



Аутоматизација пројектовања и оптимизација геометрије посуде под притиском

Design Automation and Geometry Optimization of a Pressure Vessel

Синиша Петровић, Факултет техничких наука, Нови Сад

Студијски програм – ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО

Кратак садржај – У раду је приказан поступак аутоматизације пројектовања посуде под притиском за складиштење флуида у складу са стандардом EN 13445. Детаљно је описана конструкција посуде под притиском, као и процес израде CAD (Computer Aided Design) модела, уз примену рачунарских анализа ради провере геометрије и оптимизације конструкције на основу добијених резултата. Такође је приказано на који начин се наменски софтверски алати могу ефикасно користити као адекватна замена за специјализоване софтвере за пројектовање.

Кључне речи: посуда под притиском, модел, дискретизација модела, FEM анализа, оптимизација

Abstract – The paper presents a procedure for the automation of pressure vessel design for fluid storage in accordance with the EN 13445 standard. The construction of the pressure vessel is described in detail, as well as the process of creating the CAD (Computer Aided Design) model, with the application of computational analyses to verify the geometry and optimize the design based on the obtained results. Furthermore, the paper shows how dedicated software tools can be effectively used as an adequate alternative to specialized design software.

Keywords: pressure vessel, model, model discretization, FEM analysis, optimization

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Слободан Табаковић, ред. проф.

1. УВОД

Почевши од једноставног дрвеног точка па све до сложених потрошачких производа и савремених транспортних система, људи већ готово пет хиљада година обликују и конструишу различите техничке производе. Сваки од ових производа представља крајњи резултат дуготрајног и често веома захтевног процеса пројектовања. Савремени производи достигли су висок степен комплексности, те њихова реализација најчешће подразумева ангажовање тима стручњака из различитих области, са циљем да се почетна идеја трансформише у функционалан и

поуздан технички систем. Основна мерила ефикасности процеса пројектовања јесу цена производа, квалитет и време потребно да производ стигне на тржиште. Независно од тога да ли је предмет пројектовања комплетан систем, појединачна компонента или мања модификација постојећег производа, захтеви купаца и менаџмента усмерени су ка смањењу трошкова, унапређењу квалитета и скраћењу времена развоја. Један од најефикаснијих приступа за истовремено смањење трошкова пројектовања и повећање квалитета и поузданости конструкција јесте аутоматизација самог процеса пројектовања. У наставку овог рада биће приказан поступак аутоматизације процеса пројектовања посуде под притиском, где ће се приказати поступак израде CAD модела над којим ће се применити рачунарске анализе како би се извршила оптимизација пројектоване конструкције.

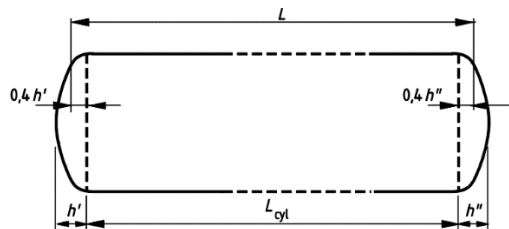
2. ПОСУДЕ ПОД ПРИТИСКОМ

Посуде под притиском представљају кључне елементе бројних индустријских система и користе се за складиштење, транспорт или процесирање флуида при притисцима који су виши од атмосферског. Оне се дефинишу као затворени контејнери код којих постоји разлика притиска између унутрашњости и спољашње средине, при чему је у већини случајева унутрашњи притисак доминантан. Због потенцијалних ризика које носи рад под повишеним притиском, пројектовање и израда ових конструкција захтевају висок степен поузданости и стриктно поштовање прописаних стандарда [1].

2.1. Конструкција

Конструктивно, посуда под притиском се најчешће састоји од цилиндричног омотача и завршних данаца, која могу бити равна, елиптична или торзиосферична, у зависности од радних услова и захтева стандарда. У појединим применама користе се и унутрашње преграде ради поделе посуде на више комора, што омогућава рад при различитим притисцима или температурама унутар исте конструкције. Посебну улогу имају прикључци, који служе за улаз и излаз флуида, као и за уградњу мерне и сигурносне опреме. Ови елементи представљају зоне повећаног напрезања и због тога морају бити адекватно ојачани и пројектовани у складу са важећим нормативима.

Носећи елементи, као што су стопе или седла, иако нису изложени унутрашњем притиску, од пресудног су значаја за стабилност и правилну расподелу оптерећења, при чему се један ослонац најчешће изводи као фиксан, а други омогућава термичко ширење конструкције. Пројектовање и израда посуда под притиском у европској пракси заснивају се на стандарду EN 13445, који дефинише захтеве у погледу димензионисања, избора материјала, производних процедура, контроле квалитета и испитивања. На слици 1. приказане су карактеристичне димензије посуде под притиском према овом стандарду.



Слика 1. Карактеристичне димензије посуде [2]

Овај стандард обухвата поступке испитивања механичких и хемијских својстава материјала, прописује правила за заваривање и контролу заварених спојева, као и примену неразорних метода испитивања, попут ултразвучних и радиографских тестова. Пре пуштања у рад, посуде морају проћи прописана испитивања притиском, чиме се обезбеђује висок ниво безбедности [3].

2.2. Израда CAD модела

У сржи CAD-а налази се тродимензионално моделирање. На тржишту је присутан велики број различитих софтвера за израду CAD модела. У нашем случају коришћен је Siemens NX. NX је интегрисана платформа која интегрише дизајн, симулацију и производњу у јединствено окружење, пружајући компанијама могућност да обједине све кључне фазе развоја производа у један процес. Софтвер омогућава инжењерима да креирају сложене 3D моделе компоненти и склопова, користећи параметарско, директно и површинско моделовање. Једна од кључних предности NX-а је интеграција CAD-а са CAE (Computer Aided Engineering) модулom, који омогућава анализе чврстоће, динамике, термичких карактеристика, вибрација и понашања материјала. У нашем конкретном случају примењен је параметарски приступ моделовања, при чему су димензије самог резервоара дефинисане као параметарске величине, док су димензије прикључака креиране са фиксним вредностима. Ова комбинација приступа омогућава оптимално управљање прецизношћу основних елемената модела уз задржавање флексибилности при додавању и изменама додатних компоненти. Целокупни процес моделовања извршен је у радном окружењу за моделовање (Modeling) у Siemens NX-у. Основу модела чини цилиндрични део, који је са обе стране затворен данцима и који се за њега заварују, као и носачи (стопе) преко којих се резервоар ослања на подлогу или платформу, у зависности од његове намењене употребе. У моделу смо изабрали

торзиосферична данца. Димензије данца дефинисане су у складу са стандардом DIN 28011. Након израде основног модела променом параметара омогућено је једноставно и прецизно управљање димензијама самог резервоара. Следећи корак у развоју модела обухвата додавање додатних конструктивних елемената. Под овим елементима подразумевају се прикључак за пражњење, пуњење и озрачавање, носачи за ослањање резервоара и ревизиони отвор. Сви наведени елементи пројектовани су у складу са EN 13445 стандардом. Након интеграције прирубница, формира се комплетан модел, који је приказан на слици 2.



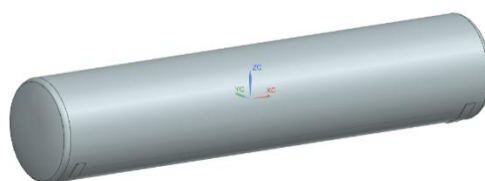
Слика 2. Модел посуде под притиском

3. CAE АНАЛИЗА

3.1. Идеализација геометрије

Студије показују да аналитичари CAE-а највише времена проводе припремајући моделе за симулацију. Ово време се углавном троши на изградњу математичког модела прилагођавањем, поједностављивањем и модификовањем изворне геометрије која представља стварни модел објекта [3].

Да би се обезбедила ефикасна CAE анализа и убрзао процес добијања резултата, неопходно је извршити идеализацију CAD модела. Овај поступак подразумева поједностављење модела уклањањем детаља који доприносе његовој сложености, а који нису критични за анализу. Под овим детаљима подразумевају се отвори, прикључци и носачи (стопе), чиме се смањује број елемената у мрежи и омогућава брже и прецизније извођење симулација, уз задржавање релевантних конструктивних карактеристика. Једна од главних предности софтвера Siemens NX јесте интегрисани процес идеализације модела који је доступан директно у оквиру модула за симулације. NX поседује уграђене команде које омогућавају поједностављење геометрије модела, уклањање непотребних елемената или попуну отвора. Применом ових команди сложен модел може се у кратком времену претворити у поједностављену верзију која, иако смањене сложености, задржава критичне конструктивне карактеристике, што омогућава добијање прецизних и поузданих резултата CAE анализе.



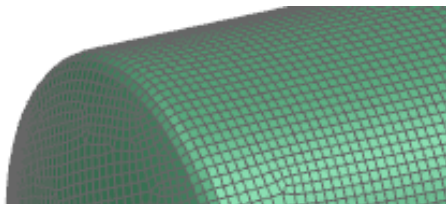
Слика 3. Идеализована геометрија модела

На тај начин добија се идеализовани модел који верно представља геометрију неопходну за прорачун, без непотребних детаља који би отежавали симулацију. Коначан изглед овако поједностављене геометрије приказан је на слици 3.

3.2. Израда мреже

Израда мреже у анализи коначних елемената представља поступак упрошћавања сложене, континуалне геометријске области на мање, једноставније делове – елементе. На тај начин континуум се дискретизује како би било могуће нумерички приближити физичке појаве и понашање конструкције. Разлагањем сложене структуре на велики број малих елемената омогућава се формирање система коначних једначина које рачунар може ефикасно да реши. Мрежа тако постаје основа целокупног FEM процеса, јер управо на њој почивају сви прорачуни – од напрезања и деформација, до преноса топлоте и других физичких величина. Три основна типа мрежа су 1D, 2D и 3D [3].

У конкретном случају изабрана је примена 2D мреже. Овај избор је оправдан и због њене ефикасности приликом анализа посуда под притиском, где танкозидне структуре могу бити прецизно представљене љуштастим елементима. Поред тога, коришћење 2D мреже омогућава добијање резултата анализе у краћем времену, смањује потребне рачунарске ресурсе и поједностављује процес израде мреже, а да притом не умањује тачност симулације. Применом команде “2D Mesh” над идеализованим моделом добија се мрежа која је приказана на слици 4.

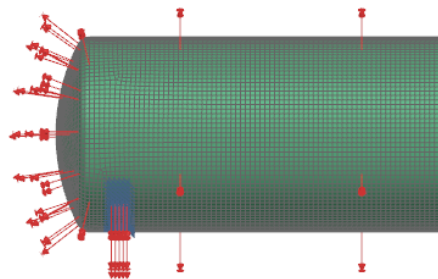


Слика 4. 2D полигонална мрежа посуде

3.3. FEM анализа

Први корак у FEM (Finite Element Method) анализи представља дефинисање ограничења. У конкретном случају, као ограничења користе се пројекције ослонаца на цилиндричном делу, које су креиране приликом идеализације геометрије. Ове тачке или површине се фиксирају јер представљају непокретне делове посуде који нису изложени притиску и не би требало да се деформишу током анализе. Други корак у анализи представља дефинисање оптерећења. У конкретном случају, креиран је нови параметар који представља притисак унутар посуде, што омогућава једноставно мењање и прилагођавање према новим захтевима или условима пројекта. На овај начин анализа постаје флексибилна и омогућава брзе измене без потребе за поновним креирањем целог модела. На слици 5. приказана је мрежа са векторима који визуелно показују правце и смерове дејства притиска на посуду. Са дефинисањем ових вредности завршена

је израда модела који омогућава аутоматизацију пројектовања посуде под притиском на основу притиска који делује унутар ње.



Слика 5. Визуелни приказ дејства притиска

У следећем поглављу биће приказано како овај модел функционише и какви се резултати добијају његовом применом, приказаће се практична примена оптимизације и процене сигурности конструкције.

4. ПРАКТИЧНА ПРИМЕНА МОДЕЛА

Да би се приказала ефикасност креираног модела на квалитетан начин извршено је пројектовање посуде дужине 8 метара и пречника 2 метра, у којој делује притисак од 3 бара. Након што се унесу параметри добија се модел као што је приказано на слици 6.

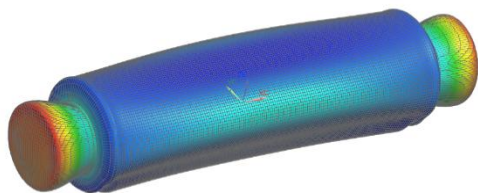


Слика 6. Добијена конструкција посуде

Након покретања анализе добија се прелиминарно решење које показује како конструкција реагује на дефинисани притисак. Ово решење служи као полазна тачка за даљу оптимизацију. У току истраживања је вршена промена дебљине зида све док није добијен адекватан резултат, тј. док није добијена вредност која не прелази вредност границе течења материјала од ког је посуда направљена, што у конкретном случају за челик износи око 180 МПа, а да се уз то задовољи степен сигурности од 1.5 према стандарду EN 13445, и да померање зида не пређе 2.5 mm као нека граница која је дефинисана. На основу прве анализе може се закључити да ли је потребно повећати или смањити дебљину зида. Процес је итеративан, при чему се вредност дебљине зида постепено мења, а резултати се међусобно пореде, посебно у смислу напона и деформација, како би се утврдило која конфигурација зида најбоље задовољава критеријуме сигурности. Поступак се понавља све док се не добије одговарајућа дебљина зида која одговара задатим условима. За дату конфигурацију модела добијена је дебљина од 6.5 mm, та вредност је заокружена на 7 mm. Када се та дебљина унесе као параметар дебљине, покрене

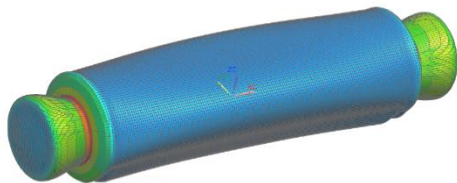
анализа, добијају се тражени резултати. На слици 7. приказана је вредност померање, а на слици 8. вредност Von-Misses-ових напона.

Displacement - Nodal, Magnitude
Min : 0.000, Max : 1.913, Units = mm
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Слика 7. Вредност померања зида

Stress - Elemental, Von-Mises
Shell Section : Top
Min : 0.00, Max : 161.67, Units = MPa



Слика 8. Вредност Von-Misses-ових напона

5. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА

У претходном поглављу представљен је модел који омогућава аутоматизацију процеса пројектовања посуде под притиском. За конфигурацију дужине 8 метара, пречника 2 метра, и притисак унутар посуде од 3 бара, спроведена је серија анализа како би се утврдила оптимална дебелина зида. Након анализа утврђена је оптимална дебелина од 7 mm. На слици 7. види се да максимално померање за дебелину од 7 mm износи око 1,9 mm. Највеће померање је забележено на радијусу круне данца, што указује на његову конструктивну осетљивост. Исто тако, са слике 8. види се да је за исту дебелину зида максимална вредност Von Mises-ових напона 161,67 МПа, при чему су напони локализовани на истом критичном месту – радијусу круне данца. Из ових резултата може се закључити да је данце једно од критичних места на посуди. Због тога је и чест случај у пракси да се данца праве са дебелином зида која је за који милиметар већа у односу на цилиндрични део, посебно у случајевима када у посудама влада већи притисак. На основу спроведених анализа показано је да овакав тип симулације може бити веома користан не само за оптимизацију конструкције, већ и за проверу да ли предложено конструкцијско решење може издржати оптерећења којима ће бити изложено у реалним условима. Ово омогућава идентификацију критичних места, процену потребне дебелине зида и предвиђање понашања посуде у екстремним ситуацијама, чиме се значајно повећава сигурност и поузданост пројектоване конструкције.

6. ЗАКЉУЧАК

Процес пројектовања техничких система, посебно у области машинства, последњих деценија пролази кроз

интензивну трансформацију услед развоја рачунарских технологија. Од традиционалног ручног цртања, преко дводимензионалног дигиталног моделовања, па до савремених интегрисаних CAD/CAE окружења, данашњи инжењер располаже алатима који у великој мери аутоматизују, убрзавају и унапређују процес пројектовања. Овај рад бави се управо значајем таквих технологија у пројектовању посуда под притиском, као и могућностима аутоматизације засноване на резултатима рачунарских анализа. У раду је приказана израда CAD модела и спровођење CAE анализе посуде под притиском у софтверу Siemens NX. Резултати нумеричке анализе омогућили су идентификацију најоптерећенијих зона на посуди, као и проверу да ли дебелина зида задовољава безбедносне критеријуме. Примена овог приступа у пројектовању посуда под притиском показала се посебно успешном, а могућности његовог даљег развоја су значајне. Иако на тржишту постоји већи број специјализованих софтвера који се користе за пројектовање оваквих посуда, сваки од ових наменских софтвера додатно кошта, тако да за некога ко има ограничене новчане ресурсе метода која је представљена може се користити као сасвим адекватна замена. Савремено инжењерство улази у период у ком ће дигитални алати, напредне симулације и вештачка интелигенција представљати кључне носиоце развоја, што ову област чини изузетно динамичном и обећавајућом за будуће генерације инжењера.

7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] S. P. H., S. Sankar, C. S. Sabarish and T. Thomas, "Design optimization of ammonia bullet pressure vessel," *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (IJIRSET)*, vol. 8, no. 5, pp. —, May 2019, doi: 10.15680/IJIRSET.2019.0805086.
- [2] SRPS EN 13445-1:2010, *Посуде под притиском које нису изложене пламену – Део 1: Опште одредбе*, Институт за стандардизацију Србије, 2010.
- [3] P. Goncharov, I. Artamonov and T. Khalitov, *Engineering Analysis with NX Advanced Simulation*, Lulu Publishing Services, 2014, ISBN 978-1483417325.

Кратка биографија:



Синиша Петровић рођен је у Лозници 2001. год. Дипломирао је 2024. године на Факултету техничких наука у Новом Саду на студијском програму Производно машинство, исте године је уписао мастер студије.

Контакт: psinisa2001@gmail.com