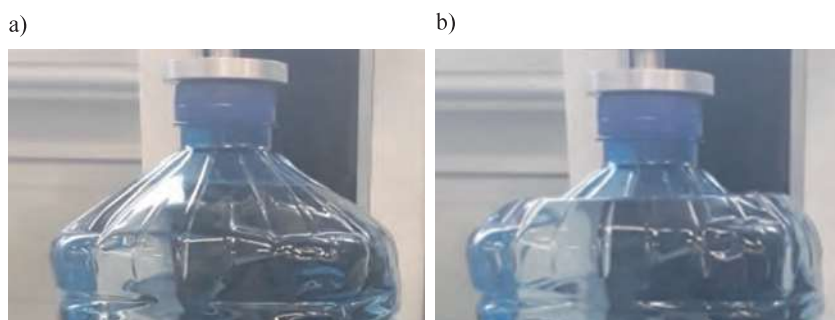


Fig. 3. Example of deformation of PET bottles loaded with axial force (F_v): a) beginning of deformation, b) next stage of deformation

Rys. 3. Przykład odkształcania się butelek PET obciążonych siłą osiową (F_v): a) początek odkształcania, b) kolejny etap odkształcania

bość od ostatniego punktu pomiarowego w dół była już niezmienna albo nieistotnie zmienna).

Przykładowy obraz deformacji czaszy butelki 6-L przedstawiono na rys. 2b.

Weryfikacja doświadczalna

Weryfikację modelu teoretycznego przeprowadzono za pomocą urządzenia firmy Andilog, model Stentor II[®], do osiowego zginięcia butelek PET, które umożliwia pomiar siły osiowej. Uzyskane deformacje rzeczywistej butelki PET (rys. 3) i zmiany jej kształtu przewidywane w analizach numerycznych (rys. 2b) były zgodne. Zgadzały się zarówno miejsca największych przemieszczeń, jak i całościowa zmiana kształtu czaszy, co potwierdza poprawność przyjętych założeń w analizach numerycznych.

Największą obciążalność (ok. 247%) w porównaniu z obciążalnością butelki o geometrii bazowej uzyskano dla następujących parametrów (oznaczenie zgodne z rys. 1): $R_{zwz}/\alpha_{zwz} = 52 \text{ mm}/50^\circ$ i $R_{szjk} = 2 \text{ mm}$. Niewiele mniejszą obciążalność (227%) uzyskano także dla: $R_{zwz}/\alpha_{zwz} = 42 \text{ mm}/45^\circ$ i $R_{szjk} = 3 \text{ mm}$.

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania pozwoliły wyznaczyć zestaw parametrów geometrii zapewniających zwiększenie wytrzymałości osiowej (na ściskanie) górnej części (czaszy) butelek 6-L wykonanych z PET.

W analizach uwzględniono także wpływ dodatkowej siły poprzecznej (zginającej całą butelkę), wynikającej z nierównomiernego obciążenia warstw butelek składowanych na paletach, równej 5% wartości siły osiowej.

Otrzymane wyniki wskazują na możliwość istotnego poprawienia wytrzymałości osiowej analizowanego typu butelek, dzięki zmianie kształtu ich górnej części. Zastosowanie zaproponowanej geometrii może nie tylko ograniczyć problemy odkształcania się butelek podczas transportu, a tym samym obniżyć jego koszty poprzez zminimalizowanie ewentualnych zniszczeń butelek ułożonych na paletach, ale także może obniżyć koszty zakupu samych preform, gdyż będzie można zastosować je o mniejszej masie do wytwarzania butelek PET o podwyższonej wytrzymałości geometrii.

Badania zrealizowano na zlecenie firmy Masspol sp. z o.o. Autorzy dziękują firmie TES sp. z o.o. za udostępnienie urządzenia laboratoryjnego do badania wytrzymałości osiowej butelek PET.

Otrzymano: 06-10-2024

Zrecenzowano: 18-11-2024

Zaakceptowano: 28-11-2024

Opublikowano: 20-12-2024

LITERATURA

- [1] 2020 State of the beverage industry. All bottled water segments see growth, <https://www.bevindustry.com/articles/93226-state-of-the-beverage-industry-all-bottled-water-segments-see-growth>.
- [2] Still Bottled Water Market Size, Share & Trends Analysis, <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/still-bottled-water-market-report>.
- [3] S. Ge-Zhang, H. Liu, M. Song, Y. Wang, H. Yang, H. Fan, Y. Ding, L. Mu, *Polymers* 2022, **14**, nr 16, <https://doi.org/10.3390/polym14163364>.
- [4] P. Wawrzyniak, W. Karaszewski, *Polymers* 2020, **12**, 1749, <https://doi.org/10.3390/polym12081749>.
- [5] R. Nistico, *Polym. Test.* 2020, **90**, 106707, <https://doi.org/10.1016/j.polytest.2020.106707>.
- [6] Top load tester, Andilog, <https://www.andilog.com/topload-bottle-crush-force-measurement.html>.