

dr hab. inż. Eugeniusz Hotała, prof. PWr^{1*)}
mgr inż. Mateusz Kuśnierek¹⁾
dr inż. Łukasz Skotny¹⁾

Nośność graniczna metalowego płaszcza silosu współpracującego z ośrodkiem sypkim

Load bearing capacity of steel silo shell cooperating with bulk solid

DOI: 10.15199/33.2015.09.39

(Oryginalny artykuł naukowy)

Streszczenie. W ocenie nośności granicznej ściskanych południkowo walcowych płaszczy silosów metalowych nie uwzględniano dotychczas korzystnego wpływu współpracy ośrodka sypkiego z płaszczem silosu w procesie utraty stateczności. W normie EN 1993-1-6 oraz w literaturze przedstawiany jest jedynie wpływ ciśnienia wewnętrznego materiału sypkiego na nośność graniczną ściskanego południkowo płaszcza silosu. Artykuł zawiera wyniki własnych analiz numerycznych, w których uwzględniono wpływ sztywności E_0 ośrodka sypkiego na proces utraty stateczności ściskanych południkowo walcowych powłok silosów metalowych.

Słowa kluczowe: analiza numeryczna, silos metalowy, stateczność powłok.

Abstract. In calculations concerning load bearing capacity of longitudinally compressed steel silo shells positive influence of cooperation with bulk solid was not taken into account so far. In code EN 1993-1-6 and in literature only influence of material pressures is being analyzed. In this paper numerical analysis including influence of rigidity E_0 of bulk solid on load bearing capacity of longitudinally compressed silo shells are being presented.

Keywords: numerical analysis, steel silo, shell stability.

W dużych silosach metalowych na nasiona zbóż i pasze stosowane są często płaskie dna oraz walcowe płaszcze z blach gładkich, których smukłość przekracza znacznie wartość $r/t = 1500$, gdzie: r jest promieniem, a t grubością walcowej powłoki płaszcza. Płaszcze takich dużych silosów o grubości blach $t = 1 - 2$ mm i smukłości $r/t = 1500 - 5000$ nie spełniają normowego [5, 6] warunku stanu granicznego LS3 nawet z uwzględnieniem korzystnego wpływu parcia poziomego p_h materiału sypkiego. Składowany w silosie ośrodek sypki może w dwojaki sposób wpływać na zwiększenie nośności granicznej ściskanego południkowo walcowego płaszcza silosu. Oprócz ciśnienia wewnętrznego, którym jest poziome parcie p_h , może wystąpić korzystny wpływ współpracy materiału sypkiego na tę nośność. Materiał sypki ma bowiem swoją sztywność E_0 i może stanowić jednokierunkowe podparcie sprężyste dla cienkościennego płaszcza silosu w procesie utraty stateczności. Te fragmenty fal wyboczeniowych, które przemieszczają się do wnętrza powłoki, napotykają odpór sztywnego ośrodka, którym jest materiał

sypki wewnątrz silosu. Fragmenty powłoki, które wraz z falą wyboczeniową przemieszczają się na zewnątrz powłoki, nie napotykają sprężystego oporu ośrodka sypkiego.

Dokładne opisanie współpracy sprężystego ośrodka sypkiego ze stalową powłoką walcową płaszcza silosu jest bardzo trudne, gdyż zależy ona od wielu czynników, m.in. właściwości i stanu naprężenia ośrodka sypkiego, stopnia zagęszczenia ośrodka, wielkości i kształtu powstającej fali wyboczeniowej (deformacji powłoki). Dotychczasowe przepisy normowe [5, 6] nie podają sposobu uwzględnienia interakcji ośrodka sypkiego z płaszczem silosu w ocenie jego nośności granicznej, wynikającej z utraty stateczności przy ściskaniu południkowym. Podstawowe informacje dotyczące tego zagadnienia można znaleźć w pracy [2].

Numeryczny model interakcji walcowego płaszcza silosu i sprężystego ośrodka sypkiego

Podstawowym zagadnieniem w budowie numerycznego modelu interakcji ośrodka sypkiego z walcowym metalowym płaszczem silosu jest określenie modułu sprężystości E_0 ośrodka sypkiego w konkretnych warunkach wystąpienia deformacji wyboczeniowych ściskanej południkowo powłoki płaszcza. Oprócz parcia (ciś-

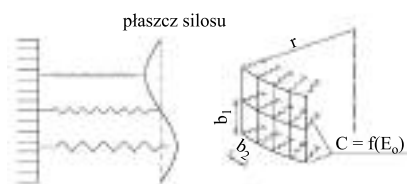
nienia) pionowego p_v wpływ na sztywność materiału sypkiego ma także kształt powstających fal wyboczeniowych. W miejscach, w których powstająca półfala wyboczeniowa jest skierowana na zewnątrz powłoki, dochodzi do lokalnego rozluźnienia materiału, a tym samym do spadku jego modułu sprężystości. Tam, gdzie półfala przemieszcza się do wnętrza powłoki, ośrodek jest lokalnie zagęszczany. Innymi czynnikami wpływającymi na sztywność ośrodka są jego gęstość i wilgotność, co wykazano w pracach [1, 3].

Interakcja pomiędzy ośrodkiem sypkim a ścianą walcowej powłoki ma charakter nieliniowy. W tych fragmentach powłoki, które przemieszczają się radialnie do jej wnętrza, występuje korzystne oddziaływanie ośrodka sypkiego. Natomiast we fragmentach, które przemieszczają się radialnie na zewnątrz, następuje znaczny spadek parcia normalnego p_h na powłokę, a kontakt powłoki z ośrodkiem sypkim może zostać lokalnie utracony.

Zaproponowany model interakcyjny walcowej powłoki płaszcza silosu i ośrodka sypkiego przedstawiono na rysunku 1. Sprężyste oddziaływanie materiału sypkiego uwzględnione zostało przez jednostronne podpory sprężyste o nieliniowej charakterystyce, zlokalizowane w węzłach elementów skończonych badanej powłoki. Sztywność ośrodka sypkiego

¹⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

^{*)} Autor do korespondencji:
eugeniusz.hotala@pwr.edu.pl



Rys. 1. Nieliniowy model interakcji materiału sypkiego z walcowym płaszczem silosu

Fig. 1. Nonlinear model of interaction between bulk solid and silo shell

przyjmowano w zakresie znanych wartości modułu sprężystości E_0 oraz współczynnika Poissona ν_0 , nie analizując konkretnej złożonej sytuacji, w jakiej znajduje się ośrodek sypki, którym była pszenica. W modelu uwzględniono jedynie sztywność ośrodka E_0 , związaną z radialnymi przemieszczeniami powłoki w kierunku jej środka.

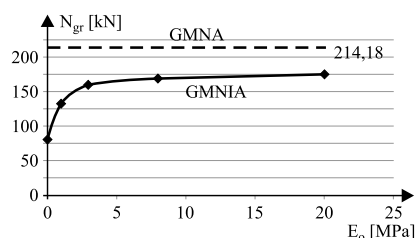
Celem analiz było określenie zależności między wartościami modułu sprężystości E_0 ośrodka sypkiego (pszenicy) a wartościami obciążenia granicznego N_{gr} ściskanej południkowo powłoki płaszcza. Płaszcz silosu obciążany był tylko tarciem od materiału sypkiego, które wyznaczono wg normy [4], a reakcję pionową N na krawędzi podporowej, występującą przy utracie stateczności, oznaczano jako N_{cr} . Podpory sprężyste (rysunek 1) nie oddziaływały na powłokę w przypadku wystąpienia radialnych przemieszczeń, skierowanych na zewnątrz powłoki.

Wyniki analiz numerycznych

Podstawowe analizy numeryczne, fizycznie i geometrycznie nieliniowe, wykonano z zastosowaniem modelu ściskanej osiowo walcowej powłoki o średnicy $D = 1800$ mm, wysokości płaszcza $L = 3600$ mm i stałej grubości t . Powłoka podparta była równomiernie na całym obwodzie, tak jak w przypadku silosów płaskodennych. Zróżnicowaną smukłość powłoki r/t uzyskiwano przez zmianę jej grubości t . Analizy przeprowadzono z zastosowaniem MES w programie Abaqus. Z uwagi na umiejscowienie podpór sprężystych w węzłach elementu skończonego zastosowano elementy skończone typu S4R o oczku nie większym niż $0,38\sqrt{rt}$. W modelu założono nieodkształcalne przepony brzegowe. Z uwagi na losowość imperfekcji w tego typu konstrukcjach, postanowiono wykorzystać znane rozwiązanie analityczne, uwzględniające wstępne niedoskonałości kształtu powłoki. Ostatecznie przyjęto 8 fal równoleżnikowych i 10 półfal południkowych. Przeprowadzone

analizy miały na celu wyznaczenie nośności granicznej N_{gr} ściskanej południkowo cienkościenną powłokę bez uwzględnienia wpływu sztywności materiału sypkiego oraz z uwzględnieniem tego wpływu. W przeprowadzonych analizach przyjęto stałą wartość modułu sprężystości E_0 na całej wysokości powłoki.

Uzyskany z obliczeń numerycznych wpływ sztywności E_0 ośrodka sypkiego na wzrost nośności granicznej N_{gr} przedstawiono na rysunku 2. Ze wzrostem modułu sprężystości E_0 ośrodka sypkiego (pszenicy) uzyskiwano coraz większe wartości siły granicznej N_{gr} . W przypadku wartości $E_0 = 3$ MPa uzyskano w analizowanej powłoce prawie dwukrotny przyrost nośności granicznej N_{gr} powłoki. Przy znacznym wzroście sztywności ośrodka sypkiego przyrost nośności granicznej jest coraz mniejszy (rysunek 2), a krzywa asymptotycznie zbliża się do wartości siły krytycznej N_{cr} ściskanej powłoki idealnej, wyznaczonej na podstawie analizy GMNA (powłoka bez imperfekcji).

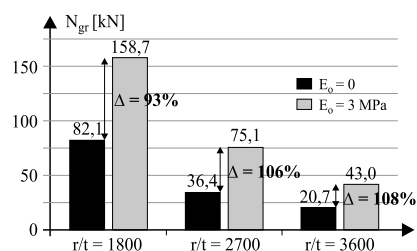


Rys. 2. Wpływ modułu sprężystości E_0 materiału sypkiego na wartość siły granicznej N_{gr} modelu powłoki o smukłości $r/t=1800$, obciążonej tylko tarciem materiału sypkiego

Fig. 2. Influence of elastic modulus E_0 of bulk solid on load bearing capacity N_{gr} of silo shell with aspect ratio $r/t=1800$, loading only with friction of bulk solid

Przeprowadzone analizy wykazały, że nawet przy niewielkiej sztywności ośrodka sypkiego można uzyskać dość znaczny wzrost nośności granicznej N_{gr} , traktowanej jako nośność krytyczna N_{cr} , związana z utratą stateczności walcowej powłoki płaszcza silosu. Należy podkreślić, że nie stwierdzono istotnego wpływu sztywności ośrodka sypkiego na wartość siły krytycznej ściskanej powłoki idealnej. Na rysunku 2 zaznaczono stałą siłę krytyczną N_{cr} w przypadku powłoki idealnej, niezależną od wartości modułu sprężystości E_0 (krzywa oznaczona jako GMNA). Na rysunku 3 przedstawiono wyniki analiz numerycznych tego samego modelu płaszcza silosu o smukłości: $r/t = 1800$, $r/t = 2700$ oraz $r/t = 3600$. W każdym z analizowanych

przypadków przyjęto sztywność ośrodka (pszenicy) $E_0 = 3$ MPa, przy czym zakładano również brak tej sztywności ($E_0 = 0$), aby ocenić jej realny wpływ na zwiększenie nośności granicznej N_{gr} . Wraz ze wzrostem smukłości r/t płaszcza silosu spada jego nośność graniczna, ale przyrost tej nośności okazał się nieco większy ($\Delta = 108\%$) niż w przypadku powłok o nieco mniejszej smukłości ($\Delta = 93\%$), co pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Wartość siły granicznej N_{gr} analizowanych powłok płaszcza o różnych smukłościach

Fig. 3. Load bearing capacity N_{gr} of analyzed silos shell with different aspect ratios

Podsumowanie

Wpływ współpracy ośrodków sypkich z cienkościennymi walcowymi płaszczami metalowych płaskodennych silosów na zwiększenie ich nośności granicznej przy ściskaniu południkowym jest znaczny i zwiększa się przy wzroście smukłości płaszcza. Dalsze badania numeryczne i doświadczalne tego zagadnienia są konieczne, aby móc właściwie ocenić bezpieczeństwo eksploatowanych i projektowanych płaskodennych silosów o dużej smukłości.

Obliczenia wykonano przy użyciu zasobów udostępnionych przez Wrocławskie Centrum Sieciowo-Superkomputerowe (<http://wcss.pl>), grant obliczeniowy Nr 293.

Literatura

- [1] Hotała E., Kuśnierek M.: Badania laboratoryjne wybranych właściwości biomas składowanych w silosach. Materiały Budowlane, nr 3/2013.
- [2] Knebel K., Schweizerhof K.: Buckling of cylindrical shells containing granular solids. Thin-Walled Structures 23 (1995) 295 – 312.
- [3] Prusiel J. A.: Wyznaczanie modułu sprężystości ośrodków ziarnistych składowanych w silosach. Budownictwo i Inżynieria Środowiska, nr 4/2013.
- [4] PN-EN 1991-4:2008: Oddziaływania na konstrukcję. Część 4: Silosy i zbiorniki.
- [5] PN-EN 1993-1-6:2009 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-6: Wytrzymałość i stateczność konstrukcji powłokowych.
- [6] PN-EN 1993-4-1:2009 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 4-1: Silosy.

Przyjęto do druku: 02.08.2015 r.