



Получена: 20.01.2020 г.

Приета: 27.01.2020 г.

АНКЕРИРАНЕ НА СТОМАНЕНИ ВЕРТИКАЛНИ ЦИЛИНДРИЧНИ РЕЗЕРВОАРИ. ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА ПОВИШАВАНЕ НА НОСЕЩАТА СПОСОБНОСТ

Л. Здравков¹

Ключови думи: стоманен резервоар, анкерен болт, столче, носеща способност

РЕЗЮМЕ

Хоризонталните въздействия върху стоманените вертикални цилиндрични резервоари могат да доведат до тяхното повдигане, преобръщане и/или хоризонтално преместване. Един от начините за предотвратяване на цялостното преместване на тези съоръжения е поставянето на анкери. В стандартите за проектиране на стоманени резервоари API Std 650 и EN14015 е показан детайл за необходимото оформяне на анкерните болтове и техните столчета. Авторът счита, че предложеният детайл не е най-добрият и той може да бъде подобрен, при което носещата му способност ще бъде повишена.

1. Въведение

Стоманените вертикални цилиндрични резервоари са технологични съоръжения, които са подложени на въздействията на вятър, свръхналягане и земетръс. В резултат, резервоарите могат да се повдигнат, преобрънат и/или плъзнат. На тези дестабилизиращи сили противодействат собственото тегло на корпуса и постоянният покрив, и част от течността, намираща се в непосредствена близост до корпуса. В случай, че стабилизиращите сили се окажат недостатъчни да предотвратят общото повдигане и/или преобръщане на резервоара, следните отделни мерки, или комбинация от тях, трябва да бъдат взети [2]:

- а) увеличава се дебелината на дъното под корпуса (окрайката);
- б) увеличава се дебелината на поясите в корпуса;

¹ 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

- в) променят се пропорциите на резервоара – увеличава се диаметърът D и се намалява височината H ;
- г) резервоарът се анкерира.

Немалко фирми в областта на резервоаростроенето препоръчват поставянето на анкери само в краен случай, когато всички останали конструктивни решения не могат да постигнат необходимия ефект. Причините за това могат да се обобщат до следните:

- поставянето на анкери изисква надеждно закотвяне, което може да се осигури от стоманобетонен пръстен или цяла фундаментна плоча под резервоара;
- при недобре оразмерено и конструирано закрепване на анкери към корпуса е възможно разкъсване на последния и/или двойния ъглов шев, при което дъното ще се отдели от корпуса и ще има загуба на продукт [7];
- поставянето на анкери преди монтажа на стоманената конструкция на резервоарите затруднява тяхното изпълнение.

Понякога обаче проектантите нямат избор и поставянето на анкери е неизбежно, за което свидетелстват реализациите им в практиката, вж. фиг. 1.

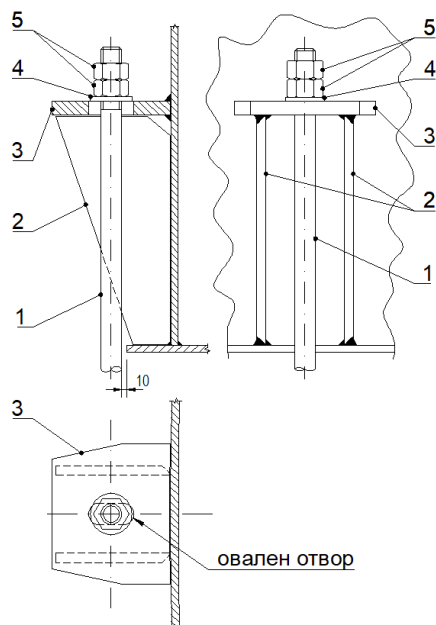


Фиг. 1. Изпълнени анкери – варианти

Във водещите стандарти за проектиране на стоманени вертикални цилиндрични резервоари API Std 650 [4] и EN14015:2004 [6] е показан детайл за необходимото оформление на анкерните болтове и техните столчета, вж. фиг. 2. За съжаление в стандарт EN 1998-4:2006 [5], част от системата Еврокодове, такъв детайл липсва.

Авторът смята, че показаното в API Std 650 и EN14015 конструктивно решение не е най-доброто и то може да бъде оптимизирано в следните направления:

- а) повишаване на капацитета на анкерния болт да разсейва сеизмична енергия;
- б) повишаване на носещата способност на анкерното столче.



Фиг. 2. Необходимо оформяне на анкерите според API Std 650 и EN14015

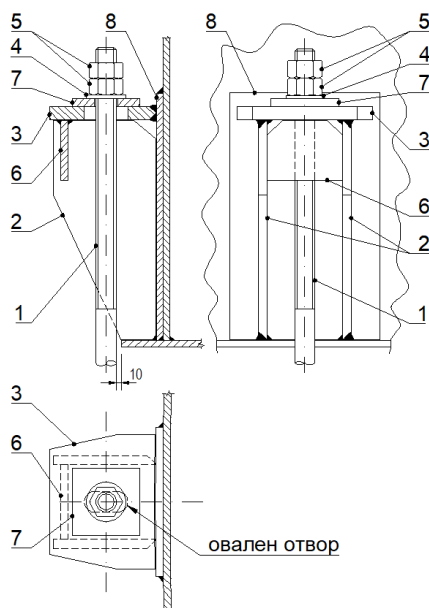
1. Анкерен болт; 2. Заковарващи ребра; 3. Анкерна плоча; 4. Шайба; 5. Гайка

2. Възможности за повишаване на капацитета на болта да разсейва сеизмична енергия и на носещата способност на неговото столче

Предложеният от API Std 650 [4] и EN14015 [6] детайл може да бъде подобрен в няколко направления:

2.1. Повишаване на капацитета на анкерния болт да разсейва сеизмична енергия

За да се разсеи породената от сеизмичното въздействие енергия, елемент или група елементи трябва да извършат работа. При стоманените конструкции това се постига чрез пластифициране на сеченията и големи деформации в избрани некритични елементи. При стоманените резервоари корпусът не може да бъде дисипиращ елемент, тъй като преди напреженията в него да достигнат до границата на провлачане, той ще загуби устойчивост. Остават периферната зона на дъното (окрайката), анкерите и/или техните столчета. При използване на анкерни болтове пластифицирането им ще се осъществи в зоната на намаленото напречно сечение, т.е. в нарязаната резба. При анкери с резба, нарязана почти до фундамента (вж. фиг. 3) дължината на участъка, в който сеченията пластифицират, е много по-голям от препоръчаното от API Std 650 и EN14015, където резбата е с минимална дължина. В резултат, способността за разсейване на енергия съществено нараства.



Фиг. 3. Промяна в оформянето на анкерите и техните столчета

1. Анкерен болт; 2. Закоравяващи ребра; 3. Анкерна плоча; 4. Шайба; 5. Гайка;
6. Нов закоравяващ елемент; 7. Планка; 8. Гръб на столчето

Освен това, увеличената дължина на нарязаната резба е свързана с повишено удължение на анкерните болтове. Така по-лесно ще бъде изпълнено посоченото в стандарт EN 1998-4:2006 [5] изискване анкерите да имат възможност да се удължават до $R/200$, без да се скъсват. Тук R е радиусът на цилиндричния корпус.

2.2. Увеличаване на броя на опорите на анкерната плоча

Между двете вертикални закоравяващи ребра се поставя нов закоравяващ елемент (вж. фиг. 3). Целта е броят на опорите на анкерната плоча да се увеличи от 3 на 4. По този начин се намаляват стойностите на огъващите моменти в анкерната плоча, а оттам – необходимата ѝ дебелина.

2.3. Поставяне на допълнителна планка между анкерната плоча и шайбата

В средата на анкерната плоча е изрязан овален отвор. Формата му е определена от нуждата от свободно радиално свиване и разширяване на корпуса, без анкерните болтове да са подложени на огъване. В резултат, при всяко пълнене и изпразване на резервоара корпусът, респективно кораво закрепеното към него столче, се премества в радиално направление. С цел възпрепятстване на заклиняване на шайбата в някой от ръбовете на овалния отвор е добре да се постави допълнителна, достатъчно широка планка между триещите се елементи (вж. фиг. 3). Освен това, тази допълнителна планка ще доведе до по-малки деформации и напрежения в анкерната плоча. Откъдето следва, че дебелината ѝ може да бъде намалена.

3. Числено моделиране и резултати

Използвайки графичния интерфейс Workbench на програмния продукт ANSYS v.19 [3], авторът е създавал няколко пространствени изчислителни модела на реален анкерен болт M27 и столчето към него. Те са конструирани съгласно указанията на стандарти API Std 650 [4] и EN14015 [6]. След това, във всеки от моделите е внасяна съответната промяна, която според автора би повишила капацитета на анкерния болт и носещата способност на столчето му. Общото между всички модели е следното:

а) материалът за елементите на столчето и на анкерния болт е стомана S235 с механични показатели съгласно стандарт БДС EN 10025-2 [1]:

– начален модул на еластичност – $E = 210\,000$ МПа;

– граница на провлачане – $f_y = 235$ МПа;

– якост на опън – $f_u = 360$ МПа;

– относително удължение при разрушение – $\epsilon_u = 0,26$;

– относително удължение в началото на площадката на провлачане – $\epsilon_{y1} = 0,00112$;

– относително удължение в края на площадката на провлачане – $\epsilon_{y2} = 0,0173$;

– зависимостта σ - ϵ е трилинейна и е показана на фиг. 4.

б) в горния края на анкерния болт, вж. позиция 3 на фиг. 2 и 3, има резба M27;

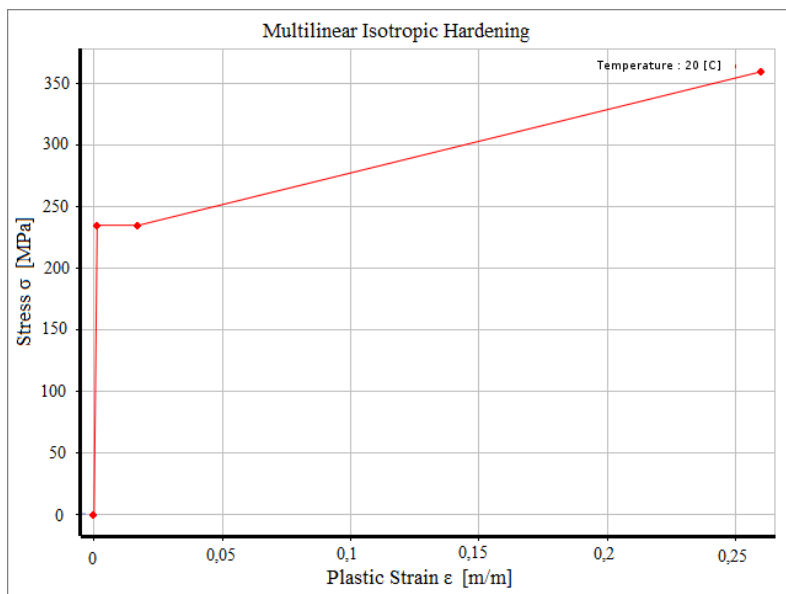
в) вертикалните закоравяващи ребра, вж. позиция 2 на фиг. 2 и 3, са с дебелина 12 mm и светлото разстояние между тях е 102 mm;

г) анкерната плоча, вж. позиция 3 на фиг. 2 и 3, е с дебелина 18 mm;

д) в средата на анкерната плоча е изрязан елиптичен отвор с разстояние между центровете 30 mm и радиуси на двете полуокръжности R14 mm;

е) столчето и анкерният болт са симулирани чрез обемни (solid) елементи;

ж) Workbench автоматично създава връзка между отделните елементи, която може да бъде с различни свойства. В настоящото изследване е прието, че връзката между столчето и анкерния болт е фрикционна, с коефициент на триене $\mu = 0,5$. Максималното приплъзване на контактуващите части е ограничено до 1 mm;



Фиг. 4. Идеализирана зависимост σ - ϵ на стомана S235

- з) използвани са крайни елементи SOLID187, които имат по 10 възела. Те са подходящи за симулация на пластифициране и големи премествания;
- и) максималният размер на краен елемент от мрежата е ограничен до 5 mm, а по повърхнината на елиптичния отвор – до 1 mm;
- й) численото решение е в една стъпка, но е разделено на подстъпки. Прието е, че първоначалният им брой е 30, минималният – 25, а максималният – 50;
- к) активирана е опцията за контрол на сходимостта на силите.

3.1. Влияние на дължината на резбата на анкерния болт

При това изследване нарязаната в края на анкерните болтове резба има различна дължина. Къса – 75 mm и дълга – 245 mm. Приложено е осово усилие в болта със стойност $F_z = 110$ kN. При нетно сечение $A_{b,net} = 4,59$ cm², нормалните напрежения в нарязаната част ще бъдат:

$$\sigma = \frac{F_z}{A_{b,net}} = \frac{110}{4,59} = 23,96 \text{ kN/cm}^2 > f_y, \quad (1)$$

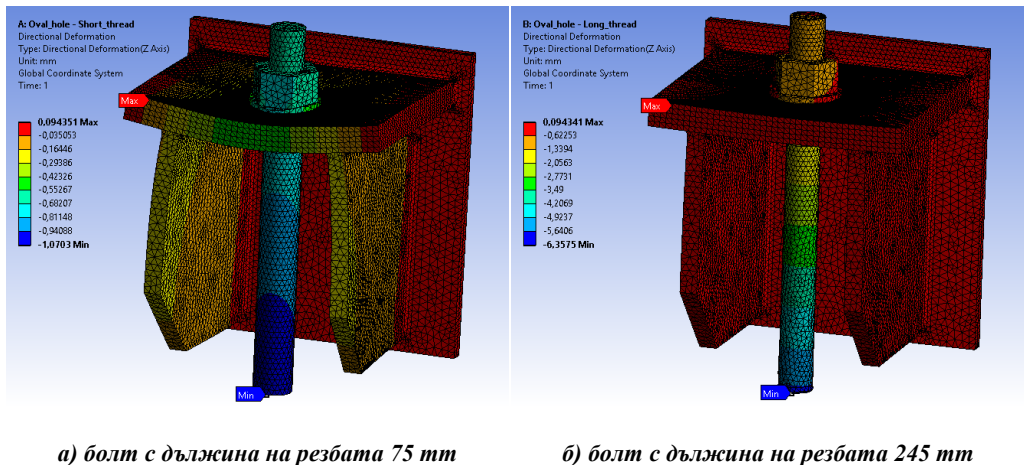
т.е. нарязаната част на анкерния болт ще провлочи.

Получените деформации в анкерните болтове и техните столчета са показани на фиг. 5. Преместването на основата на болта по вертикалната ос z е:

- а) при резба с дължина 75 mm – $\Delta z = 1,07$ mm;
- б) при резба с дължина 245 mm – $\Delta z = 6,36$ mm.

Количеството енергия за пластифициране на нарязаното сечение на болта, определена чрез ANSYS, е както следва:

- а) при резба с дължина 75 mm – $A = 27,34$ mJ;
- б) при резба с дължина 245 mm – $A = 209,92$ mJ.

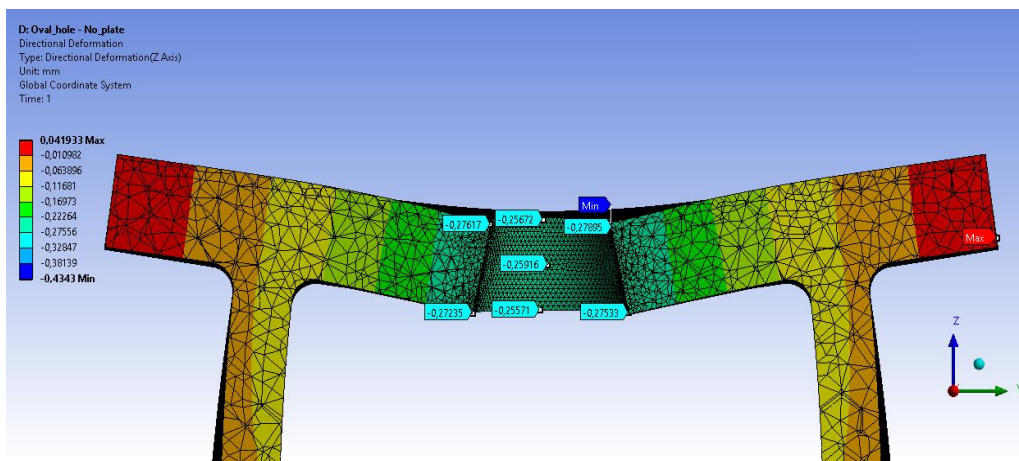


Фиг. 5. Деформации в анкерните болтове и техните столчета

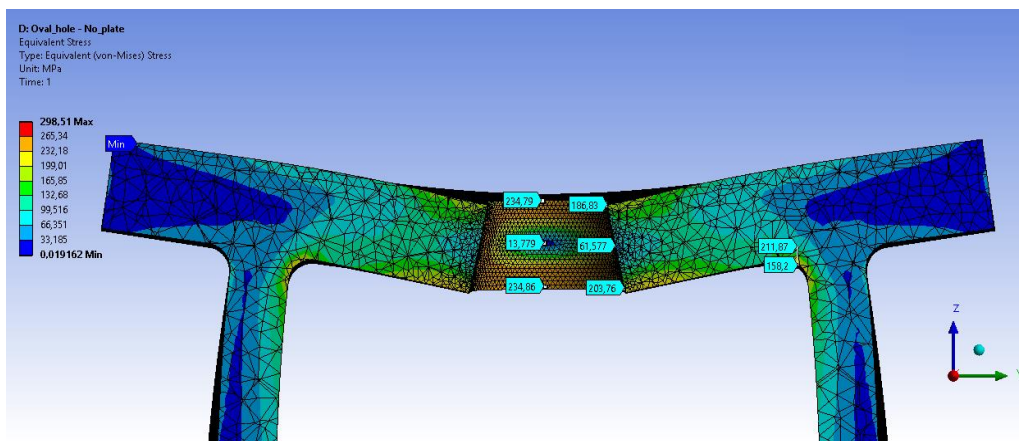
Очевидно по-дългият участък с нарязана резба, където сечението на болта е намалено, води до по-големи пластични деформации. Извършената работа е по-голяма, а това е предпоставка за по-съществено количество разсеяна енергия при земетръс.

3.2. Влияние на броя на опорите върху деформациите и напреженията в анкерната плоча

При това изследване анкерната плоча е подпряна по два начина – от три страни, както е класическият детайл, и четиристранно, каквото е предложението на автора. Получените деформации и напрежения са показани на фиг. 6 и фиг. 7.

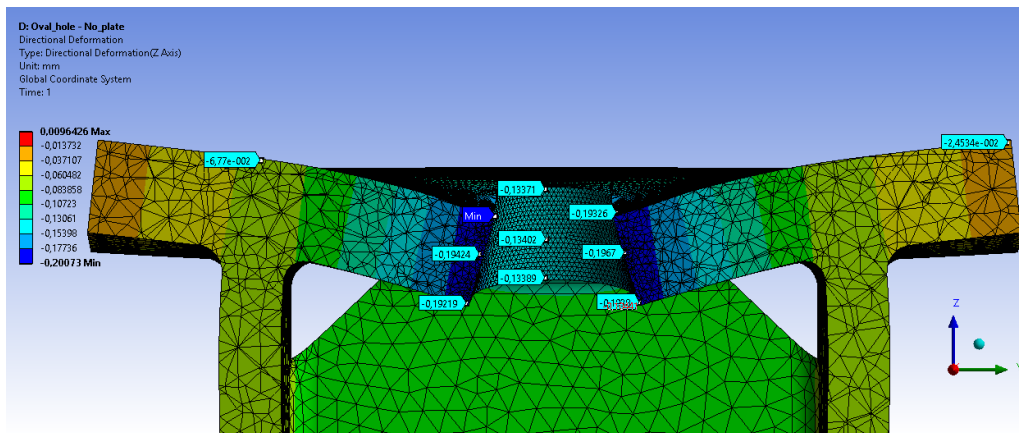


а) вертикални деформации

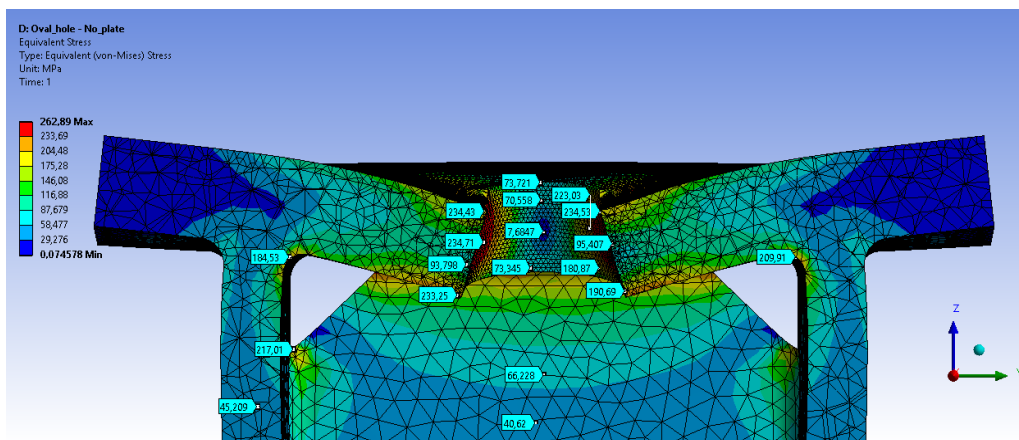


б) еквивалентни (по von Mises) напрежения

Фиг. 6. Деформации и напрежения в анкерната плоча, подпряна тристранно



а) вертикални деформации



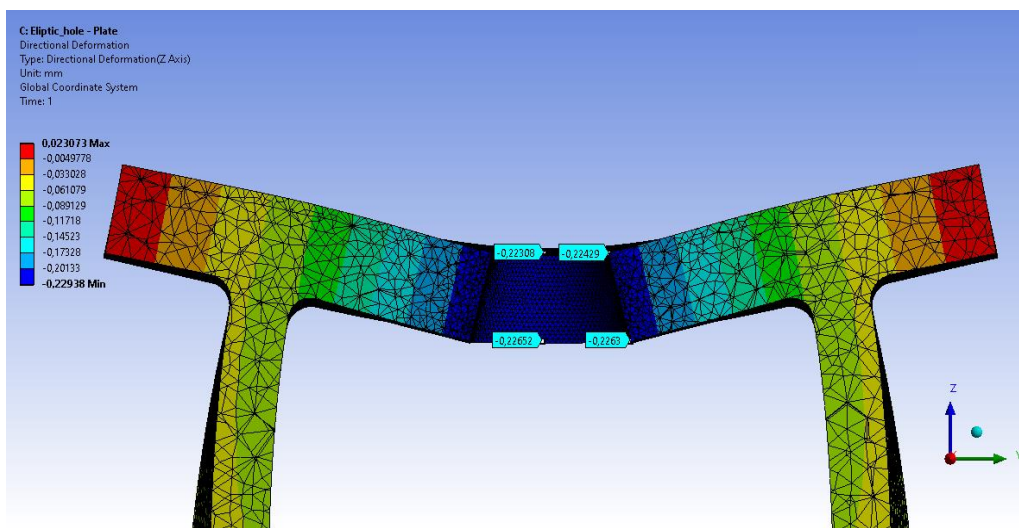
б) еквивалентни (по von Mises) напрежения

Фиг. 7. Деформации и напрежения в анкерната плоча, подпряна четиристранно

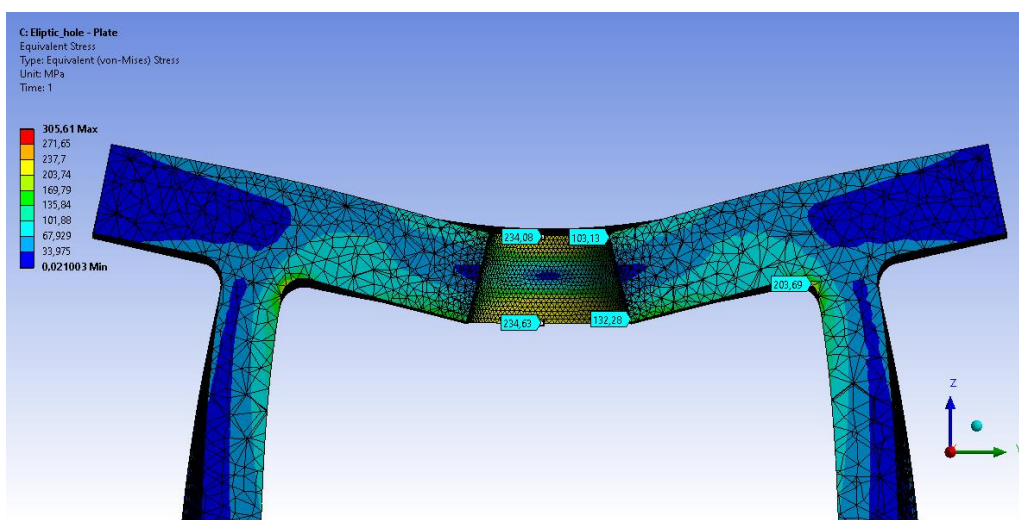
Както можеше да се предположи, както деформациите, така и еквивалентните напрежения са по-малки при четиристранно подпряната плоча.

3.3. Влияние на допълнителната планка върху деформациите и напреженията в анкерната плоча

При това изследване между анкерната плоча и шайбата на болта е поставена планка с дебелина $t = 10 \text{ mm}$, и размери в план $100 \times 100 \text{ mm}$ (вж. позиция 7 на фиг. 3). Отворът в средата ѝ е с диаметър $\text{Ø}28 \text{ mm}$. Получените деформации и напрежения са показани на фиг. 8.



а) вертикални деформации



б) еквивалентни (по von Mises) напрежения

Фиг. 8. Деформации и напрежения в анкерната плоча, подпряна тристранно. Над нея е поставена допълнителна планка с дебелина $t = 10\text{ mm}$

Сравнявайки показаните на фиг. 6 и фиг. 8 резултати, виждаме, че както деформациите, така и еквивалентните напрежения в анкерната плоча с допълнителна планка над нея, са по-малки.

4. Заключение

Понякога детайлите, показани във водещите стандарти за проектиране на строителни конструкции, не са най-удачните и те могат да бъдат подобрени. Такъв пример е

детайлт за закрепване на анкерния болт към неговото столче, разработен в API Std 650 [4] и EN14015 [6]. Добрата теоретична подготовка и инженерната логика позволяват с малко допълнителни разходи съществено да се повиши капацитетът му за разсейване на сеизмична енергия, и неговата носеща способност. Откъдето следва, че строителните инженери не трябва сякаш да се доверяват на предложените решения. Необходимо е те да преценяват детайлите и възлите, които ще използват в своите конструкции, и ако е необходимо – да ги променят.

ЛИТЕРАТУРА

1. БДС EN 10025-2:2005. Горещовалцувани продукти от конструкционни стомани. Част 2: Технически условия на доставка за нелегирани конструкционни стомани. БИС, 2005.
2. *Здравков, Л. А.* Стоманени вертикални цилиндрични резервоари. Ръководство за курсово и дипломно проектиране в съответствие с Еврокод. София, УАСГ, 2011.
3. ANSYS® v.19 Documentation. Ansys Inc., Canonsburg, PA, the USA.
4. API Std 650, Welded Steel Tanks for Oil Storage, Twelfth Edition, Addendum 3. American Petroleum Institute, Washington. August 2018.
5. EN 1998-4:2006. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 4: Silos, tanks and pipelines. European Committee for Standardization, Brussels, 2006.
6. EN 14015:2004, Specification for the design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed, above ground, welded, steel tanks for the storage of liquids at ambient temperature and above. CEN, November 2004.
7. *Vathi, M., Karamanos, S., Kapogiannis, I., Spiliopoulos, K.* Performance Criteria for Liquid Storage Tanks and Piping Systems Subjected to Seismic Loading. Journal of Pressure Vessel Technology, 2017. <https://doi.org/10.1115/1.4036916>.

ANCHORING OF STEEL VERTICAL CYLINDRICAL TANKS. POSSIBILITIES FOR INCREASING THE BEARING CAPACITY

L. Zdravkov¹

Keywords: steel tank, anchor bolt, chair, bearing capacity

ABSTRACT

Horizontal forces on steel vertical cylindrical tanks can lead to their lifting, overturning and/or horizontal displacement. One of the ways to prevent the complete relocation of these facilities is to install anchors. The standards for design of steel tanks API Std 650 and EN14015 show a detail for the necessary shape of the anchor bolts and their chairs. The author believes that the proposed detail is not the best and that it can be improved, which will increase its bearing capacity.

¹ 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