

# KONAČNO ELEMENTNA SIMULACIJA SIEBEL-SCHWAIGERER VLAČNOG TESTA FINITE ELEMENT SIMULATION OF THE SIEBEL- SCHWAIGERER TENSILE TEST

Miljenko MATH -Zdenka KERAN-Marko ŠKUNCA-Hrvoje BALIJA

**Sažetak:** Ako se naprezanje plastičnog tečenja treba odrediti samo za relativno manja naprezanja preferira se metoda vlačnog testa, kako zbog svoje jednostavnosti tako i jer su uvjeti pokusa definirani standardima. Numerička simulacija velikih deformacija i naprezanja uključujući lom, zahtjevan je zadatak bez obzira koji se kriterij konvergencije upotrebljava. Kako se proračun radi obzirom na čvorove elemenata koji ih povezuju, u nekim čvorovima u određenom trenutku naprezanje postaje suviše veliko što znači da dolazi do loma. U stvari riječ je o pojavi mikropukotine, koja se razvija u makropukotinu i daljnjim propagiranjem deformacije dolazi do loma. Budući je istodobno ovakav čvor zajednički još nekim elementima bez njega daljnji proračun nije moguć. Riješiti zadatak da se određeni ne samo čvorovi nego i elementi isključe iz daljnjeg proračuna, ali da proces numeričke simulacije bude nastavljen vrlo je zahtjevan. Komercijalni softveri, čak i oni sa velikim brojem potprograma teško savladavaju ove probleme, uz velike intervencije korisnika i ne uvijek predvidivim rezultatom. U ovom je radu izložena 2D i 3D simulacija korištenjem MARC\_Mentat komercijalnog programa, koji omogućava intervencije korisnika uz kreiranje vlastitih potprograma temeljenih na eksperimentima i matematičkoj interpretaciji ovoga složenog problema.

**Ključne riječi:** - metoda konačnih elemenata  
- vlačni test  
- simulacija

**Summary:** If the flow curve is only to be determined for low strains, the tensile test is normally preferred because of its simplicity and also because, for this experiment, the conditions of testing have been defined by standards. Numerical simulation of great deformations and high strains including the moment of fracture is a very complex task regardless of which sort of criteria is chosen for convergence. As the calculation is done according to individual nodes and the elements are connected through these nodes, at a certain point some nodes have too high stress and that means that the fracture occurs. In fact, that is the beginning of a micro crevice that develops into a macro crevice and by further propagation the fracture spreads over the whole cross section. At the same time, one node is common to several different elements and without it further calculation is no longer possible. To overcome that, so as to properly exclude not only one or several nodes but also certain elements, and at the same time to insure further calculation without them, i.e. to make numerical simulation possible, is a very demanding undertaking, and commercial software even with a great number of subroutines cannot solve such a task without many interventions and with unpredictable results. This paper presents numerous experimental results and 2D as well as 3D simulation of tensile tests including the moment of fracture, and a comparison between these results for one sort of aluminium alloy using MARC/Mentat commercial software that enables intervention in the program and the creation of its own subroutines based on experimental data and mathematical interpretation of such a complex problem.

**Key words:** - finite element method  
- tensile test  
- simulation

## 1. UVOD

U praktičnoj primjeni susrećemo se često s potrebom korištenja krivulja naprezanja plastičnog tečenja kao neophodnim podatkom za daljnji proračun i pri tom smo suočeni s činjenicom da takve krivulje za zadani materijal ne postoje. Za neke materijale koji su češće u upotrebi i tipični takve krivulje postoje [1, 2], ali je broj

## 1. INTRODUCTION

In practical application when it is important to establish the flow curve as inevitable data for further calculation, one is very often confronted with the fact that such curve for actual metal material is not known. There are such curves for some typical materials [1,2],

materijala koji su na raspolaganju ograničen i skroman. Iz tog razloga uobičajeno je provesti eksperimente shodno prevladavajućem stanju naprezanja i deformacija (vlačna ili tlačna) za postupke u hladnom stanju, kao i tlačni test za postupke kod povišenih temperatura, odnosno torzijski test za postupke oblikovanja u vrućem stanju. Postoje doduše i posebne metode za određivanje naprezanja plastičnog tečenja pri oblikovanju tankih limova, ali općenito nema "najboljeg" eksperimenta, već svaki ima svoje specifično polje primjene. Ispravan izbor metode ovisi o postupku oblikovanja koji se simulira. Iz tog razloga veličina i vrsta uzorka ne bira se slobodno. Ako se krivulja tečenja određuje za mala naprezanja, vlačni je test pogodan jer su uvjeti ispitivanja određeni standardima. Taj se način bira i ako je moguće ekstrapolirati krivulju naprezanja plastičnog tečenja za veća naprezanja. Za područje jednolikog istezanja smatra se redovito da je naprezanje jednoliko po presjeku uzorka. Time je naprezanje plastičnog tečenja zadano jednadžbom (1):

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

gdje je presjek  $A$  zadani jednadžbom 2 kao:

$$A = \frac{\pi_0 r_0 l_0}{l_0 + \Delta l} \quad (2)$$

Područje jednolike deformacije ograničeno je elongacijom  $e_u$  identificiranom maksimalnom silom razvlačenja. Nakon toga deformacija nije više jednolika i javlja se kontrakcija presjeka. Glavni je nedostatak te metode da se vrat pojavljuje kod relativno malog naprezanja. Za mnoge metale jednadžba 3 glasi:

$$\varphi = \ln(1 + e_u) \cong 0.2 \div 0.3 \quad (3)$$

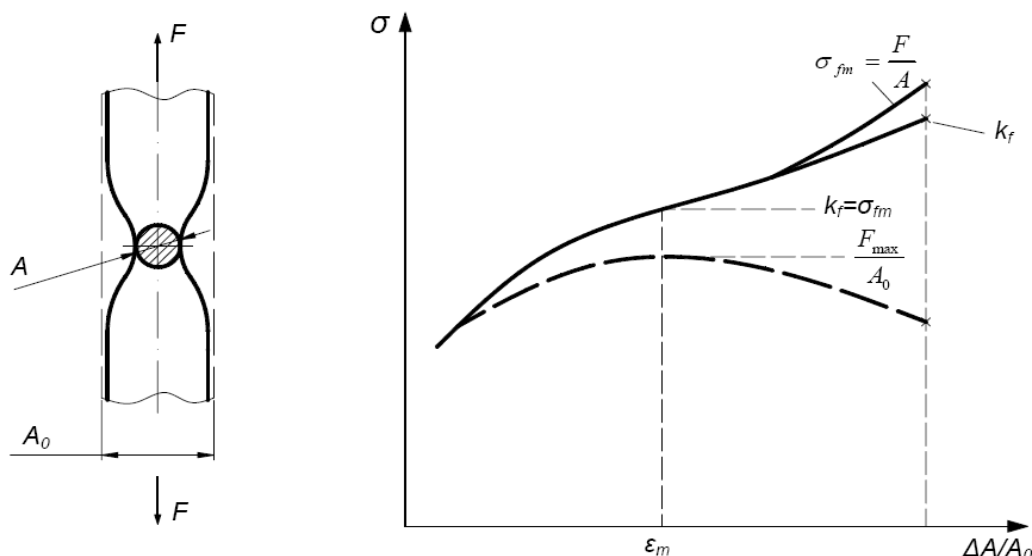
Prema Siebelu i Schwaigereru [3] ustanovljeno je da uvjeti ravnoteže postoje samo do trenutka pojave maksimalne sile nakon čega se javlja kontrakcija presjeka. Na Sl. 1 predstavljena je pojava vrata u vlačnom testu. Crtkano je predstavljena krivulja razvlačenja dok puna crta predstavlja odnos stvarne sile  $F$  i aktualnog presjeka  $A$ . Zbog nesavršenosti presjeka na mjestu kontrakcije koji nije pravilna kružnica krivulja tečenja  $k_f$  je u stvarnosti nešto ispod krivulje  $\sigma_{fm}$  (stvarno srednje naprezanje u ravnini presjeka). Ovisno o opterećenju u vlačnom testu srednje se naprezanje podudara s naprezanjem plastičnog tečenja, ali samo do trenutka pojave maksimalne sile. Nakon kontrakcije srednje se longitudinalno naprezanje ne podudara s naprezanjem tečenja, nije isto na svakom mjestu presjeka,

but the number of these materials available is in fact very modest. Owing to that reason, it is typical to conduct experiments according to the predominant state of stress and strain (tensile or upsetting) for cold forming operations, and upsetting tests at an elevated temperature as well as a torsion test for hot forming techniques. There are even some special methods of testing thin sheets, but in general there is no "best" experiment since each has a special field of application. The proper choice of testing method depends on the metal forming process to be simulated. For this reason the size and sort of test pieces cannot be chosen freely. If the flow curve is only to be determined for low strains, the tensile test is normally preferred because of its simplicity and also because for this experiment the conditions of testing have been defined by standards. This test is also preferred if the flow curve that has been determined for low strains can be extrapolated toward higher strains. For the range of uniform deformation it is usually assumed that stress is constant over the cross section of the specimen. Hence the flow stress is given by Eq. 1.:

where the cross section  $A$  is given by Eq. 2.:

The range of uniform deformation is limited by the elongation  $e_u$ , for which the maximum force is obtained. Beyond this elongation, deformation begins to become unstable because of necking. The major disadvantage of the tensile test is that necking occurs at rather low strains. For many metals Eq. 3. holds:

According to Siebel-Schwaigerer [3] it is proven that the conditions of equilibrium exist only up to the moment of maximum force and after this, necking occurs. Figure 1 presents the necking of tensile test. The dashed line presents the yield curve, while the full curve presents the proportion of effective force  $F$  and actual cross section  $A$ . Owing to the imperfection of the cross section, which is not the part of circle, the flow curve  $k_f$  is somewhat below of the curve of  $\sigma_{fm}$  (real mean stress in the cross section plane). Depending on tensile load, the mean tensile stress is in agreement with the flow stress of the treated material, but only until the moment of maximum force. After necking, the mean longitudinal stress is not equal to the flow stress, this stress is not equal in every place, and the deformation is inhomogeneous,



Slika 1. Pojava vrata u vlačnom testu (shematski) i raspodjela naprezanja  
 Figure 1. Necking of tensile test piece (schematic) and distribution of the stresses

deformacija je nehomogena, a unutrašnji su slojevi pod utjecajem naprezanja vanjskih. Prema Siebelu i Schweigereru naprezanje tečenja nakon pojave vrata može se odrediti kao:

while the internal layers are under the stress of external layers. After the phenomenon of necking, the flow curve can be determined according to Siebel and Schweigerer as:

$$k_f = \frac{F}{A_{\min} \cdot \left(1 + \frac{r}{4\rho}\right)} \tag{4}$$

gdje je  $A_{\min}$  minimalni presjek epruvete na mjestu kontrakcije kod zadane sile, dok je  $\rho$  radijus zakrivljenosti. Odgovarajuća je ekvivalentna ili logaritamska deformacija.

where  $A_{\min}$  is the minimum cross section in the necking zone at a given force, while  $\rho$  is the radius of the necking. The corresponding equivalent strain or real strain is given by

$$\varphi = \ln\left(\frac{A}{A_{\min}}\right) \tag{5}$$

Tim se načinom mjerenja može odrediti krivulja tečenja sve do jedinične deformacije ( $\varphi \cong 1$ ). Odgovarajući radijus zakrivljenosti  $\rho$  ponešto je teže izmjeriti i predstavlja kritični parametar u određivanju krivulje tečenja. Iz tog je razloga P.W. Bridgeman predložio izraz za proračunavanje odnosa  $d/\rho$  izbjegavajući time potrebu izravnog mjerenja radijusa zakrivljenosti [4]:

By this method the flow curve can be determined for strains up to the order of unity ( $\varphi \cong 1$ ). The corresponding radius of necking  $\rho$  is somewhat difficult for measurement and represents the critical value in the determination of the flow curve. Because of that, P.W. Bridgeman proposed an expression for the calculation of the relation  $d/\rho$ , and in so doing avoided the necessity of direct measurement of the radius of necking [4]:

$$\frac{d}{\rho} = 2 \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{A_0}{A} - 0.1\right)} \tag{6}$$

a time izraz za naprezanje tečenja glasi:

with that the expression for flow curve is:

$$k_f^B = \frac{F}{A} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{4\rho}{d}\right) \cdot \ln\left(1 + \frac{d}{4\rho}\right)} \quad (7)$$

Izraz (7) korišten je za usporedbu s vrijednostima određenima pomoću jednadžbe (4). U Tablici 1 prikazane su vrijednosti napreznja plastičnog tečenja određenih metodom Siebela i Schwaigerera ( $k_f^{SS}$ ) i onih pristupom Bridgmana.

Pokusi su provedeni na aluminiju Al99.5 s ukupno 29 različitih stupnjeva deformacija. Posljednji je uzorak onaj na kome se pojavljuje makropukotina i razumljivo više nije bilo moguće odrediti napreznje tečenja. Moguće je uočiti da razlike u tim metodama iznose do 20% (do deformacije  $\varphi \cong 0.8$  te se razlike mogu zanemariti) pa i više iznad kritične deformacije ( $\varphi \cong 1.98$ ). Prije je naglašeno da su to prevelike deformacije za pouzdano određivanje napreznja tečenja vlačnim testom. S druge strane, kako postoji namjera simulacije velikih deformacija uključujući trenutak loma, takav je pristup bio neizbježan. Kako nije moguće dobiti pouzdane podatke za deformacije iznad  $\varphi \cong 0.8$  neophodne za numeričku simulaciju metodom konačnih elemenata, konstruirana je srednja krivulja između Siebel-Schwaigererove i Bridgmanove te ekstrapolirana za veće deformacije. Pod tim pretpostavkama slijede u stvarnosti tri faze eksperimenta:

-prva faza u tijeku koje se može smatrati da je deformacija uniformna, produljenje jednoliko uzduž uzorka a napreznje se pretpostavlja konstantnim po presjeku.

-druga faza – kad se pojavljuje kontrakcija, pretpostavka uniformne deformacije i jednolikog napreznja više ne vrijedi, stvarna je deformacija nehomogena a napreznje se tečenja računa pomoću izraza (4) i (7).

-treća faza, kad se pojavljuju prve mikropukotine koje daljnjom deformacijom postaju makropukotine i konačno propagiraju u lom (slika 2, uzorak br. 29).

The expression (7) was used for comparison with values determined through the expression (4). Table 1 shows the values of flow curves determined by the Siebel-Schwaigerer method ( $k_f^{SS}$ ) and these are obtained through Bridgeman's approach.

The experiments were conducted using an aluminium alloy Al99.5 with a total of 29 different values of strains. The last one is the specimen where macro fracture occurs and of course the value of flow stress cannot be obtained. As it can be perceived, the differences using these two approaches are up to 20% (up to strain  $\varphi \cong 0.8$  those differences can be neglected) and even more beyond the critical strain ( $\varphi \cong 1.98$ ). It has been previously mentioned that this is too great of a strain for reliable flow stress in the tensile test. On the other hand, given that simulation of great deformation is intended, including the moment of fracture, such an approach was unavoidable. As it was not possible to have precise data for strains greater than  $\varphi \cong 0.8$  and this data was inevitable for numerical simulation and finite element analysis, a mean curve between Siebel-Schwaigerer and Bridgman curves was established and extrapolated for higher strains. Using such presumptions, there are in fact three phases of testing:

-the first phase during which the deformation can be regarded as uniform one, elongation is equal throughout the complete specimen and it is assumed that the stress is constant over the cross section.

-the second phase when necking occurs, the presumption of uniform stress and strain condition is no more valid, the deformation is not uniform, it is in fact inhomogeneous, and flow stress has to be calculated through the expressions (4) and (7).

-the third phase, when micro crevices develop and by propagation of the process become macro crevices i.e. fracture finally occurs (Figure 2, specimen nr. 29).



Slika 2. Eksperimentalni uzorci najvećih stupnjeva deformacija uključujući onaj s lomom (br. 29)

Figure 2. Experimental specimens with the greatest strains including the ones with the fracture phenomenon (nr. 29)

Tablica 1. Usporedba podataka naprezanja plastičnog tečenja prema Siebelu i Schwaigereru, te Bridgemanu  
 Table 1. Comparison of flow data obtained by the Siebel-Schwaigerer and Bridgman expression

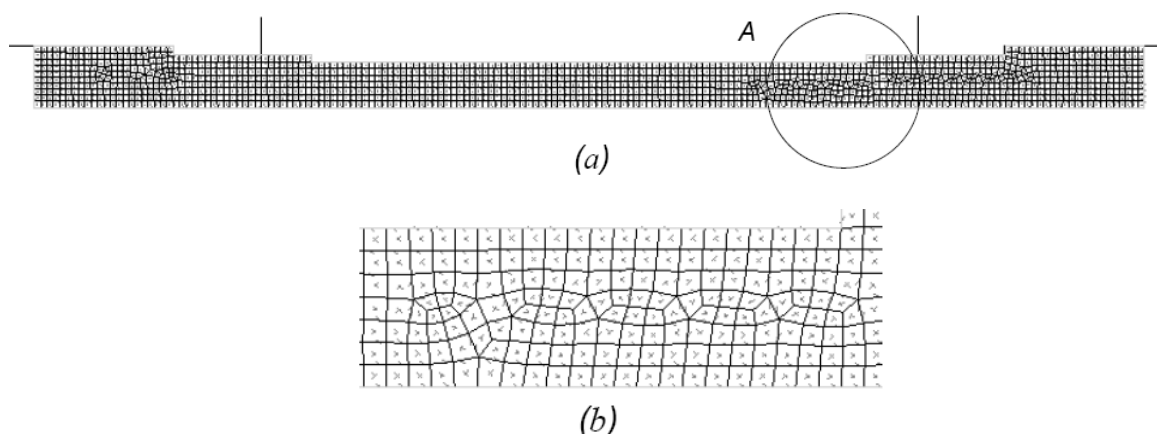
Epruveta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$k_f^{SS}$	65,57	73,72	80,47	82,75	88,09	88,72	109,53	121,18	125,22	132,58
$k_f^B$	66,88	73,72	80,47	82,75	88,09	88,72	109,53	124,02	123,69	126,06
$\Delta k_f [\%]$	1,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,023	1,23	5,17
Epruveta	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$k_f^{SS}$	140,36	149,11	150,66	172,18	169,59	173,05	184,92	183,98	194,05	192,19
$k_f^B$	131,48	137,51	133,84	149,79	147,37	148,80	157,07	156,04	162,50	160,72
$\Delta k_f [\%]$	6,75	8,43	12,56	14,94	15,07	16,29	17,73	17,9	19,41	19,58
Epruveta	21	22	23	23	25	26	27	28	29	/
$k_f^{SS}$	186,04	174,24	164,07	148,67	160,08	140,20	127,64	95,52	/	
$k_f^B$	155,42	143,89	136,91	124,03	129,91	113,73	103,38	77,46	/	
$\Delta k_f [\%]$	19,70	21,09	19,83	19,86	23,22	23,27	23,46	23,31		

## 2. REZULTATI SIMULACIJE I NJIHOVA INTERPRETACIJA

Ovaj dio rada usmjeren je na prikaz rezultata dobivenih simulacijom te mogućnošću njihove praktične primjene u vlačnom testu uključujući trenutak stvaranja pukotine odnosno loma. Ispitana su dva različita i moguća načina modeliranja vlačnog testa: 2D modeliranje i 3D modeliranje. Za upotrijebljeni materijal izabran je Youngov modul elastičnosti  $E = 70\ 000\text{N/mm}^2$ , Poissonov koeficijent  $\nu = 0,3$ , dok je brzina alata odgovarala onom u stvarnosti od  $v = 0,028\text{mm/s}$ . Numerička je analiza provedena korištenjem MARC II softverskog programa. Proces deformacije u zoni kontrakcije uključuje veliku plastičnu deformaciju s velikim distorzijama i rotacijama elemenata. Nelinearna analiza uvijek zahtjeva inkrementalno rješavanje i poneki

## 2. SIMULATION RESULTS AND THEIR INTERPRETATION

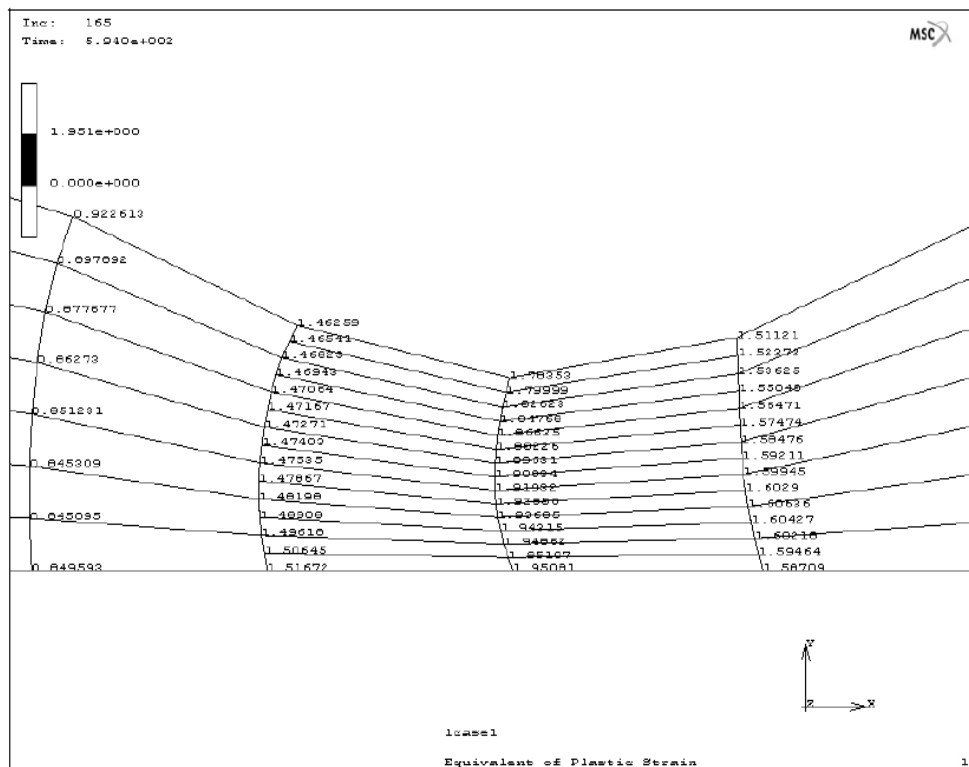
This section of the paper focuses on the achieved simulation results and possible practical applicability in tensile testing, including the moment of fracture. Two different along with possible ways of modelling the tensile test: 2D modelling and 3D modelling were examined. For material data Young modulus of elasticity  $E = 70\ 000\text{N/mm}^2$ , Poisson ratio of  $\nu = 0,3$ , was used, while the velocity of the tool was in accordance with the real state of the experiment  $v = 0,028\text{mm/s}$ . The numerical analysis was performed using the MARC II software package. The deformation process, particularly in the necking zone, involves extensive plastic deformation together with large strains and rotations. Nonlinear analysis always requires incremental



Slika 3. optimirana mreža elemenata (a) i zona prihvatljive distorzije elemenata (b)  
 Figure 3. Optimised mesh (a) and zone of acceptable distortion of elements (b)

put iteraciju postupka unutar pojedinog inkrementa osiguravajući ispunjavanje uvjeta ravnoteže na kraju svakog ciklusa. Izabrana je potpuna Newton-Raphsonova iterativna procedura pri rješavanju nelinearnih jednadžbi pomaka. U tom postupku osigurana je kvadratna konvergencija, a matrica krutosti formira se opetovano na kraju konačnog rješenja svake iteracije. To znači da u aktualnoj iteraciji relativna pogreška opada s njezinom kvadratnom vrijednošću. Ako su prisutne nelinearnosti ponašanja materijala, konvergencija je ponešto usporena zbog aproksimacija, ali je to manje izraženo u slučaju korištenja iterativnog rješenja. Koristi se teorija konačnih deformacija u rješavanju velikih pomaka, pa se primjenjuje opcija velikih pomaka, konačne plastične deformacije i revidirani Lagrangeov postupak. Pri takvu revidiranom postupku matrica krutosti ponovo se formira u aktualnoj konfiguraciji elemenata, podaci napreznja i deformacija dani su u koordinatnom sustavu revidiranog oblika elemenata, a Hillov je varijacijski princip prezentiran tako da je u njemu sadržan elasto-plastični konstitutivni zakon. Konstitutivne jednadžbe i algoritmi proračuna napreznja imaju ključnu ulogu u ispravnoj analizi procesa deformiranja. Kako je neophodno zadovoljiti inkrementalnu objektivnost pri proračunu napreznja na ispravan način na kraju svake iteracije, jednadžbe brzina originalno dane pomoću Jaumannove brzine porasta napreznja i brzine deformacija prevedene

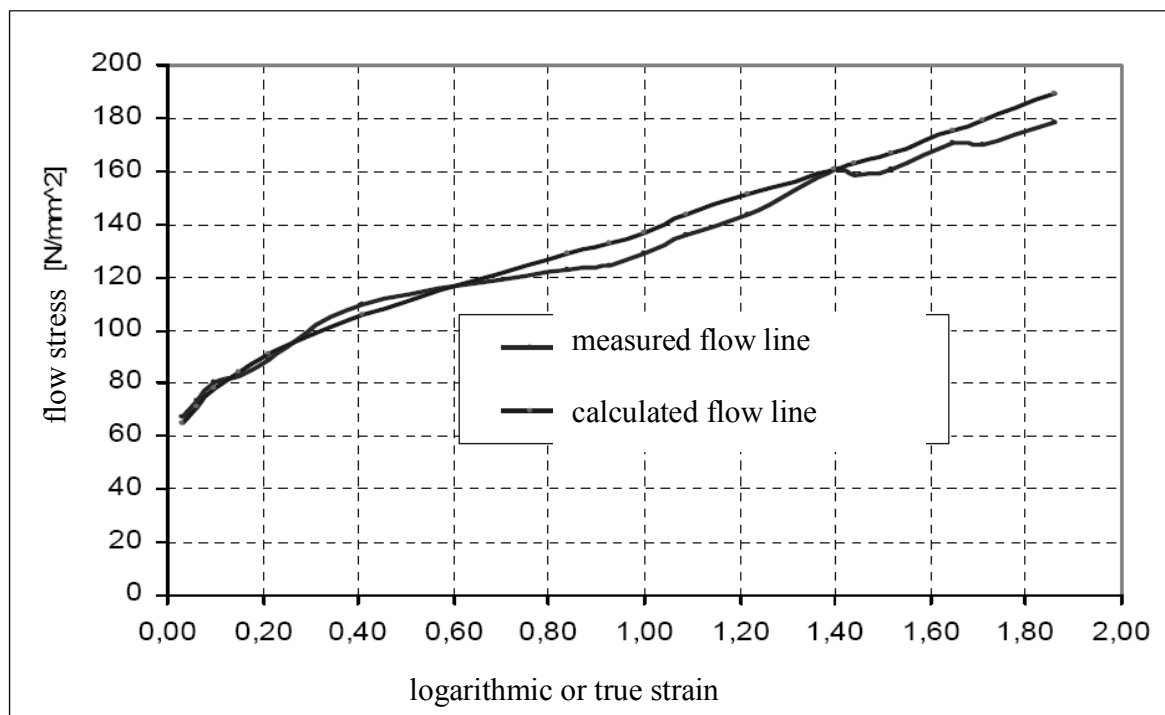
solution and sometimes recycles within each load/time increment to ensure that equilibrium is satisfied at the end of each step. In the presented case the complete Newton-Raphson iterative procedure is chosen to solve the iteration process and nonlinear equations of motion. The method has quadratic convergence properties and the stiffness matrix is reassembled upon each iteration. This means that in subsequent iteration the relative error decreases on a quadratically. If material nonlinearities are present, some approximations are slowed down due to convergence, but that is less significant than when iterative solvers are used. The finite deformation theory must be utilized for the calculation, and consequently the large displacement, finite strain plasticity and updated Lagrange procedure was adopted. In the updated Lagrangian approach, the element stiffness matrix is assembled in the current configuration of the element, the stress and strain output is given with respect to the coordinate system in the updated configuration of the element and Hill's reference –a state based on the variation principle that is expressed in such a form that an incremental type of elastic-plastic constitutive relation is incorporated into it. The constitutive equations and the stress calculation algorithm play a crucial role in the proper analysis of the process. As it is necessary to satisfy incremental objectivity exactly when calculating stresses at the end of the step, the rate equations, originally given in the terms of the Jaumann stress rate, and the rate of



Slika 4. Adaptivno generirana mreža elemenata u području zone plastične deformacije  $\phi = 1.44$   
Figure 4. Adaptively generated mesh in the zone of plastic strain  $\phi = 1.44$

su u smislu drugog Piolla–Kirchofova tenzora napreznja i Green–Lagrangianova tenzora napreznja, koji su u slučaju konačne deformacije neutralni. Pretpostavljajući izotropno očvršćivanje i zanemarujući utjecaj brzine zbog prirode postupka, izabrana je nepozitivno konačna kontrola rezultata. Kako su prisutni veliki pomaci, uzeta je u obzir pri formiranju matrice krutosti dodatna opcija koja uključuje određivanje inicijalne matrice krutosti. Kao pretpostavku analiza koristi potpuni tenzor napreznja na kraju svake iteracije, što općenito rezultira najbržom konvergencijom. Aksijalno simetrični kvadrilateralni elementi primijenjeni su u 2D analizi. Jedan je od prvih koraka određivanje optimalne veličine elemenata, tj. broja elemenata koji daju racionalno prihvatljivi rezultat uz dozvoljenu distorziju i vrijeme računanja (vidi sliku 3). Kako se mreža odnosi na deformirajući materijal, distorzija elemenata i mreže rezultira neispravnim rezultatom. Da se to prevlada, prvi i najjednostavniji način je

the deformation strain are rewritten in the terms of the second Piola - Kirchof stress tensor and the Green – Lagrangian strain tensor, which are in the case of deformation neutralized. Assuming isotropic hardening and the rate independent plasticity law due to the nature of the physical problem, a non-positive definite solution control is selected. Since large displacements are present, an additional option that is taken into consideration when forming matrixes includes the determination of the initial stiffness matrix. By default, the analysis program uses the full stress tensor at the end of each, which in general results in the fastest convergence. Axisymmetric quadrilateral elements are applied for the 2D analysis. One of the first steps includes the determination of the optimum number of elements, i.e. the number that gives rationally acceptable results along with an allowed distortion and time of calculation (see Figure 3). Since the mesh is attached to the deforming material, the distortion of the element mesh leads to a degeneration of results. To overcome this problem, the first and simplest way is a good



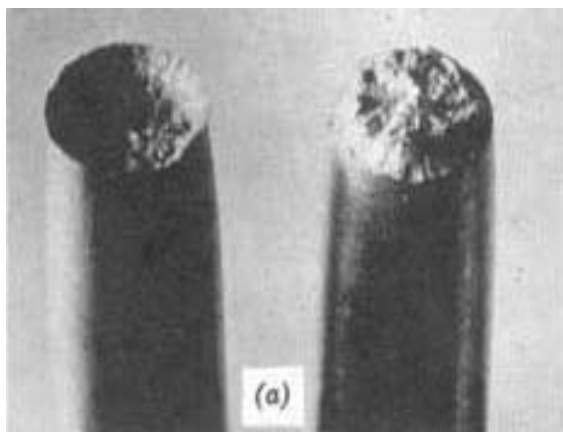
Slika 5. Usporedba eksperimentalno određene krivulje napreznja plastičnog tečenja i one dobivene numeričkom simulacijom za 3D slučaj

Figure 5. The comparison between the experimentally determined flow curve and the flow curve obtained by numerical simulation for the 3D case

izbor ispravne inicijalne veličine elementa, tj povećanje broja elemenata. Poneki put to ne vodi rješenju, tako da je drugi put korištenje opcije adaptivnog umrežavanja gdje se kriteriji greške poput Zienkiewicz-Zhu kriterija, maksimalnih napreznja ili neki drugi koji stoje na raspolaganju uvode i omogućavaju lokalno povećanje

choice of the initial element size, i.e. to increase the number of elements. Sometimes it does not lead to the goal, and the second way is the use of adaptive meshing where error criteria such as Zienkiewicz-Zhu, maximum stress or some other available condition which enables the local mesh to be refined by adaptation.

broja elemenata. Time je broj elemenata i čvorova na kritičnom mjestu povećan i to redovito dovodi do bitnog povećanja točnosti dobivenog rješenja. Treće i u nekim slučajevima najbolje rješenje analize velikih deformacija i prevladavanja problema jest upotreba opcije "mesh rezoning". Ta je opcija razvijena i povezana s postojećim načinom kodiranja u predmetnom softveru i inkorporirana u program za opću nelinearnu analizu metodom konačnih elemenata. U cilju popravljivanja suviše distordirane mreže, aktualno formirana mreža konačnih elemenata periodično se korigira nakon što je postignuta određena specifična vrijednost deformacije. Ta redefinicija modela temeljena je na deformiranom obliku i na aktualnom stanju tečenja materijala, tj. transferiranju podataka iz stare mreže na novoformiranu putem interpolacije. U ovom trenutku u raspoloživoj verziji Mentata ta opcija još nije potpuno suportirana, već samo ona kojom je moguće ukupne pomake dodati u novim koordinatama. Rezultat je takva postupka popravljena mreža na deformiranoj konfiguraciji modela koja predstavlja osnovu za buduće iteracije. Usporedba eksperimentalno određene krivulje naprezanja plastičnog tečenja i one dobivene numeričkom simulacijom za 3D slučaj prikazana je na slici 5.

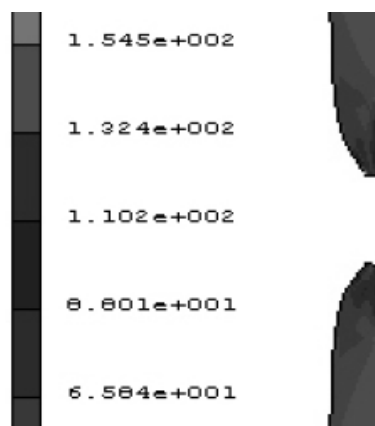


Slika 6. Vizualna sličnost mjesta loma u eksperimentu i onog dobivenoj 2D simulacijom  
Figure 6. Visual similarity of fracture obtained in experiment and due the 2D simulation

Međutim, uslijed prisutne velike distorzije 2D elemenata u ovom je slučaju bilo uputnije koristiti odgovarajuću opciju adaptivnog umrežavanja, dok je solucija "mesh rezoning" odabrana za 3D simulaciju. Imajući u vidu matematički prisutne aproksimacije ravnoteža nije bila u potpunosti ispunjena. Iz tog su razloga odabrani mali koraci povećanja opterećenja, nastojeći tako imati male pogreške u "rezoning" procesu i izbjeći pogrešku pojave efekta bez opterećenja. Na ovom je mjestu potrebno naglasiti da su sve tzv. poruke kojima se dijagnosticira stanje, poput vrijednosti singulariteta matrice i odnosa između najdulje i najkraće stranice elementa bile pod kontrolom i u prihvatljivim granicama. Ipak i pored toga potrebno je uočiti (slika 4) da je distorzija u

This procedure results in a greater number of elements and nodes in the region where adaptive meshing is being applied, and usually leads to substantial improvement in the accuracy of the solution. The third and in some cases most powerful method in large strain finite element analysis to overcome this problem is the element mesh rezoning philosophy. This solution has been developed in conjunction with appropriate computer coding implemented into a general purpose nonlinear finite element program. In order to correct the distorted shapes, the actual finite element mesh can be periodically redefined after some amount of deformation has occurred. This redefinition of the model is based on the deformed shape and on the current state of the material flow i.e. transfers of the information from old to new mesh through interpolation. For the time being, the current Mentat version does not fully support the rezoning option and the only relevant option is "rezone mesh", which adds the total displacements to the original coordinates. The result of this operation is a truly deformed mesh which serves as a basis for new mesh defined by the deformed configuration.

The comparison between the experimentally determined flow curve and the flow curve obtained by numerical simulation for the 3D case is shown in Figure 5.



However, owing to the very great distortion of 2D elements, it was in this case the more appropriate adaptive meshing solution that was used, while the mesh rezoning option was used in 3D simulation. Due to mathematically approximate operations, equilibrium was not entirely satisfied. For this reason a very small increase in load step was performed in the subsequent analysis, so that the small errors by the rezoning process are passed by and no unloading effects occur.

It has to be emphasized here that all diagnostic messages such as the singularity ratio of the matrix and the aspect ratio as the quotient between the longest and shortest element dimensions, have been controlled and acceptable. Yet the distortion in 2D simulation according to Figure 4



2D simulaciji vrlo velika unatoč adaptivnome umrežavanju. U 3D simulaciji upotrijebljeni su tetraedarski elementi s deset čvorova br. 127 (MARC-numeracija). Kod generiranja mreže najprije se stvaraju oni na površini, a potom automatski oni prema unutrašnjosti s odgovarajućim faktorom pogrubljenja. Na taj su način elementi blizu simetrale veći, broj čvorova u kojima se vrši računanje manji, no ustanovljeno je da točnost proračuna time nije smanjena. Posve jasno ovime je i vrijeme računanja i simulacije proporcionalno smanjeno.

### 3. Zaključak

Općenito je moguće utvrditi:

- 2D simulacija je jednostavnija kako u modeliranju tako i u postupku generiranju mreže elemenata
- veličina i distorzija elemenata lako su uočljivi i po potrebi se može ustanoviti nova mreža
- vrijeme je znatno kraće (20 minuta u usporedbi sa 10 ili više sati)
- točnost je u slučaju 3D modela bitno veća, a rezultat bliži stvarnome stanju (slika 5)

### POPIS OZNAKA

početni presjek	$A_0$	-	mm <sup>2</sup>
sila	$F$	-	N
naprezanje tečenja	$k_f$	-	N/mm <sup>2</sup>
duljina epruvete	$l_0$	-	mm
produženje	$\Delta l$	-	mm
Hooke-ovo naprezanje	$\sigma$	-	N/mm <sup>2</sup>
brzina	$v$	-	mm/s

### LITERATURA REFERENCES

- [1] Doege M., Nolkemper S.: *Fließkurvenatlas metalischer Werkstoffe*, Wien, 1986.
- [2] Полухин П. Н.: *Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов*, Москва, 1993.
- [3] Siebel. E.: *Zur Mechanik der Zugversuches*, Berlin, 1948.

Originalni znanstveni rad

Adresa autora / Authors' address:

Prof. dr. sc. Miljenko Math, dipl. ing.

Zdenka Keran, dipl. ing.

Marko Škunca, dipl. ing.

Hrvoje Balija, student

Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje

Ivana Lučića 1

HR-10000 Zagreb, Hrvatska

is great regardless of adaptive generation of elements. In 3D simulation the ten nodes tetrahedral element Nr. 127 (MARC numeration) suitable for great distortion was used. By generating the volume element mesh, first the elements on the surface of the specimen are generated and later the meshing is automatically generated toward the inner zone by the coarsening factor. In this way the element in the centre is not so fine, reducing the number of nodes but not the influenced on the accuracy of solution. Of course the computing time has also been proportionally reduced.

### 3. Conclusion

Generally it can be stated:

- 2D simulation is simpler, both in modelling and in the element generation process
  - amount and distortion of an element are easy to see, and if necessary a new mesh can be determined
  - time is considerably shorter (20 minutes in comparison with 10 hours or more)
- accuracy is much greater in the 3D model and the solutions are more reliable (see Figure 5)

### LIST OF SYMBOLS

initial crosssection
force
flow stress
initial specimen length
elongation
Hooke stress
velocity

- [4] Bridgman P. W.: *The stress distribution at the neck of the specimen*, Trans. Am. Soc. Metals 32, pp.553/74, 1944.

- [5] MARC User manual: *Metal forming using finite element method*, 2001.

Original scientific paper