

ВЛИЯНИЕ НА ГЕОМЕТРИЧНИТЕ НЕСЪВЪРШЕНСТВА В ЦИЛИНДРИЧНИ СТОМАНЕНИ ЧЕРУПКИ, ПОДЛОЖЕНИ НА ОСОВ НАТИСК

доц. д-р инж. Любомир А. Здравков

катедра „МДПК“, Строителен факултет, УАСГ
София 1046, бул. „Христо Смирненски“ №1, България
e-mail: zdravkov_fce@uacg.bg

АБСТРАКТ

Класическият израз за критичните натискови напрежения в цилиндрични черупки в меридианно направление $\sigma_{x,Rcr}$ е изведен аналитично от Lorenz, Тимошенко и Southwell в началото на XX век. При направените по-късно натурни експерименти с тези черупки се е оказало, че напреженията, при които те губят устойчивост значително се различават от получените по аналитичния израз. През 1945 г. Koiter изказва предположението, че основната причина за разликите между теоретично и експериментално определената носимоспособност на стоманените черупки са несъвършенствата в тях. В дисертацията на М. Tekleab е направен опит за определяне на най-неблагоприятните геометрични несъвършенства в осово натиснати цилиндрични черупки. Срецайки множество неверни резултати и заключения в научни публикации, авторът е решил да провери направените в нея изводи.

Keywords: тънкостенни стоманени черупки, осови (меридианни) напрежения, несъвършенства, загуба на устойчивост

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Класическият израз за критичните натискови напрежения в цилиндрични черупки в меридианно направление $\sigma_{x,Rcr}$, до който Lorenz [1], Тимошенко [2] и Southwell [3] достигат, има вида:

$$\sigma_{x,Rcr} = \frac{Et}{R\sqrt{3(1-\nu^2)}} \approx 0,605E \frac{t}{R}, \quad (1)$$

където E е модулът на еластичността на стоманата;

t – дебелината на стената на цилиндричната черупка;

R – радиусът на цилиндричната черупка, с кръгла в план основа;

$\nu = 0,3$ – коефициент на Poisson за стомана.

От формула (1) може да се направи извода, че в идеалните черупки без несъвършенства в тях критичните нормални напрежения $\sigma_{x,Rcr}$ не зависят от границата на провлачане на стоманата или от нейната якост на опън.

Когато по-късно са направени натурни експерименти за определяне на критичните напрежения в центрично натиснати тънкостенни цилиндрични стоманени черупки се е оказало, че резултатите значително се различават от получените по формула (1). Експерименталните стойности за $\sigma_{x,Rcr}$ достигали някъде до 1/3 от

получените по аналитичен път [4]. През 1945 г. Koiter [5] изказва предположението, че основната причина за разликите между теоретично и експериментално определената носимоспособност на стоманените черупки при местна загуба на устойчивост, са несъвършенствата в тях. Тези несъвършенства са неизбежни тъй като се получават като резултат от производствените и монтажните процеси, необходими за реализацията на стоманените черупки. За отчитане на влиянието на началните несъвършенства са направени множество аналитични и експериментални изследвания. Заключениеята на всички тях са, че тънкостенните цилиндрични черупки с кръгла основа са много чувствителни към началните отклонения от идеалната цилиндрична форма. Например резултатите от изследванията на Koiter [6, 7] показват, че ако амплитудата на началните радиални премествания е равна на дебелината на цилиндричната черупка, това драстично намалява критичните нормални напрежения. Техните стойности са само 20% от определените за идеален цилиндър.

За съжаление, отклоненията от идеалната цилиндрична форма могат да имат много форми и амплитуди, което превръща определянето на най-неблагоприятния им вид и размери в истинско предизвикателство [8]. Важно е несъвършенствата да бъдат реалистични, отчитайки начина на производство на

стоманените черупки. Например, настоящите формули за ръчно изчисляване са получени емпирично, след провеждане на множество лабораторни опити, чрез които е определена най-ниската носеща способност на черупката, преди тя да се изкоруби. Тъй като изследваните образци са произведени в лабораториите, тяхното качество, респективно - несъвършенства, е съвсем различно от пълноразмерните, реални черупки [9].

В общия случай несъвършенствата рязко снижават носещата способност на стоманените черупки, но понякога, при дълбоки несъвършенства, последните могат да доведат до увеличаване на устойчивостта на черупката. Като пример могат да бъдат посочени дълбоки несъвършенства, които предизвикват форми на загуба на устойчивост, обхващащи цялата дължина на черупката [10].

При стоманените черупки процесът за откриване кои са най-неблагоприятните несъвършенства в тях е допълнително затруднен поради множеството взаимно влияещи си форми на изкорубване, което води до различна чувствителност към геометричните несъвършенства. Например, много цилиндрични черупки са подложени на комплексно натоварване от осов (меридианен) натиск и пръстеновидно налягане. Несъвършенствата, даващи най-ниска носеща способност за осов натиск са съвсем различни от тези за пръстеновидно налягане. Първите са местни, докато вторите следва да се разпростират върху голяма дължина. Когато добавим, че реалните черупки са натоварени с неравномерно разпределени или концентрирани товари, става съвсем трудно да се определи коя е най-неблагоприятната им форма [9].

Според стандарт EN 1993-1-6:2007 [11] максималните дълбочини $\Delta\omega_{0x}$ на несъвършенствата са в зависимост от дължините l_{gx} , виж фиг. 3, и се определят по формулите:

$$\Delta\omega_{0x} = U_{0x} \cdot l_{gx}, \quad (2)$$

$$l_{gx} = 4\sqrt{Rt} \quad (3)$$

Параметърът U_{0x} зависи от качеството на изпълнение на цилиндричната черупка и максималните му стойности могат да бъдат отчетени от Таблица 1:

Таблица 1. Стойности на параметъра $U_{0x,max}$ [11]

Клас по качество при производство	Описание	$U_{0x,max}$
Клас А	отлично	0,006
Клас В	високо	0,010
Клас С	нормално	0,016

В дисертацията на М. Tekleab [12] е направен опит за определяне на най-неблагоприятните геометрични несъвършенства в осово натиснати цилиндрични черупки. В нея, при дълбочина на

несъвършенствата $\Delta\omega_{0x} = t$, са достигнали до следните изводи:

а) най-неблагоприятни са несъвършенства с дължини приблизително $l_{gx} = 2\sqrt{Rt}$;

б) ориентираните навън несъвършенства са по-неблагоприятни.

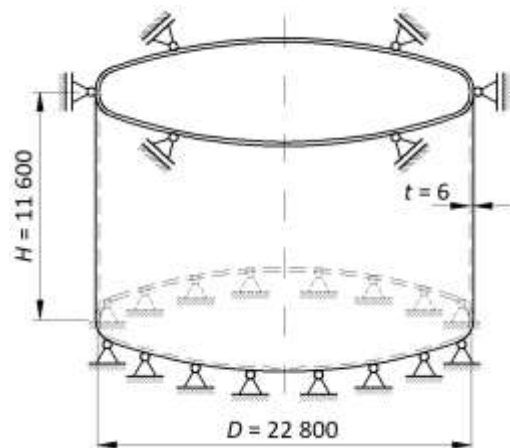
Освен това, нарастването на стойностите на дълбочината на несъвършенствата $\Delta\omega_{0x}$ води до по-ниска носимоспособност при осов натиск. Тук отново по-неблагоприятни са несъвършенствата, които са ориентирани навън и имащи дължина $l_{gx} = 2\sqrt{Rt}$.

2. АНАЛИЗ

Тъй като е срещал множество неверни резултати и заключения в научни публикации, авторът е решил да провери направените по-горе изводи. За целта той е използвал данните от извършено геодезическо заснемане чрез лазерно сканиране [13] на отклоненията на цилиндричен корпус на резервоар за мазут с обем $V = 5\,000\text{ m}^3$, намиращ се в експлоатация. Въпросният резервоар е изпълнен по рулонен способ съгласно Типовата серия [14] и е въведен в експлоатация през 1986 г. След поява на теч в зоната на фундамента съоръжението е изведено от експлоатация, изпразнено и почистено. Чрез лазерно сканиране е направено заснемане на корпуса и са определени отклоненията му от проектната цилиндрична форма. Предоставени са данни за 72 точки, разположени в четири вертикални и девет хоризонтални равнини.

За целите на настоящото изследване, чрез програмен продукт ANSYS [15] е моделирана стоманената черупка на корпуса на резервоара, имаща следните параметри:

а) диаметър при дъното $D = 22\,800\text{ mm}$ и височина $H = 11\,600\text{ mm}$, виж фиг. 1;



Фиг. 1. Изследвана черупка. Размери и условия на подпиране

б) приета е постоянна дебелина на корпуса, със стойност $t = 6\text{ mm}$, колкото е в най-горните пояси на този тип резервоар;

в) условията на подпирание са както следва:

- долен край – ограничаване на преместването във всички направления, но с възможност за свободно завъртане;
- горен край – ограничаване на преместването в хоризонталната равнина, но с възможност за свободно завъртане и преместване по вертикалната ос, виж фиг. 1.

г) възприетите в настоящото изследване изчислителни стойности на товарите са:

- сняг по покрива – $s = 1,5$ kPa;
- подналягане (вакуум), приложено само върху покрива, т.е. осово – $p_v = 0,5$ kPa.

Сумарното натоварване е приложено върху горния край на черупката и представлява равномерен, линейно разпределен товар q , със стойност, определен по формулата:

$$q = (s + p_v) \frac{D}{4} = (1,5 + 0,5) \frac{22,8}{4} = 11,4 \text{ kN/m} \quad (4)$$

Меридианното (осовото) нормално напрежение $\sigma_{x,Ed}$ е:

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{q}{t} = \frac{11,4}{0,006} = 1900 \text{ kN/m}^2 \quad (5)$$

д) за моделирането на черупката е използван 2D елемент shell281. Методът за неговото създаване е “Quadrilaterals”. Крайните елементи са четириъгълни, с 8 възела - в ръбовете и в средата на страните. Максималният размер на елементите е 200 mm;

е) в отделни, независими подмоделите на черупката са въведени начални геометрични несъвършенства. Те биват:

- реални – това са реално измерените чрез лазерното сканиране отклонения от идеалната цилиндрична форма;
- синтетични – определени съгласно указанията на стандарт EN 1993-1-6:2007. Те са симетрично разположени спрямо вертикалната ос, по цялата обиколка на черупките. Започват на разстояние $0,1.H = 1160$ mm от долния ръб на черупката.

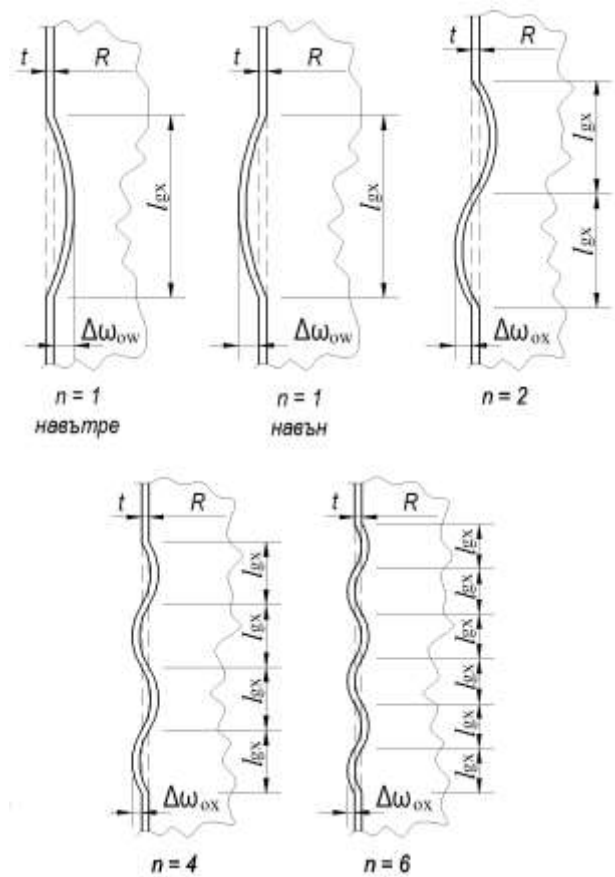
ж) дължините l_{gx} на синтетичните несъвършенства имат две стойности:

- $l_{gx,1} = 4\sqrt{Rt} = 4\sqrt{11400,6} = 1046$ mm
- $l_{gx,2} = 2\sqrt{Rt} = 2\sqrt{11400,6} = 523$ mm

з) радиалните отмествания $\Delta\omega_{ox}$ на синтетичните несъвършенства са:

- $\Delta\omega_{ox,1} = t = 6$ mm;
- $\Delta\omega_{ox,2} = 0,5\Delta\omega_{ox,4} = 0,5 \cdot 16,74 = 8,37$ mm;
- $\Delta\omega_{ox,3} = 2t = 12$ mm;
- $\Delta\omega_{ox,4} = U_{ox} \cdot l_{gx,1} = 0,016 \cdot 1046 = 16,74$ mm [11];
- $\Delta\omega_{ox,5} = 3t = 18$ mm.

и) синтетичните несъвършенства имат формите, показани на фиг. 2.



Фиг. 2. Геометрични несъвършенства в меридианно направление на черупката. Форми

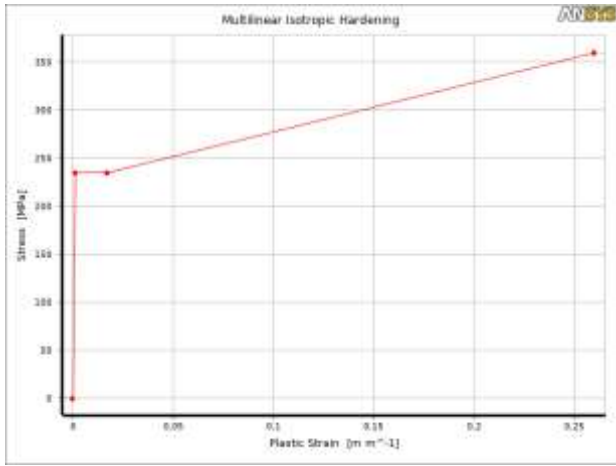
й) тънкостенните черупки са чувствителни към ефекти от промяна в геометрията по време на натоварване. Поради тази причина всички модели са изследвани с отчитане на геометричната нелинейност (GNA);

к) в моделите на черупката е използвана стомана S235. Нейните механични показатели са съгласно стандарт EN 10025-2:2004 [16]:

- граница на провлачане – $f_y = 235$ MPa;
- модул на еластичност – $E = 210\,000$ MPa;
- коефициент на Poisson – $\nu = 0,3$.

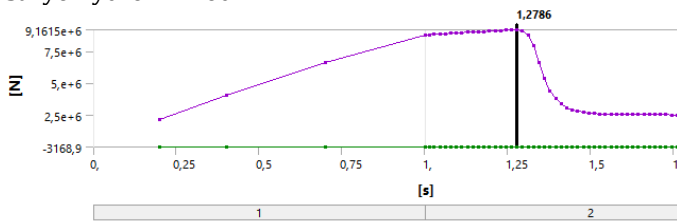
Проведено е изследване за всяка една от моделираните черупки, имаща различен брой полуълни n и дълбочина на несъвършенствата $\Delta\omega_{ox}$. Самото изследване се състои от две части. В първата е активирана опцията „Buckling Analysis”. Чрез тази опция ще бъде определен резервът от носеща способност K (eigenvectors) при еластично (линейно) поведение на материала. Той ни дава информация за влиянието на различните геометрични несъвършенства (GNA) върху носещата способност на осово натоварената цилиндрична черупка и линейно поведение на материала.

Във втората част на изследването е отчетена материалната нелинейност на стоманата (MNA). За целта, зависимостта между напреженията σ и деформациите ϵ е моделирана като трилинейна, виж фиг. 3.



Фиг. 3. Идеализирана работна диаграма $\sigma - \varepsilon$

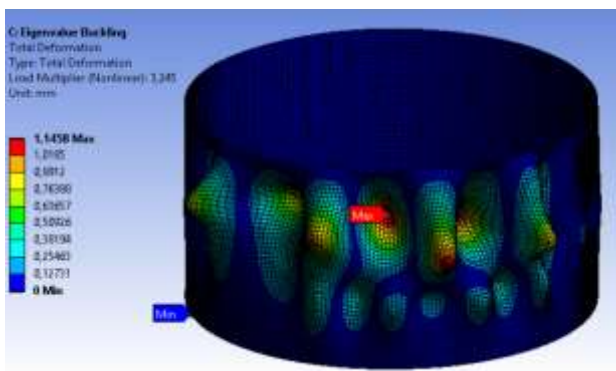
В горния край на цилиндричната черупка е въведено вертикално преместване и е отчитана породената от него вертикална опорна реакция в основата. Изменението на опорната реакция във времето е показана на фиг. 4. Най-голямата е носимоспособността на осово натиснатата черупка с геометрични несъвършенства, преди да загуби устойчивост.



Фиг. 4. Промяна на вертикалната опорна реакция по време на натоварване

3. РЕЗУЛТАТИ

На първо място е отчетен резервът на носеща способност K на черупките при загуба на устойчивост в първа форма, в еластичен стадий, виж фиг. 5. Резултатите от направеното изследване са показани в Таблица 2 и 3.



Фиг. 5. Загуба на устойчивост на реалната цилиндрична черупка в първа форма

Таблица 2. Стойности на резерва K при дължина на несъвършенството $l_{gx,1} = 1\ 046\ \text{mm}$

Брой полу-вълни	$\Delta\omega_{ox} / t$				
	1	1,395	2	2,79	3
1 навън	17,145	13,636	10,494	8,517	8,197
1 вътре	12,306	10,605	10,771	13,010	13,709
2	9,280	7,830	7,968	9,505	10,049
4	6,950	5,151	4,001	3,570	3,580
6	6,123	4,338	3,139	2,516	2,302

Таблица 3. Стойности на резерва K при дължина на несъвършенството $l_{gx,2} = 523\ \text{mm}$

Брой полу-вълни	$\Delta\omega_{ox} / t$				
	1	1,395	2	2,79	3
1 навън	17,191	14,033	11,323	9,612	9,338
1 вътре	14,235	13,905	15,289	17,777	18,388
2	11,182	11,163	11,889	12,767	12,983
4	7,434	6,283	5,627	5,391	5,344
6	6,613	6,069	4,935	5,023	4,066

Когато са известни стойностите на осовите нормални напрежения $\sigma_{x,Ed}$ в черупката и резервът на носеща способност K при линейно поведение на стоманата, чрез формула (6) можем да получим носещата способност на черупката $\sigma_{x,Rk,FEA}$ преди да се изкоруби :

$$\sigma_{x,Rk,FEA} = K \cdot \sigma_{x,Ed} \quad (6)$$

Коефициентът на запас на носеща способност K за реално измерената черупка при така приложения товар е $K = 4,245$.

Критичните нормални напрежения в черупката с реално измерени чрез лазерно сканиране деформации е $\sigma_{x,Rk,FEA} = 0,806\ \text{kN/cm}^2$.

Стойностите на $\sigma_{x,Rk,FEA}$ са показани в Таблица 4 и Таблица 5.

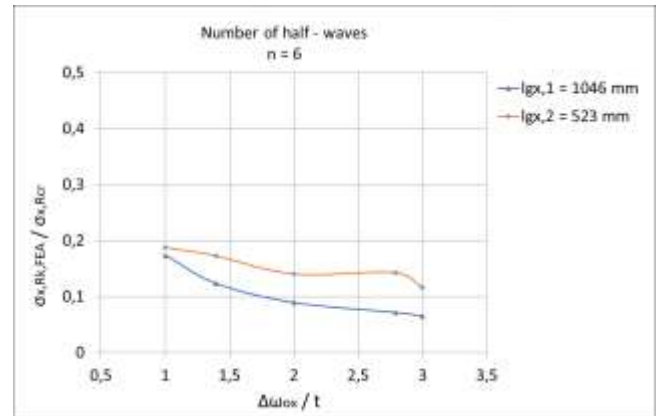
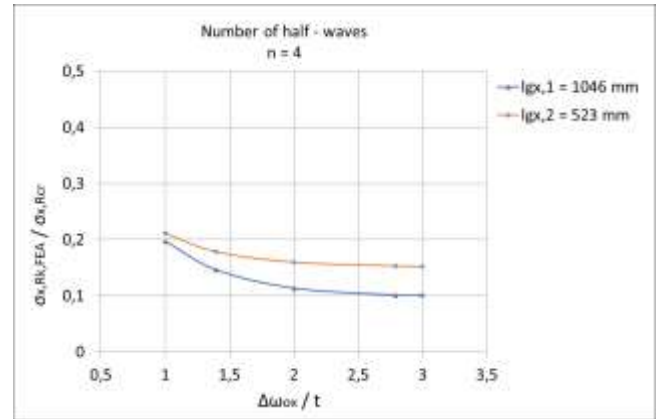
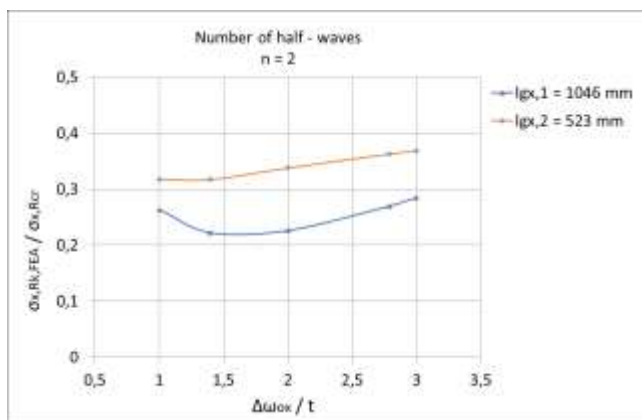
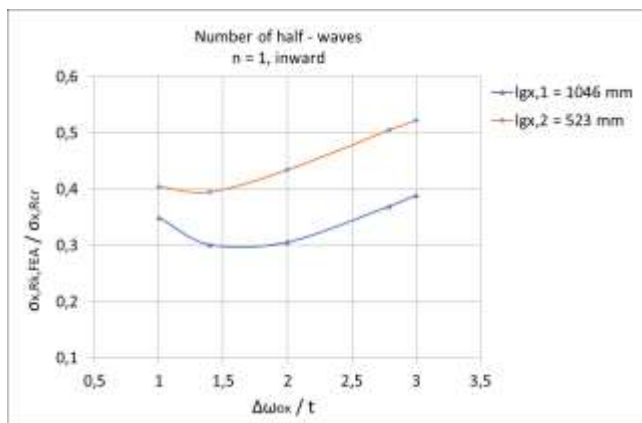
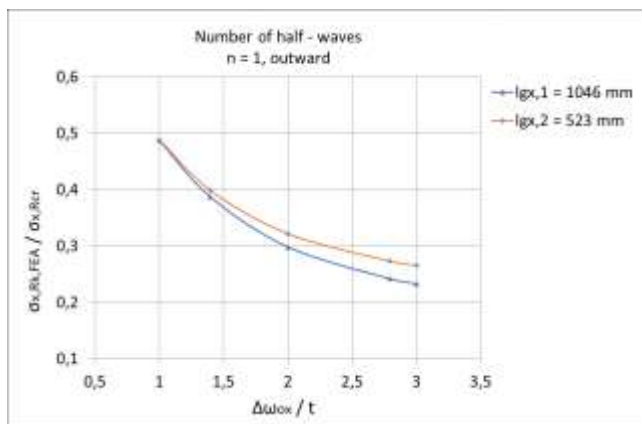
Таблица 4. Критични нормални напрежения $\sigma_{x,Rk,FEA} = K \cdot \sigma_{x,Ed},\ \text{kN/cm}^2$, при дължина на несъвършенството $l_{gx,1} = 1\ 046\ \text{mm}$

Брой полу-вълни	$\Delta\omega_{ox} / t$				
	1	1,395	2	2,79	3
1 навън	3,258	2,591	1,994	1,618	1,557
1 вътре	2,338	2,015	2,046	2,472	2,605
2	1,763	1,488	1,514	1,806	1,909
4	1,320	0,979	0,760	0,678	0,680
6	1,163	0,824	0,596	0,478	0,437

Таблица 5. Критични нормални напрежения $\sigma_{x,Rk,FEA} = K \cdot \sigma_{x,Ed}$, kN/cm^2 , при дължина на несъвършенството $l_{gx,2} = 523 \text{ mm}$

Брой полу-вълни	$\Delta\omega_{ox} / t$				
	1	1,395	2	2,79	3
1 навън	3,266	2,666	2,151	1,826	1,774
1 вътре	2,705	2,642	2,905	3,378	3,494
2	2,125	2,121	2,259	2,426	2,467
4	1,412	1,194	1,069	1,024	1,015
6	1,256	1,153	0,938	0,954	0,772

Изменението на носещата способност на черупка с несъвършенства $\sigma_{x,Rk,FEA}$, отнесена към носимоспособността на идеална цилиндрична черупка $\sigma_{x,Rcr}$, виж форм. 1, е показана на фиг. 6.



Фиг. 6. Промяна в отношението $\sigma_{x,Rk,FEA} / \sigma_{x,Rcr}$ В зависимост от дълбочината на несъвършенството

От направеното изследване на стоманена черупка с геометрични несъвършенства и еластично поведение на материала, могат да бъдат направени следните изводи:

- несъвършенства с дължина $l_{gx,1} = 4\sqrt{Rt}$ са винаги по-неблагоприятни в сравнение с несъвършенства, имащи дължина $l_{gx,2} = 2\sqrt{Rt}$;
- сравнявайки носимоспособностите на черупката с реално измерени несъвършенства и тези със синтетични несъвършенства, при $\Delta\omega_{ox} = U_{ox} \cdot l_{gx,1}$, най-близки стойности се получават когато:
 - дължината на несъвършенствата е $l_{gx,1} = 4\sqrt{Rt}$ и $n = 4$ броя полу-вълни;
 - дължината на несъвършенствата е $l_{gx,2} = 2\sqrt{Rt}$ и $n = 6$ броя полу-вълни.

в) насочените навън единични полу-вълни са по-неблагоприятни от насочените навътре, когато отношението $\Delta\omega_{ox} / t \geq 2$

Получените във втората част на изследването резултати, когато материалната нелинейност на стоманата е включена в анализа, са показани в Таблица 6 и 7.

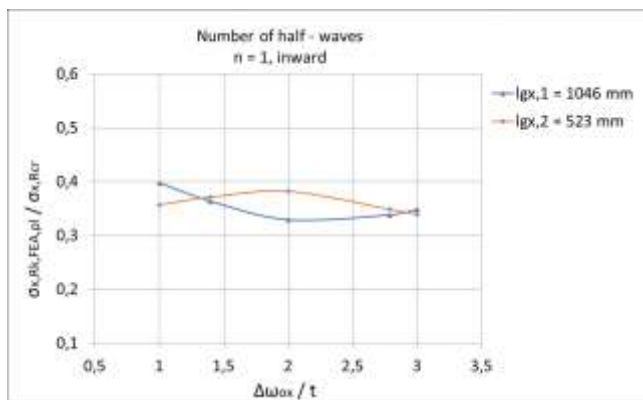
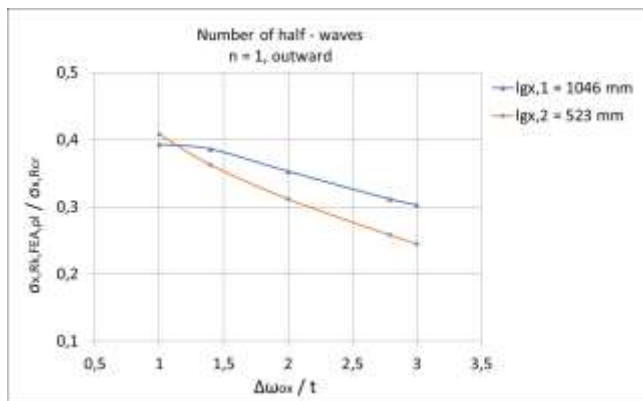
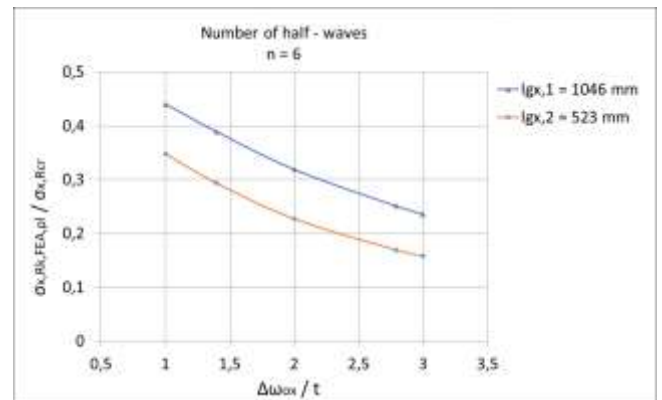
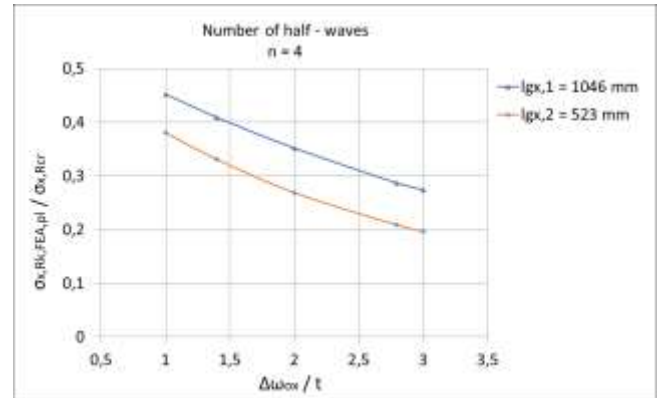
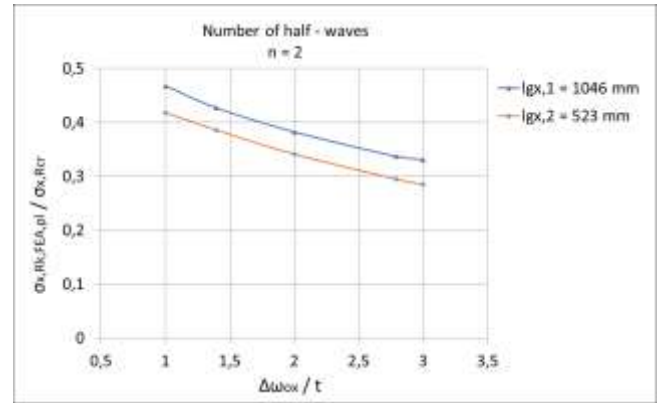
Таблица 6. Критични нормални напрежения $\sigma_{x,Rk,FEA,pl}$, kN/cm², при дължина на несъвършенството $l_{gx,1} = 1\ 046$ mm

Брой полу-вълни	$\Delta\omega_{ox} / t$				
	1	1,395	2	2,79	3
1 навън	2,627	2,581	2,360	2,085	2,026
1 вътре	2,657	2,429	2,197	2,257	2,328
2	3,130	2,856	2,556	2,252	2,212
4	3,025	2,737	2,353	1,921	1,834
6	2,942	2,602	2,132	1,680	1,579

Таблица 7. Критични нормални напрежения $\sigma_{x,Rk,FEA,pl}$, kN/cm², при дължина на несъвършенството $l_{gx,2} = 523$ mm

Брой полу-вълни	$\Delta\omega_{ox} / t$				
	1	1,395	2	2,79	3
1 навън	2,726	2,425	2,082	1,723	1,636
1 вътре	2,385	2,481	2,554	2,328	2,264
2	2,790	2,579	2,280	1,970	1,905
4	2,546	2,216	1,797	1,396	1,312
6	2,327	1,963	1,516	1,129	1,053

Критичните нормални напрежения в черупката с реално измерени чрез лазерно сканиране деформации е $\sigma_{x,Rk,FEA,pl} = 1,612$ kN/cm².
Изменението на носещата способност на черупка с несъвършенства $\sigma_{x,Rk,FEA,pl}$, отнесена към носимоспособността на идеална цилиндрична черупка $\sigma_{x,Rcr}$ виж форм. 1, е показана на фиг. 7.



Фиг. 7. Промяна в отношението $\sigma_{x,Rk,FEA,pl} / \sigma_{x,Rcr}$ В зависимост от дълбочината на несъвършенството

Във втората част изследването, проведено при нелинейно поведение на стоманата, може да се види, че:

- несъвършенства с дължина $l_{gx,2} = 2\sqrt{Rt}$ в повечето случаи са по-неблагоприятни в сравнение с несъвършенства, имащи дължина $l_{gx,1} = 4\sqrt{Rt}$;
- сравнявайки носимоспособностите на черупката с реално измерени несъвършенства и тези със синтетични несъвършенства, при $\Delta\omega_{ox} = U_{ox} \cdot l_{gx,1}$, най-близки стойности се получават когато:
 - дължината на несъвършенствата е $l_{gx,1} = 4\sqrt{Rt}$ и $n = 6$ броя полу-вълни;
 - дължината на несъвършенствата е $l_{gx,2} = 2\sqrt{Rt}$ и $n = 4$ броя полу-вълни.

в) насочените навън единични полувълни са по-неблагоприятни от насочените навътре, когато отношението $\Delta\omega_{ox} / t \geq 2,5$.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От направеното по-горе изследване на стоманена черупка с диаметър $D = 22\,800$ mm, височина $H = 11\,600$ mm, постоянна дебелина $t = 6$ mm и геометрични несъвършенства, могат да се направят следните изводи:

- а) при черупки, подложени на осов натиск, несъвършенствата с дължина $l_{gx,1} = 4\sqrt{Rt}$ са винаги по-неблагоприятни от несъвършенствата с дължина $l_{gx,2} = 2\sqrt{Rt}$, когато отношението $\sigma - \varepsilon$ се променя линейно, т.е. материалът е еластичен;
- б) несъвършенствата с дължина $l_{gx,2} = 2\sqrt{Rt}$ често са по-неблагоприятни от несъвършенствата с дължина $l_{gx,1} = 4\sqrt{Rt}$, когато нелинейното поведение на материала е включено в анализа;
- в) в общия случай, нарастването на дълбочината на несъвършенствата $\Delta\omega_{ox}$ води до намаляване на носещата способност при осов натиск, но тук в някои от случаите се наблюдава точно обратно;
- г) увеличаването на броя на полувълните при синтетичните несъвършенства води до намаляване на носимоспособността на черупката;
- д) насочените навън единични полувълни са по-неблагоприятни от насочените навътре, когато отношението $\Delta\omega_{ox} / t \geq 2,5$.

Вижда се, че някои от резултатите в това изследване, проведено върху черупка със сравнително големи D и H , влизат в противоречие с посочените в дисертацията на *M. Tekleab* [12] изводи. Откъдето пък следва, че ако няма данни от реално измерване и черупката трябва да бъде изследвана със синтетични несъвършенства, тя следва да бъде проверена за няколко дължини на несъвършенствата и брой на полувълните.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. *Lorenz, R.* Achsymmetrische Verzerrungen in dunwandigen Hohlzylinder. Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, vol. 52., pp. 1766-1793, 1908.
- [2]. *Timoshenko, S. P.* Einige Stabilitätsprobleme der Elastizitätstheorie. Zeitschrift für Math. und Physik, vol. 58, pp. 337-385, 1910.
- [3]. *Southwell, R. V.* On the General Theory of Elastic Stability. Philos. Trans. Royal Soc., London, vol. 213, pp. 187 - 244, 1914.
- [4]. *Troitsky, M. S.* Tubular steel structures - Theory and design, Second edition. James F Lincoln Arc Welding Foundation, 1990.
- [5]. *Koiter, W. T.* Over de stabiliteit van het elastisch evenwicht. PhD Thesis, Delft University, 1945.
- [6]. *Koiter, W. T.* Elastic Stability and Postbuckling Behaviour. Proc. of the Sympos. on Nonlinear

Problems Ed., Langer R. E., Univ. of Wisconsin Press, 1963.

[7]. *Koiter, W. T.* On the Elastic Stability of Elastic Equilibrium. Thesis, Polytechnic Institute Delft, Translation by the National Aeronautics and Space Administration, Washington D. C., 1967.

[8]. *Rotter, J. M.* The Practical Design of Shell Structures Exploiting Different Methods of Analysis, in Shell Structures: Theory and Applications. Eds W. Pietraszkiewicz & C Szymczak, Taylor and Francis, London, pp. 71-86, 2005.

[9]. *Rotter, J. M.* Shell buckling design and assessment and the LBA-MNA methodology. Stahlbau, Vol. 80, No. 11, pp. 791-803, Nov. 2011.

[10]. *Rotter, J. M.* "Buckling of cylindrical shells under axial compression", in Buckling of Thin Metal Shells, eds J.G. Teng & J.M. Rotter. Spon, London, pp. 42-87, 2004.

[11]. EN 1993-1-6:2007. Design of steel structures - Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures, European committee for standardization, Brussels.

[12]. *Tekleab, M. B.* Buckling of Thin - Walled Cylindrical & Conical Metal Tanks: Analysis, Test Evaluation & Design. Dissertation, Graz University of Technology, 2009.

[13]. *Antova, G.* Challenges to modelling of point clouds for deformation analysis. Annual of UACEG, vol.51, issue 9, pp. 215-224. Sofia, 2018.

[14]. Standard working documentation of aboveground storage tanks with 100 m³ ÷ 10 000 m³ capacity, built by roll method. MCCM, 1977.

[15]. ANSYS® 2020 R2 Documentation. Ansys Inc., Canonsburg, PA, the USA.

[16]. EN 10025-2:2004. Hot rolled products of structural steels - Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels. November 2004.