

Получена: 29.08.2017 г.

Приета: 04.12.2017 г.

## ВЛИЯНИЕ НА МЕЖДИННИТЕ ПРЪСТЕНИ И НА ВИСОЧИНАТА НА „ПОЛАТА” ВЪРХУ ЕФЕКТИВНАТА ШИРОЧИНА НА НАТИСКОВАТА ЗОНА ВЪВ ВЪЗЕЛА КОЛОНА – ЦИЛИНДРИЧНО ТЯЛО НА СТОМАНЕН СИЛОЗ

Л. Здравков<sup>1</sup>

*Ключови думи:* стоманен силоз, междинни пръстени, натискава зона, ефективна ширина

### РЕЗИЮМЕ

Стоманените силози са интересни, комплексни съоръжения. Когато те са повдигнати над земята, в тях се съчетават листови и прътови елементи. В местата на снаждане на двата типа елементи възникват напрежения с големи стойности, които могат да доведат до местна загуба на устойчивост на тънкостенните черупки. Един от дискуссионните въпроси е как да се определи ефективната ширина  $l_{\text{eff}}$  на разпространение на натисковите напрежения от опорите по височина. За съжаление, референтните стандарти БДСЕН 1993-1-6:2007 и БДС EN 1993-4-1:2007 не дават отговор на този въпрос. Очевидно влияещите фактори са много и трудно могат да бъдат обхванати в един аналитичен израз и/или таблица.

В настоящото изследване авторът е анализирал влиянието на:

- наличието на междинни пръстени по цилиндричното тяло;
- положението на изпразващата фуния по височина.

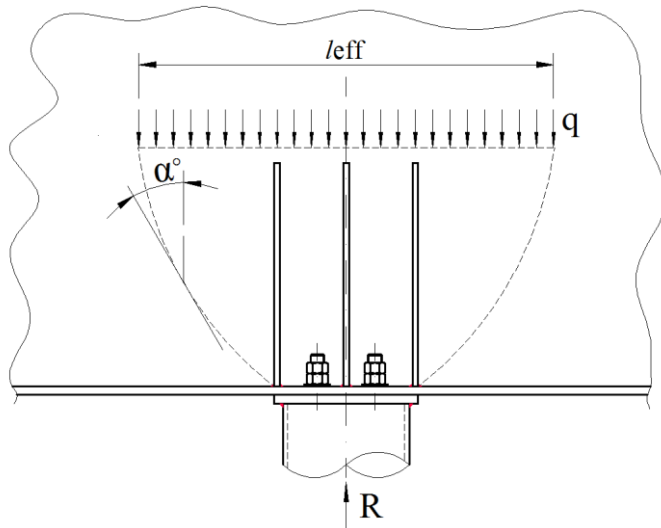
### 1. Въведение

При аналитично (ръчно) решение на стоманените силози, цилиндричното тяло следва да бъде проверено за изкорубване при меридианен (осов) натиск съгласно мето-

---

<sup>1</sup> Любомир Здравков, доц. д-р инж., кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: zdravkov\_fce@uacg.bg

диката, посочена в стандартите БДС EN 1993-1-6:2007 [2] и БДС EN 1993-4-1:2007 [3]. Предвид дискретните опори, в цилиндричното тяло ще се появят концентрирани осови сили. Те ще се разпространяват под някакъв ъгъл  $\alpha$  спрямо вертикалната ос, вж. фиг. 1, и плавно ще намаляват по височина. Стойността на ъгъла е в пряка зависимост от ефективната ширина  $l_{\text{eff}}$ . Очевидно, колкото този ъгъл е по-голям, толкова по-голяма ще е ефективната ширина  $l_{\text{eff}}$  в черупката, респективно меридианните напрежения  $\sigma_{x,\text{Ed}}$  ще са по-малки.



**Фиг. 1. Ъгъл  $\alpha$  на разпространение на натиските усилия в цилиндрична черупка и ефективна ширина  $l_{\text{eff}}$**

За съжаление, цитираните по-горе стандарти [2] и [3] не дават информация нито за стойностите на ъгъла  $\alpha$ , нито за  $l_{\text{eff}}$ . Единствено в стандарт БДС EN 1993-1-5:2005 [1] има записана формула за определяне на  $l_{\text{eff}}$  при местен натиск, но тя е приложима за стоманени плочи. Не е препоръчително тя да се използва при цилиндрични черупки [5].

В свое изследване от 2016 г. авторът се е опитал да определи влиянието на следните параметри върху разпределението на меридианните нормални напрежения по височина, респективно върху ефективната ширина  $l_{\text{eff}}$ :

- наличие на вертикални закоравяващи ребра;
- наличие на конична изпразваща фуния;
- влияние на вътрешното налягане по стената.

За съжаление, в изследването си от 2016 г. авторът не е имал възможността да анализира влиянието на:

- наличието на междинни пръстени по цилиндричното тяло;
- положението на изпразващата фуния по височина (височината на „полата“).

Целта на настоящата статия е този пропуск да бъде запълнен.

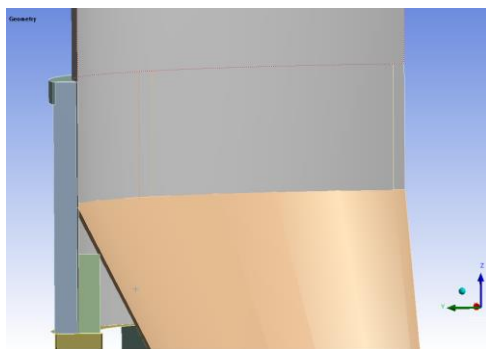
## 2. Числено изследване

За да намери отговор на поставените по-горе въпроси, авторът е направил няколко пространствени изчислителни модела на стоманен силоз, ползвайки програмния продукт ANSYS [6]. Силозът е със следните размери:

- а) обем  $V = 110 \text{ m}^3$ ;
- б) съхраняван продукт – гасена вар;
- в) вътрешен диаметър  $D = 3485 \text{ mm}$ ;
- г) височина на цилиндричното тяло  $h_c = 10950 \text{ mm}$ ;
- д) брой на поясите по височина – 5 бр.;
- е) дебелина на първия пояс  $t_{s,1} = 7 \text{ mm}$ , а на останалите –  $t_{s,2} = 6 \text{ mm}$ ,  $t_{s,3} = t_{s,4} = t_{s,5} = 4 \text{ mm}$ ;
- ж) брой колони под силоза – 8 бр.;
- з) използвани материали – стомана S235, съгласно БДС EN 10025-2 [4].

При моделирането на съоръжението са направени следните приемания:

- всички елементи са въведени като черупки (shell181) с техните реални дебелини;
- максималният размер на крайните елементи е  $50 \text{ mm}$ ;
- прътовата конструкция под силозното тяло е симулирана само с колоните си, които са 8 бр., и са запънати към фундамента;
- при изследваните варианти на силоза, с едно изключение, изпразващата фуния е снадена към цилиндричното тяло на известно разстояние от долния му ръб, вж. фиг. 2. Това решение позволява гредите или колоните на върхната конструкция да бъдат поставени точно под цилиндричното тяло, т.е. в него да не се пораждат допълнителни огъващи моменти;
- вертикалното натоварване е равномерно разпределено и е приложено към горния ръб на цилиндричното тяло;
- изследването е проведено с отчитане на влиянието на преместванията, причинени от натоварването, т.е. нелинейно, с отчитане на ефектите от втори ред;
- за облекчаване на изчисленията е използвана опцията symmetry, която позволява да се изследва само част от конструкцията, имащи ос на симетрия и симетрично натоварване.



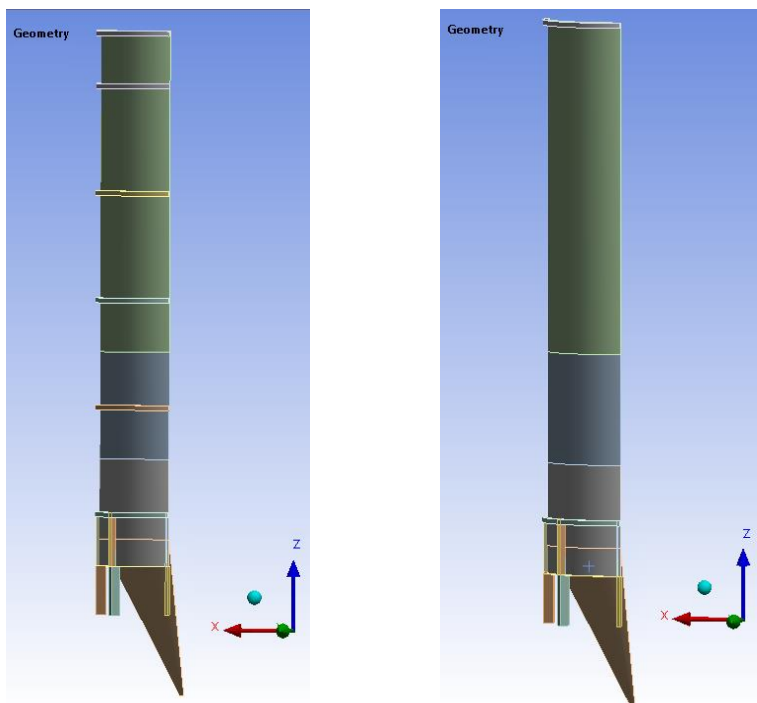
Фиг. 2. Снаждане на цилиндричното тяло с разтоварващата фуния

Над колоните, отвътре и отвън на цилиндричното тяло, са поставени закоравяващи ребра.

С цел да се отчете ефектът от междинните пръстени, изследването е проведено при следните конструктивни решения:

а) по цилиндричното тяло на силоза са поставени множество пръстени, както междинни, така и при върха на съоръжението, вж. фиг. 3а;

б) по цилиндричното тяло на силоза няма междинни пръстени. Такива закоравяващи елементи има само при върха му и на известна височина над колоните, вж. фиг. 3б.



а) цилиндрично тяло с множество междинни пръстени

б) цилиндрично тяло без междинни пръстени

**Фиг. 3. Закоравяващи пръстени по цилиндричното тяло**

Нормалните меридианни напрежения  $\sigma_{x,Ed}$ , породени от вертикален товар  $F_x$ , са отчитани във възли над опорите, по цялата височина на цилиндричното тяло. Знаейки дебелината на черупката  $t$  и стойността на опорната реакция  $R$ , ефективната широчина  $l_{eff}$  може да бъде определена по формулата:

$$l_{eff} = \frac{R}{\sigma_{x,Ed} t}, \quad (1)$$

където  $R$  е вертикалната реакция в опората, вж. фиг. 1, предизвикана от вертикалния товар  $F_x$ ;

$\sigma_{x,Ed}$  – осовите мембранни нормални напрежения по височината на цилиндричното тяло;

$t$  – дебелината на цилиндричната стоманената черупка.

Ъгълът  $\alpha$  на разпространение на натисковите сили в черупката, вж. фиг. 1, дължащи се на опорните реакции  $R$ , се определя по формулата:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left( 0,5 \frac{l_{\text{eff}} - s_s}{z} \right), \quad (2)$$

в която  $s_s$  е широчината на опората;

$z$  – вертикалното разстояние между приложната точка на опорната реакция  $R$  и възелът, където се отчитат меридианните нормални напрежения  $\sigma_{x,\text{Ed}}$ .

С цел да се отчете ефектът от междинните закоравяващи пръстени по цилиндричното тяло, са изследвани 6 силоза. Те имат различни височини на присъединяване на фунията към цилиндричното тяло. При половината от тях са поставени междинни пръстени. Специфичните особености на изследваните силози са посочени по-долу:

#### **Силоз № 1**

- а) коничната фуния е поставена на  $h = 1100$  mm над опората;
- б) на височина  $h = 1100$  mm, срещу фунията, има пръстен, до който достигат вертикални закоравяващи ребра. Те са поставени отвън и отвътре на цилиндричното тяло;
- в) няма междинни закоравяващи пръстени по цилиндричното тяло.

#### **Силоз № 2**

Аналогичен на **Силоз № 1**, но по цилиндричното тяло са поставени четири междинни закоравяващи пръстена. Те са изпълнени от ъглов профил L100×10, заварен на ребро.

#### **Силоз № 3**

- а) коничната фуния е поставена на  $h = 550$  mm над опората;
- б) на височина  $h = 1100$  mm има пръстен, до който достигат вертикални закоравяващи ребра. Те са поставени отвън и отвътре на цилиндричното тяло;
- в) няма междинни закоравяващи пръстени по цилиндричното тяло.

#### **Силоз № 4**

Аналогичен на **Силоз № 3**, но по цилиндричното тяло са поставени четири междинни закоравяващи пръстена. Те са изпълнени от ъглов профил L100×10, заварен на ребро.

#### **Силоз № 5**

- а) коничната фуния е поставена на  $h = 0$  mm над опората;
- б) на височина  $h = 1100$  mm има пръстен, до който достигат вертикални закоравяващи ребра. Те са поставени само отвън на цилиндричното тяло;
- в) няма междинни закоравяващи пръстени по цилиндричното тяло.

#### **Силоз № 6**

Аналогичен на **Силоз № 5**, но по цилиндричното тяло са поставени четири междинни закоравяващи пръстена. Те са изпълнени от ъглов профил L100×10, заварен на ребро.

За да се отчете ефектът от височината на пръстеновидната греда, коничната фуния и пръстенът от ъглов профил L100×10 са поставени на три различни височини над опората – при  $h = 1100$  mm,  $h = 800$  mm и  $h = 500$  mm. Вертикалните закоравяващи ребра достигат до закоравяващия пръстен, т.е. до горния пояс на пръстеновидната греда.

Предвид факта, че при изследвания силоз с обем  $V = 110$  m<sup>3</sup> и осем опори поставянето на междинни пръстени няма практически ефект, такива не са поставяни.

#### Силоз № 7

- а) коничната фуния е поставена на височина  $h = 800$  mm над опората;
- б) срещу нея, на същата височина, е поставен пръстен, до който достигат вертикални закоравяващи ребра. Те са поставени отвън и отвътре на цилиндричното тяло, над колоните;

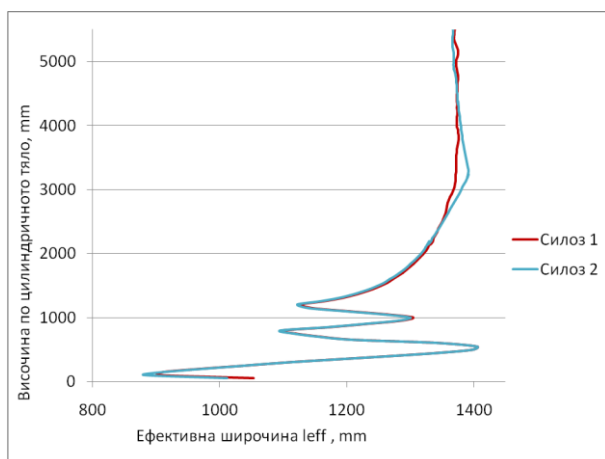
#### Силоз № 8

- а) коничната фуния е поставена на височина  $h = 500$  mm над опората;
- б) срещу нея, на същата височина, е поставен пръстен, до който достигат вертикални закоравяващи ребра. Те са поставени отвън и отвътре на цилиндричното тяло, над колоните.

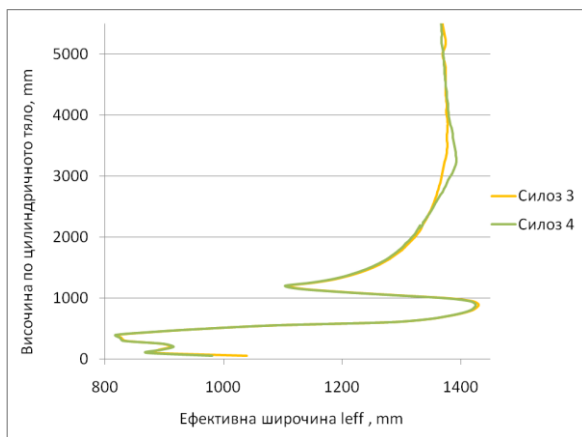
### 3. Резултати

#### 3.1. Отчитане на ефекта от наличието на междинни пръстени по цилиндричното тяло

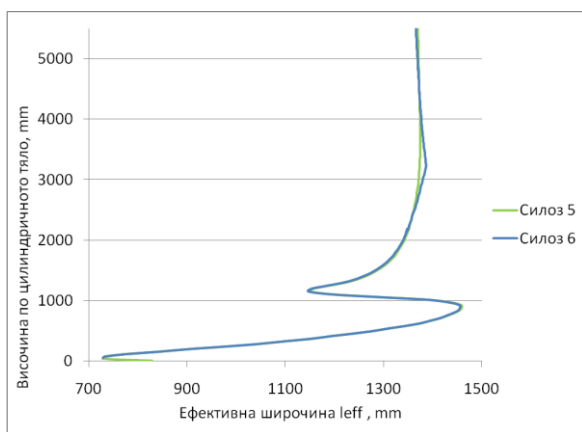
От графиките на фиг. 4 се вижда, че при силоз с 8 колони (опори), поставянето на междинни пръстени по височина оказва много малко влияние върху мембранните нормални напрежения  $\sigma_{x,Ed}$ , респективно ефективната широчина  $l_{eff}$ .



а) изменение на ефективната широчина  $l_{eff}$  при силози 1 и 2



б) изменение на ефективната ширина  $l_{eff}$  при силози 3 и 4



в) изменение на ефективната ширина  $l_{eff}$  при силози 5 и 6

**Фиг. 4. Изменение на ефективната ширина  $l_{eff}$  в зависимост от наличието на междинни закоравяващи пръстени**

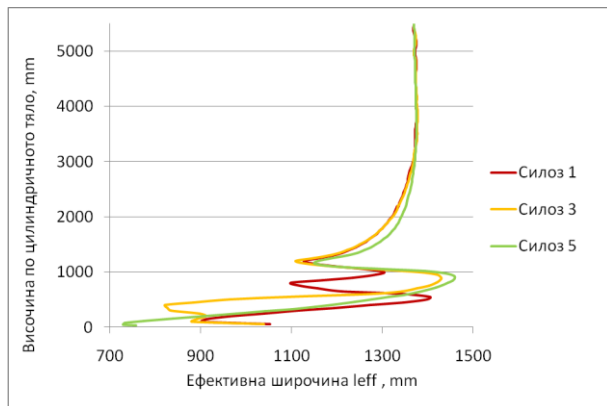
При силози 2, 4 и 6, на височини  $h = 2500 \div 4000$  mm, са изчислени ефективни широчини  $l_{eff}$  по-големи от максималната възможна стойност  $l_{eff,max} = 1368,6$  mm. Подобен феномен е отчетен и в изследване на *Knoedel* и *Ummenhofer* [7]. Най-вероятно това разминаване с реалността се дължи на факта, че на достатъчно голяма височина стойностите на напреженията  $\sigma_{x,Ed}$  между опорите стават по-големи от тези над тях, вж. фиг. 7. Оттам и ефективната ширина  $l_{eff}$ , определена по формула (1) се получава нереалистично голяма.

### 3.2. Отчитане на ефекта от различното ниво на присъединяване на коничната фуния

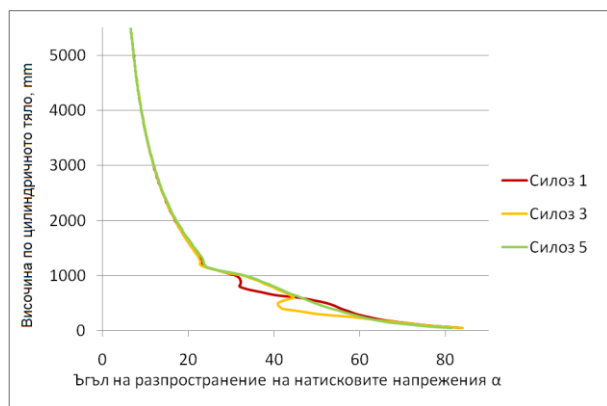
От графиките на фиг. 5 се вижда, че снаждането на коничната фуния с цилиндричното тяло в неговия долен ръб (Силоз № 5) води до по-бързо изравняване на меридианните нормални напрежения  $\sigma_{x,Ed}$  над пръстена на височина  $h = 1100$  mm. При снаждане

на фунията на ниво  $h = 1100 \text{ mm}$  и  $h = 550 \text{ mm}$  почти няма разлика в нормалните напрежения  $\sigma_{x,Ed}$ , респективно в ефективната ширина  $l_{eff}$ .

В цилиндричната черупка над най-долния пръстен, до който достигат вертикалните ребра, ъгълът на разпространение  $\alpha$  на натисковите напрежения не зависи от мястото на присъединяване на коничната фуния.



а) изменение на ефективната ширина  $l_{eff}$  при силози 1, 3 и 5



б) изменение на ъгъла на разпространение  $\alpha$  при силози 1, 3 и 5

**Фиг. 5.** Изменение на ефективната ширина  $l_{eff}$  и на ъгъла на разпространение  $\alpha$  в зависимост от нивото на присъединяване на коничната фуния

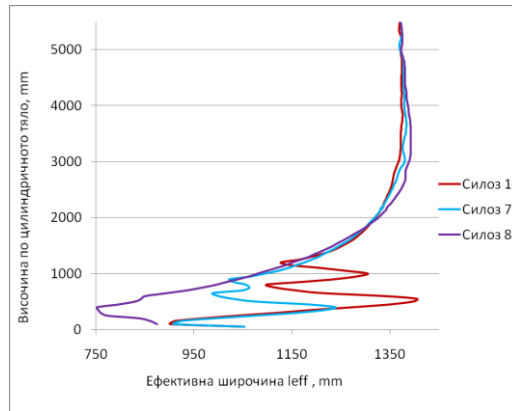
### 3.3. Отчитане на ефекта от различната височина на пръстеновидната греда

Очевидно, колкото по-ниско е поставен опорният пръстен, до който достигат вертикалните закоравяващи ребра, толкова по-малка ще е стойността на  $l_{eff}$  над въпросния пръстен, вж. фиг. 6. Освен това при по-ниската „пола“ са изчислени ефективни широчини  $l_{eff}$ , по-големи от максималната възможна стойност  $l_{eff,max}$ .

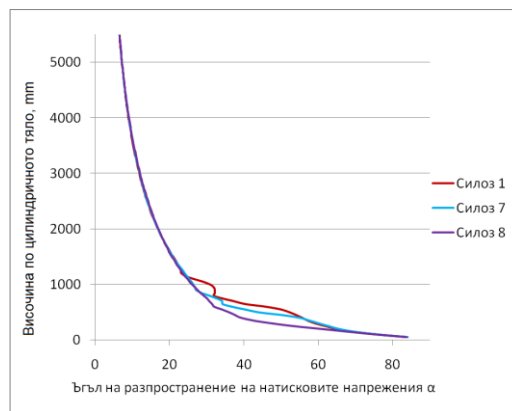
В зоната над най-високо поставения опорен пръстен, т.е.  $h > 1100 \text{ mm}$ , разликите в стойностите на  $l_{eff}$  и  $\alpha$  са малки.



В зоната под най-високо поставения опорен пръстен, т.е.  $h < 1100$  mm, ъгълът на разпространение  $\alpha$  на натисковите напрежения е по-голям при по-ниска пръстеновидна греда („пола“).



а) изменение на ефективната ширина  $l_{eff}$



б) изменение на ъгъла на разпространение  $\alpha$

**Фиг. 6. Изменение на ефективната ширина  $l_{eff}$  и на ъгъла на разпространение  $\alpha$  в зависимост от нивото на опорния пръстен**

Видимо стойностите на ъгъла  $\alpha$  намаляват по височина. Но за щастие, ефективната ширина  $l_{eff}$  нараства, вж. фиг. 4 и фиг. 6. Практическото последствие от това е, че ако стойностите на  $l_{eff}$  бъдат определени за точка, намираща се на разстояние  $l_R$  над закоравяващия пръстен, до който достигат вертикалните ребра, и те бъдат използвани впоследствие при аналитични изчисления, тези стойности ще са консервативни, в посока на сигурността.

Разстоянието  $l_R$  се определя чрез израза [2]:

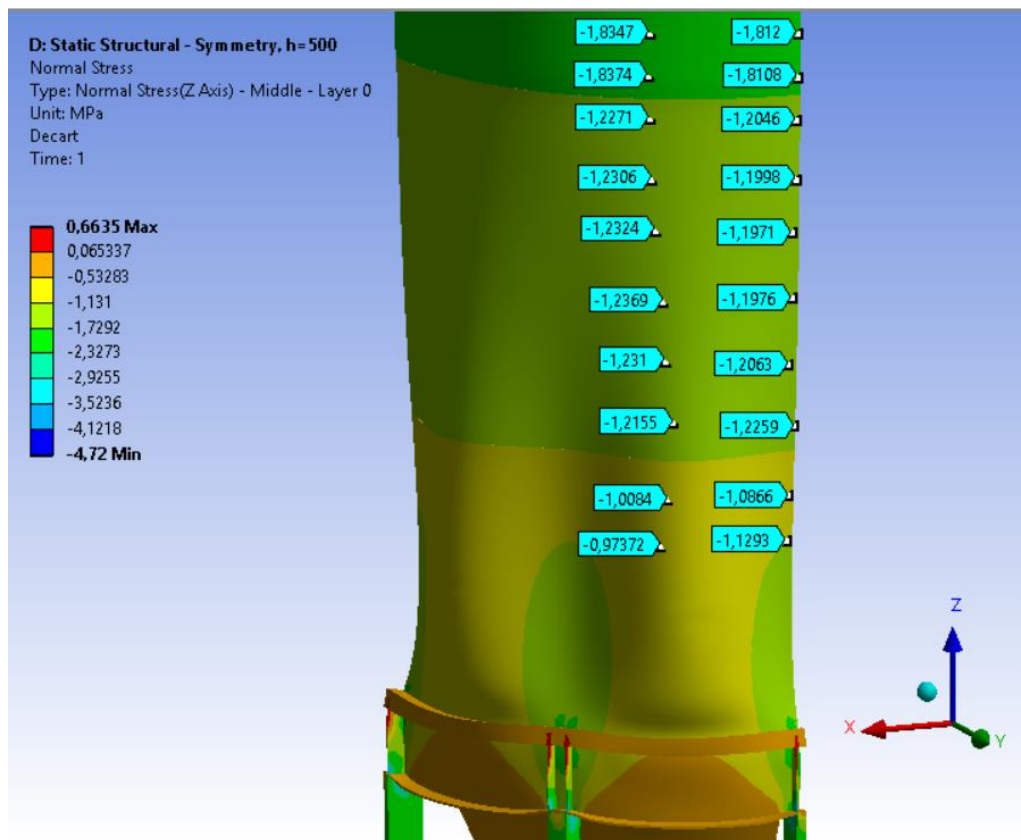
$$l_R = 0,1L \leq 0,16r \sqrt{\frac{r}{t}} \quad , \quad (3)$$

където  $L$  е разстоянието между пръстените, укрепващи цилиндричното тяло на силоза;

$r$  – радиусът на цилиндричното тяло;

$t$  – дебелината на цилиндъра.

Интересен ефект е наблюдаван в настоящото изследване – при отдалечаване от опорите би следвало да има изравняване на стойностите на меридианните нормални напрежения  $\sigma_{x,Ed}$  в едно хоризонтално сечение, но всъщност това не се случва. Нещо повече, на достатъчно голяма височина стойностите на напреженията  $\sigma_{x,Ed}$  между опорите стават по-големи от тези над тях, вж. фиг. 7.



Фиг. 7. Изменение на меридианните нормални напрежения  $\sigma_{x,Ed}$  по височина

#### 4. Заключение

От настоящото изследване, проведено с един сравнително малък стоманен силос, но в 8 различни варианта, могат да се направят следните изводи:

- при условие, че се запазва положението на закоравяващия пръстен, до който достигат вертикални опорни ребра, промяната на мястото на закрепване на фунията към цилиндъра оказва много слабо влияние;

- при силози с малък диаметър и 8 колони междинните пръстени оказват пренебрежимо малко влияние върху разпределението на меридианните (осовите) натискови напрежения;
- ъгълът на разпространение  $\alpha$ , определен за напрежения  $\sigma_{x,Ed}$ , отчетени непосредствено над закоравяващия пръстен, до който достигат вертикалните ребра, е в границите  $\alpha = 25^\circ \div 40^\circ$ . С други думи използването на резултатите на *Whitmore* [8], посочващи, че ъгълът  $\alpha = 30^\circ$ , е достатъчно добро при първоначалните „ръчни“ изчисления на стоманени силози. След тяхното провеждане следва да се създаде и анализира пространствен изчислителен модел. При него вече ще бъдат определени реалните стойности на напреженията в зоната на опорите;
- ъгълът на разпространение  $\alpha$  намалява при нарастване на височината  $z$ , но ефективната широчина  $l_{eff}$  непрекъснато нараства до достигане на максималната си стойност;
- не се наблюдава цялостно изравняване на стойностите на меридианните нормални напрежения  $\sigma_{x,Ed}$  в едно хоризонтално сечение.

## ЛИТЕРАТУРА

1. БДС EN 1993-1-5:2007, Проектиране на стоманени конструкции. Пълностенни конструктивни елементи.
2. БДС EN 1993-1-6:2007, Проектиране на стоманени конструкции. Якост и устойчивост на черупкови конструкции.
3. БДС EN 1993-4-1:2007, Проектиране на стоманени конструкции. Силози.
4. БДС EN 10025-2:2005, Горещовалцувани продукти от конструкционни стомани. Част 2: Технически условия на доставка за нелегирани конструкционни стомани.
5. *Здравков, Л. А.* Някои особености при проектиране на стоманен силос с обем  $V = 110 \text{ m}^3$ . Международна юбилейна научна конференция „75 години УАСГ“, София, 2017.
6. ANSYS, Inc., Canonsburg, Pennsylvania, the U.S.A.
7. *Knödel, P. and Ummenhofer, T.* Silos with stepped wall thickness on local supports, Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009, Valencia.
8. *Whitmore, R. E.* Experimental Investigation of Stresses in Gusset Plates, Bulletin No. 16, Engineering Experiment Station, University of Tennessee, May 1952.

# INFLUENCE OF THE INTERMEDIATE RINGS AND HEIGHT OF THE SKIRT ON THE EFFECTIVE WIDTH OF THE COMPRESSION ZONE IN THE COLUMN – CYLINDRICAL SHELL JUNCTION OF A STEEL SILO

L. Zdravkov<sup>1</sup>

*Keywords: steel silo, intermediate rings, compression zone, effective width*

## ABSTRACT

Steel silos are interesting, complicated facilities. When they are raised above the ground, they combine shell and frame elements. In the places where the 2 types of elements join stresses arise with very high values. It may lead to local loss of stability of thin-walled shells. One point of discussion is how to determine the effective width  $l_{\text{eff}}$  of the distribution of compressive stresses of the supports along the shell height. Unfortunately, the BDS EN 1993-1-6:2007 and BDS EN 1993-4-1:2007 reference standards do not give an answer to this question. Obviously there are a lot of influencing factors and it is very difficult to be covered in an analytical expression and/or table.

In his research the author has analyzed the impact of:

- the presence of the intermediate stiffening rings on the cylindrical shell;
- the position of the discharge hopper along the height.

---

<sup>1</sup> Lyubomir Zdravkov, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. “Steel, Timber and Plastic Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: zdravkov\_fce@uacg.bg