



SKAITLISKĀS MODELĒŠANAS PAKEŠU SALĪDZINĀJUMS LINEĀRĀS PLĪŠANAS MEHĀNIKAS UZDEVUMA GADĪJUMĀ NUMERICAL MODELLING SOFTWARE COMPARISON IN CASE OF LINEAR FRACTURE MECHANICS

Inga Vanaga, Andris Siliņš, Normunds Jēkabsons
Ventspils Inženierpētniecības centrs, Inženieru 101a, Ventspils, LV 3601
E-pasts: inga.vanaga@venta.lv, mob. tālr.: 26021571;
andris.silins@venta.lv; normunds.jekabsons@venta.lv

Abstract: *The paper deals with the accordance's comparison of resources and results of several commercial and solid mechanics numerical modelling software. One of the most common fracture mechanics example is Compact Tension Specimen (CTS) which is used in this paper for testing and comparing the results of commercial solid mechanics numerical modelling software (for instance SolidWorks module CosmosWorks, Unigraphics NX technical analysis module, etc.) using nontrivial examinations to their possibility margins. Standard Griffith (A.A.Griffith) model of energy balance is used in linear models which explores the mesh size influence to the precision of results. Achieved results have been compared mutually and with the examples found in the literature.*

Keywords: *compact tension specimen, computer aided engineering, finite element analysis, plane strain fracture toughness, strain intensity factor.*

Ievads

Pasaulē šobrīd eksistē ļoti daudzas CAD (*Computer Aided Design* – datorizētā projektēšana) programmu paketes, kas satur iebūvētos galīgo elementu analīzes (FEA – *Finite Element Analysis*) moduļus. Aplūkotie FEA moduļi ļauj virtuālajā vidē veikt nepieciešamos izstrādājamo konstrukciju mehāniskos testus, tādejādi samazinot gan jauna produkta izstrādes laiku, gan arī kopējās izstrādes izmaksas. Turklāt šādu digitālo modeļu pielietošana atbrīvo arī no dārgu reālu prototipu izveides vairāku konkurējošu dizaina koncepciju gadījumā.

Publikācijas mērķis ir novērtēt mūsu rīcībā esošo programmatūru, tās precizitāti un rezultātu atkārtojamību. Šī mērķa sasniegšanai tika modelēta klasisko kompaktās stiepes paraugu (CTS – *Compact Tension Specimen*) [3] plīšana tiem pielikta monotoni augoša slogojuma rezultātā. Pētījums tika veikts, izmantojot divas CAD/CAE programmu paketes: 1) *Dassault Systemes SolidWorks Premium FEA (Finite Element Analysis)* modulis *CosmosWorks 2007* un 2) *Siemens PLM Software Unigraphics NX 6.0 FEA* modulis *Nastran Advanced Simulation*.

Rezultātu kvantitatīvais tests tika veikts, salīdzinot modelētos pārvietojumus fiksētos parauga punktos, kā arī aprēķinu gaitā iegūtos sprieguma intensitātes faktoros (*stress intensity factor*) lineāri elastīgas plīšanas mehānikas koncepta ietvaros.

Materiāli un metodes

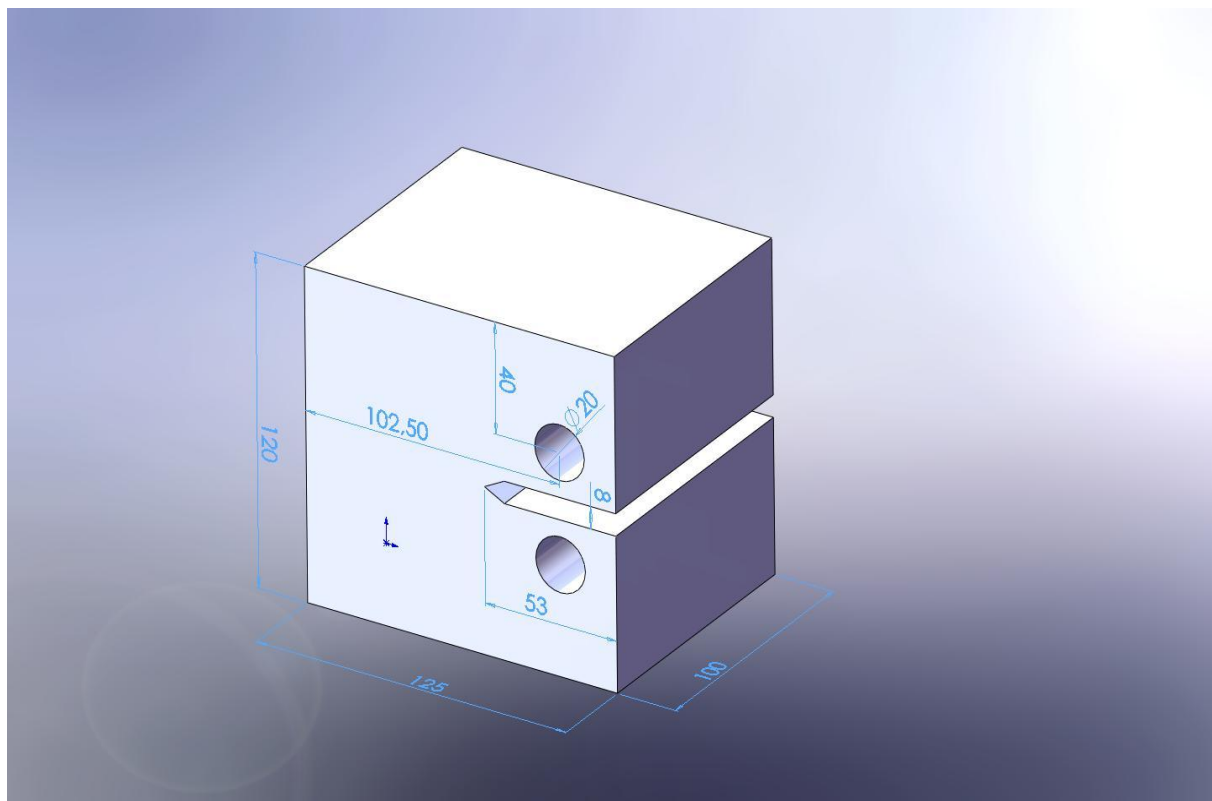
Darbā tika izvēlēta ASTM standartam [2] atbilstoša CTS ģeometrija, kas dota 1.attēlā.

Par materiālu tika izvēlēts tipisks plastisks velvējams tērauds (*ductile iron*) ar raksturīgajiem parametriem, kas apkopoti 1.tabulā.

1.tabula

Izmantojamā materiāla mehāniskās īpašības

Parametrs	Vērtība
Junga modulis	120 GPa
Puasona koeficients	0,31
Bīdes modulis (<i>shear modulus</i>)	$7,7 \times 10^{10}$ N/m ²
Stiepes izturība (<i>tensile strength</i>)	862 MPa
Plūstamības robeža (<i>yield strength</i>)	552 MPa



1.att. Modelētā CTS ģeometriskie izmēri

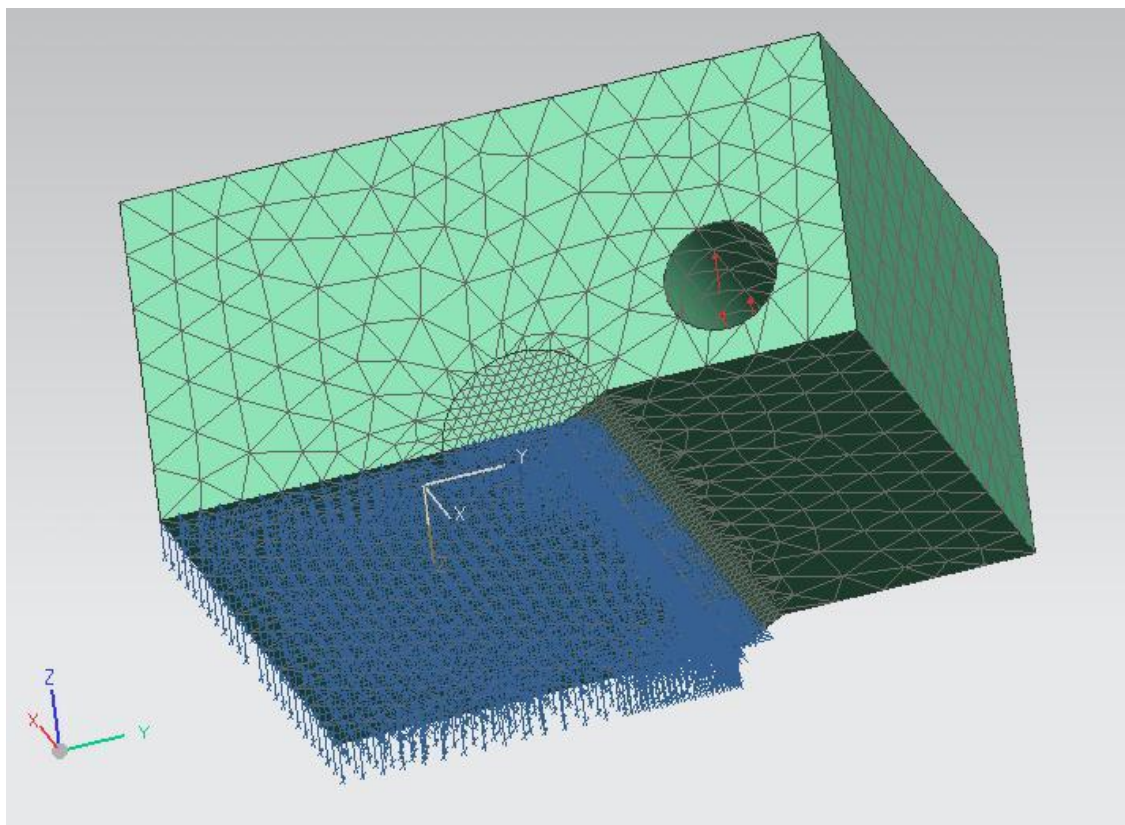
Neraugoties uz galīgas plūstamības robežas esamību, tabulā šī vērtība netika tiešā veidā izmantota FEA aprēķinu gaitā, t.i., aprēķinos tika lietots lineāri elastīgs materiāla modelis.

Darbā iegūtie rezultāti tika salīdzināti ar *Internet* vietnē [1] atrodamu K_I kalkulatoru, kurš izveidots pēc neatkarīgi iegūtu FEA aprēķinu interpolācijas.

Lai atrastu K_I , skaitliskajos aprēķinos tika lietota virtuālo plaisu aizvēršanas tehnika (*crack closure technique*), kas lineāri elastīgas plīšanas mehānikas tuvinājumā var tikt reducēta uz diviem parauga sloģojumiem ar dažādiem plaisas garumiem. Katrā no sloģojumiem paraugam pieliktā slodze (100kN – pirmajā sloģojumā) tika vienmērīgi sadalīta uz urbumu iekšējās virsmas. Balstoties uz detaļas simetriju, FEA tika veikta tikai vienai pusei no detaļas tilpuma, izvēloties par simetrijas plakni potenciālas plaisas izplatīšanos plakni. Nekontrolētas skaitļošanas apgabala translācijas novēršanai tika nofiksēts simetrijas plaknes un parauga aizmugurējās skaldnes šķēluma līnijas viduspunkts.

Ņemot vērā gaidāmo neviendabīgo mehānisko spriegumu sadalījumu detaļā, tika izveidots neviendabīgs un neregulārs galīgo elementu režģis (*finite element mesh*). To detaļas tilpumu, kas neatrodas tiešā plaisas gala tuvumā sadalīšanai tika lietots rupjāks režģis ar tipisko elementa skaldnes garumu 10,1 mm. Savukārt paaugstinātu mehānisko spriegumu apgabalā netālu no plaisas gala tika lietots daudz smalkāks režģis ar tipisko elementu skaldnes izmēru 2 mm. *CosmosWorks* aprēķini tika veikti, sadalot apgabalu ar pirmās kārtas tetraedrāliem elementiem, savukārt *Nastran* – ar otrās kārtas tertraedrāliem elementiem [4; 5]. Autoriem neizdevās veikt tālāku režģa sasmalcināšanu *SolidWorks* paketē, tāpēc papildus aprēķini uz smalkāka režģa veikti netika.

Katrā paketē tika veikti 2 skaitliski aprēķini – ar 1 un 2 mm garām plaisām. Ņemot vērā apstākli, ka modelim tika uzlikts simetrijas nosacījums pret plaisas plakni, nolasītie pārvietojumu (*displacement*) rezultāti tika reizināti ar 2.



2.att. Skaitliskā modeļa galīgo elementu režģis, pieliktā spēka vieta un virziens (sarkanās bultiņas), kā arī simetrijas nosacījums (zilās bultiņas)

Rezultāti un to izvērtējums

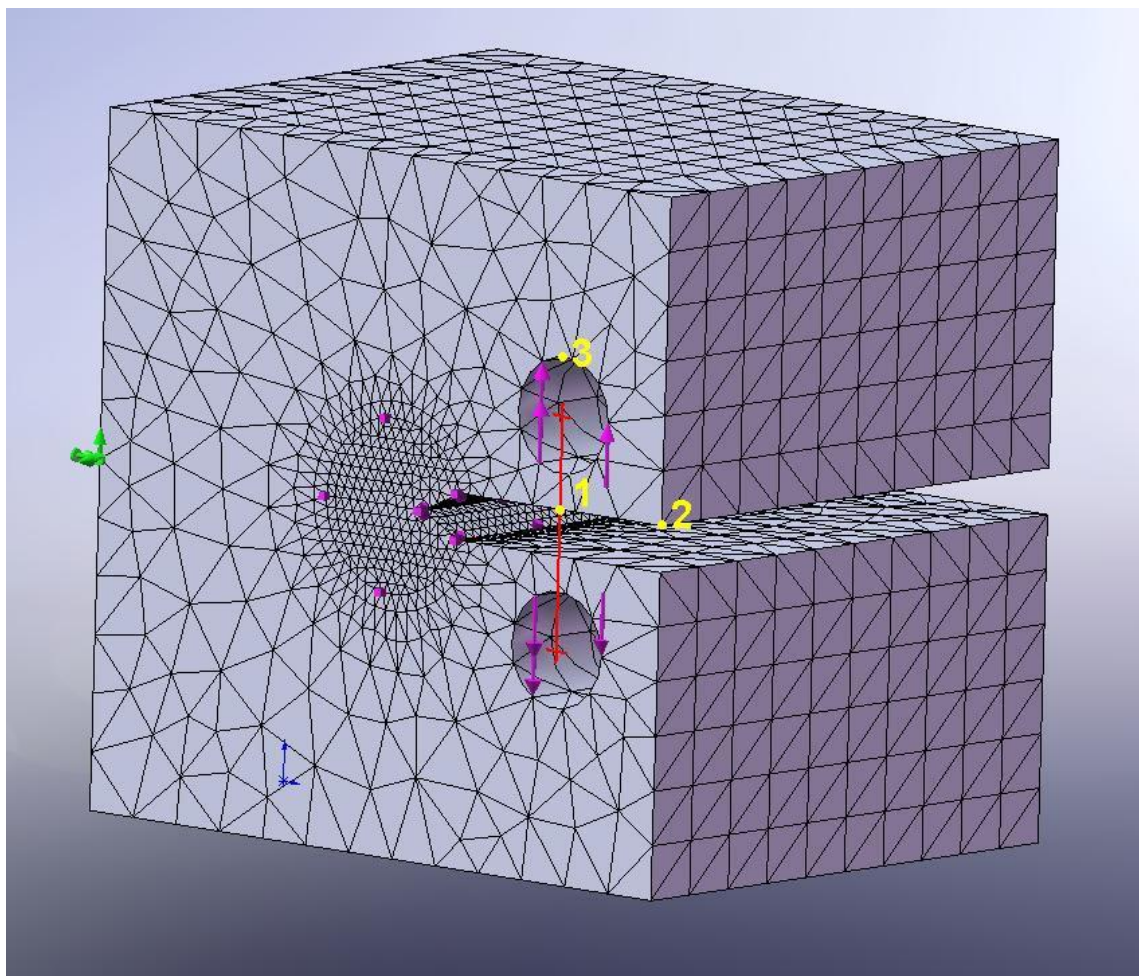
Detaļas pārvietojuma rezultāti tika nolasīti kopā trijos punktos: divos izgriezuma plaknē starp slodzes pielikšanas urbumiem un uz urbuma iekšējās virsmas, kā tas parādīts 3.attēlā. Aprēķinos tika iegūtas 3 pārvietojuma rezultātu grupas – ar kalkulatora, *CosmosWorks* un *Nastran* palīdzību. Katrā grupā ir rezultāti ar 1 un 2 mm noguruma plaisu, kas apkopoti 2.tabulā.

2.tabula

Pārvietojuma rezultāti, mm

	Noguruma plaisas lielums	Pārvietojuma nolasīšanas vieta (sk.3.att.)		
		1	2	3
Kalkulators	1 mm	0,112	0,194	-
	2 mm	0,117	0,201	-
SolidWorks	1 mm	0,14088	0,18150	0,11256
	2 mm	0,14634	0,18860	0,11776
Unigraphics NX	1 mm	0,14030	0,18094	0,10684
	2 mm	0,14576	0,18790	0,11172

Kā redzams no 2.tabulas, ar CTS kalkulatora palīdzību iegūtie pārvietojumi būtiski atšķiras no FEA rezultātiem, kamēr, savstarpēji salīdzinot SolidWorks un NX rezultātus, tie atšķiras mazāk. Autori iegūtās atšķirības FEA un kalkulatora dotajos rezultātos skaidro ar iespējamajām kalkulatora interpolācijas kļūdām, kā arī iespējamajiem atšķirīgajiem robežnosacījumiem slodzes pielikšanai uz urbumu iekšējām virsmām.



3.att. Pārvietojuma rezultātu nolasišanas punkti

1 – uz lielās plaisas uz slodzes līnijas; 2 – uz lielās plaisas gala punkta; 3 – pie urbuma uz slodzes līnijas

Lineāri elastīgas plīšanas mehānikas t.s. “*plane stress*” apakšgadījumā sprieguma intensitātes faktors K_I [3] var tikt izteikts kā

$$K_I = \sqrt{EG}, \quad (1)$$

kur E – Junga modulis;

G – atbrīvotā plaisas enerģija uz vienības laukumu (*plain strain energy release rate*).

Pēc definīcijas G tiek aprēķināts šādi [3]:

$$G = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{S}, \quad (2)$$

kur ε_1 – parauga elastīgā enerģija pie plaisas garuma 1 mm un slogojuma 100kN;

ε_2 – parauga elastīgā enerģija ar plaisas garumu 2 mm pie iepriekšējā slogojumā iegūtā urbuma pārvietojuma.

Pēdējā enerģija tika iegūta, netieši pārrēķinot no modeļa ar 100kN pieliktu slodzi un 2mm garu plaisu. Lielums S izteiksmē (2) ir noguruma plaisas laukuma pieaugums, plaisas garumam pieaugot no 1mm līdz 2mm. Savukārt modeļa elastīgo enerģiju aprēķina pēc formulas:

$$\varepsilon = \frac{FU}{2}, \quad (3)$$

kur F – pieliktais spēks;

U – pārvietojums urbumā.

Ar kalkulatoru iegūtais sprieguma intensitātes faktors bija 17,6 MPa/m^{0.5}. Pēc *SolidWorks* programmatūras iegūtajiem pārvietojuma rezultātiem $K_I = 17,23$ MPa/m^{0.5}, bet pēc *Unigraphics NX* programmatūras iegūtajiem pārvietojuma rezultātiem $K_I = 16,73$ MPa/m^{0.5}.

Ja salīdzina kalkulatora aprēķināto K_I ar FEA aprēķināto K_I , tad *SolidWorks* gadījumā tie atšķiras tikai par 2%, bet no *Unigraphics NX* rezultātiem aprēķinātais K_I atšķiras par 5%.

ASTM standarts [2] dod šādu nosacījumu lineāra plīšanas mehānisma pielietošanai CTS testam:

$$B, a, (W-a) > 2,5 (K_{IC} / \sigma_y)^2, \quad (4)$$

kur B – apskatītā modeļa biezums (dotajā gadījumā 100 mm);

a – attālums no noguruma plaisas galapunkta līdz slodzes līnijai (dotajā gadījumā 31,5 un 32,5 mm atkarībā no noguruma plaisas garuma),

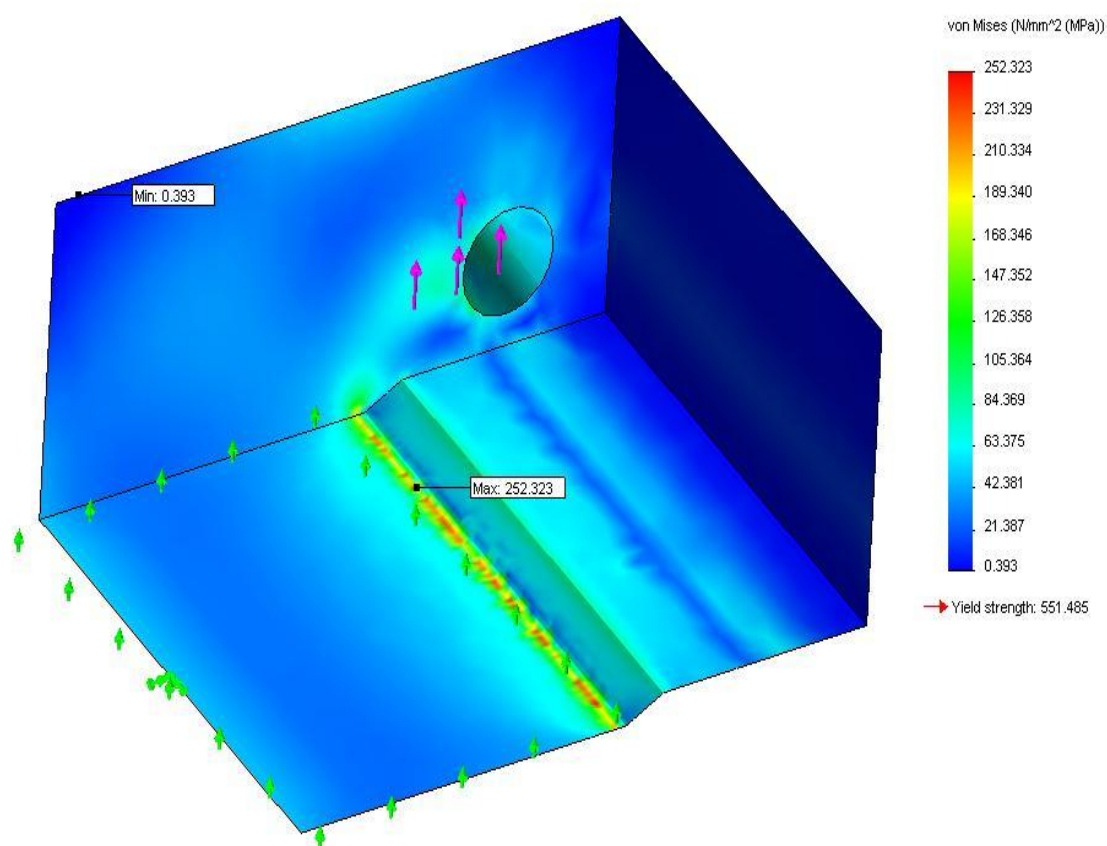
W – attālums no modeļa aizmugures sienas līdz urbuma centram (102,5 mm);

K_{IC} – kritiskā sprieguma intensitātes faktors;

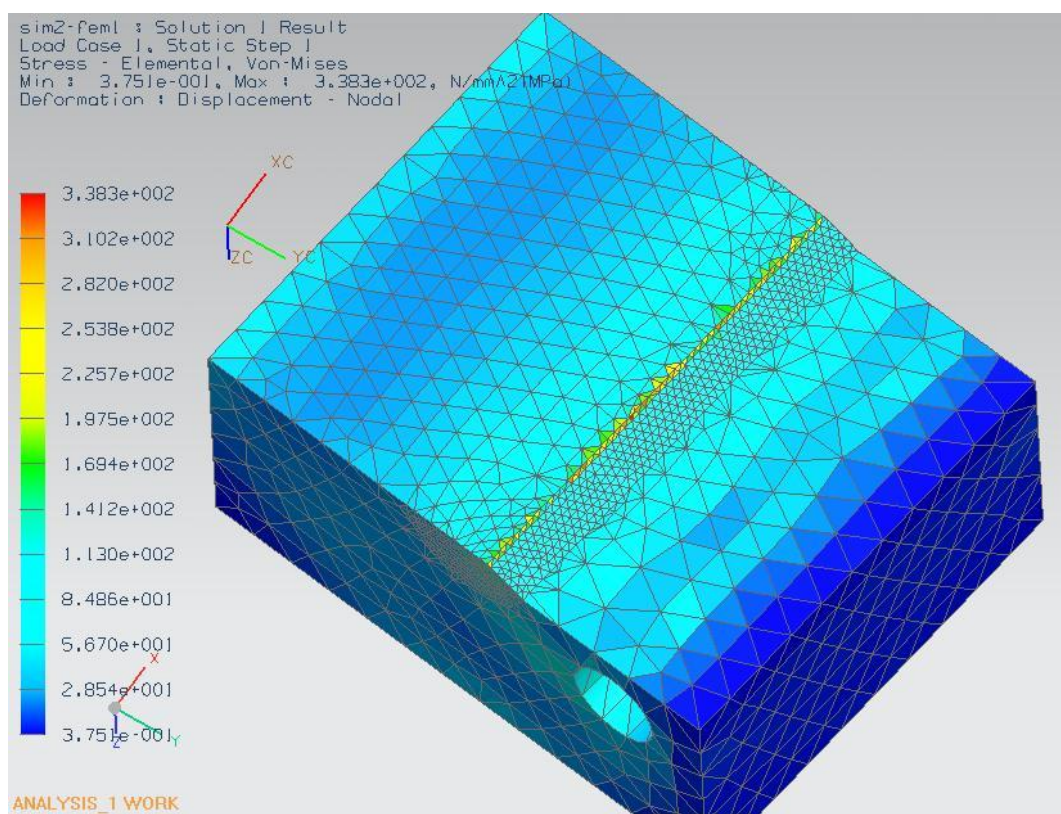
σ_y – maksimālais spriegums apskatāmajā modelī.

No izteiksmes (4) izriet, ka aplūkoto lineāri elastīgo plīšanas mehāniskas modeli dotajai CTS paraugu ģeometrijai var pielietot tēraudu markām, kuru $K_{IC} \leq 100 \text{ MPa/m}^{1/2}$.

4. un 5.attēlā iespējams redzēt un salīdzināt pakešu dotos *von Mises* ekvivalento spriegumu rezultātus. *CosmosWorks* maksimālo spriegumu uzrāda 252 MPa, bet *Nastran* – 338 MPa atbilstoši dažādām atrisinājuma aproksimācijas kārtām galīgajos elementos.



4.att. *Von Mises* spriegumu sadalījums, iegūts ar *SolidWorks CosmosWorks* palīdzību



5.att. Von Mises sprieguma sadalījums, iegūts ar Unigraphics NX Nastran palīdzību (skats no apakšas)

Secinājumi

Aprēķinu rezultāti rāda labu K_I samērību ($\geq 5\%$) visos apskatītajos gadījumos. Turklāt abu FEA moduļu rezultāti savstarpēji atšķiras mazāk nekā par 3%, neskatoties uz dažādu lietoto galīgo elementu tipu. Jāpiemin, ka maksimālie spriegumi dažādu elementu tipu dēļ atšķirās par aptuveni 30%.

Pēc autora domām, no abām izmantotajām CAE programmām aprēķinu veikšanai ērtākais bija Unigraphics NX Nastran papildinājums. Taču katrai no programmām bija arī savas negatīvās puses. SolidWorks papildinājums CosmosWorks bija lietotājam saprotamāks no sarežģītības viedokļa, taču tas bieži „traucēja lietotājam” ar neizprotamiem paziņojumiem, ka nespēj pildīt lietotāja norādīto uzdevumu un bija visai „kaprīzs” uz aprēķinu nosacījumu veidošanu. Piemēram, CosmosWorks programmatūrā visproblemātiskākā bija galīgo elementu režģa izveide – kā tika minēts, nebija iespējams uzlikt režģi smalkāku par 2 mm ap plaisas reģionu. Savukārt Nastran programmatūra spēja izveidot šo režģi pat ar 0,02 mm smalkiem elementiem un praktiski vienmēr veidoja režģi. Taču Nastran programmatūras mīnuss, pēc autoru domām, ir tā sarežģītība, piemēram, viena simulācija sastāv no vairākiem failiem: paša modeļa, režģa un materiāla īpašību un simulācijas fails. Konkrētas darbības bija iespējams veikt, tikai strādājot ar noteiktu failu, tāpēc visu laiku ir jāpārslēdzas starp šiem failiem, kas nav ērti.

Conclusions

Results of the calculations shows a pretty well conformity of K_I ($\geq 5\%$) at all examined occasions. Besides, difference of results for both FEA models despite using different finite element type is less than 3%. To mention is that because of usage of different finite element type the max tension differ for about 30%.

Choosing the best of both used CAE software, according to author's thoughts, more convenient for calculations were Unigraphics NX Nastran software. However, both of the software programs had some disadvantages as well. SolidWorks extension CosmosWorks was more understandable from the complexity point of view but it bothered the user with several incomprehensible messages

quite often saying it is impossible to complete the user given assignments. It was also pretty “capricious” with it's conditions for calculations. In CosmosWorks software the most challenging step was to create a finite element grid – it was not possible to create a grip finer than 2 mm around the region of fracture. On the other hand, Nastran software was able to create a grid with a fineness of 0.02 mm and there were no problems making grid in every attempt. The disadvantage of this software is it's complexity, for instance, one simulation consists of several files: model file, grid and material characteristics file and simulation file. It is necessary to switch between the files all the time because specific actions can only be done with particular file.

Literatūra

1. Compact Tension Test Specimen calculator, free web tool at address http://emat.eng.hmc.edu/fracture/compact_tension/compact_tension.html
2. ASTM E399-08 Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture toughness K_{IC} of Metallic Materials, developed by Subcommittee: E08.07, American Society for Testing and Materials, 1998.
3. Anderson T.L. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications. CRC, 2nd edition December 16, 1994.
4. NX 6 Documentation, Siemens PLM Software, 2009.
5. CosmosWorks Help Topics, Dassault Systemes, 2007.