

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: CAD/CAM/CAE I

Број индекса: 154/2012

Никола М. Марић

**Нумеричко моделирање процеса
изотермалног ковања осовине вештачког
кука од титанијумске легуре
-завршни рад-**

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Весна Мандић - ментор
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ

ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА У КРАГУЈЕВЦУ

Катедра за: ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО

Предмет: CAD/CAM/CAE I

ЗАВРШНИ РАД

са темом:

Нумеричко моделирање процеса изотермалног ковања осовине вештачког кука од титанијумске легуре

Кандидат: Никола Марић, број индекса 154/2012.

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да:

Дати упоређење класичног ковања осовине вештачког кука од челика, и изотермалног ковања од титанијумске легуре, при различитим брзинама ковања.

Препоручена литература:

[3] **ASM International®**, (1988), *Volume 14 Forming and Forging*;

[11] **Весна Мандић**, (2012), *Физичко и нумеричко моделирање процеса обраде деформисањем*, Крагујевац;

Крагујевац, октобар 2015. год.

Ментор:

Др. Весна Мандић ван. проф.

Садржај:

1. Увод.....	1
2. Изотермално ковање	2
2.1 Подмазивање.....	5
2.2 Материјал алата.....	6
2.3 Облик припремка	8
2.4 Предности изотермалног ковања у односу на конвенционално ковање.....	8
3. Нумеричко моделирање процеса обраде деформисањем.....	11
3.1 Метода коначних елемената	12
3.1.1 Идеализација	13
3.1.2 Дискретизација.....	14
3.1.3 Врсте <i>FE</i> елемената.....	15
3.1.3 Фазе <i>FE</i> анализе	16
3.2. Моделирање процеса <i>FEM</i>	18
3.3 Улазни подаци за нумеричко моделирање процеса	19
3.3.1 Особине и понашање материјала	19
3.3.2 Геометрија.....	20
3.3.3 Генерисање и регенерисање <i>FE</i> мреже.....	21
3.3.4 Услови у међуконтакту (трење и трансфер топлоте).....	22
3.4 Применљивост <i>FE</i> софтвера.....	24
4. Нумеричко моделирање ковања вештачког кука од челика.....	26
4.1 Улазни подаци симулације	27
4.2 Резултати симулације	28
5. Нумеричко моделирање процеса изотермалног ковања вештачког кука од титанијумске легуре.....	34
5.1 Симулација 1.	34
5.2 Симулација 2.	39
5.3 Симулација 3.	45
5.4 Симулација 4.	50
6. Анализа резултата и закључак	56
7. Литература.....	57

Резиме:

У овом раду је вршено упоређивање технологије класичног ковања осовине вештачког кука, са технологијом изотермалног ковања од титанијумске легуре. Изотермално ковање је ковање где су алати загрејани на темпарутуру која је иста, или приближно иста температури припремка.

Упоређивање је рађено применом *CAD/CAM/CAE* технологија. Модели алата су увезени из софтверског пакета *CATIA V5*, а симулација процеса је рађена у софтверском пакету, базираном на методи коначних елемената, *simufact. forming 12.0*.

Укупно је урађено пет различитих симулација, једна симулација ковања од челика, и четири симулације ковања од титанијумске легуре, које се разликују по брзинама деформисања и температурама алата. Резултати симулација су приложени на сликама.

Кључне речи:

изотермално ковање, вештачки кук, нумеричке симулације, МКЕ.

Abstract:

In this work was done comparing the classical technology of forging shaft of artificial hip with technology isothermal forging of titanium alloy . Isothermal forging is a forging where the tools are heated to temperature which is the same , or nearly the same temperature of preform.

Comparison is done using CAD / CAM / CAE technology . Mockups are imported from CAD package CATIA V5, a simulation process is done in the software package , based on the finite element method , *simufact. forming 12.0*.

Total made five different simulations , one simulation of forging steel , and the four simulations forging of titanium alloy , which differ in strain rate and die tools temperature. Simulation results are included in the figures.

Keywords:

isothermal forging, artificial hip, numerical simulation, FEM

1. Увод

У данашње време сусрећемо се са великом понудом различитих индустријских производа као што су алати, машине, машински системи. Сви они представљају материјализован производ људског ума и служе извршавању неке функције. Процес њихове производње започиње идејом, затим пројектном документацијом и завршава изградом у погонима.

Савремена индустрија има потребу да се развојне и истраживачке активности одвијају ван текуће производње, у развојним лабораторијама при фабрикама, или у истражачким центрима при институтима, и универзитетима. Активности на истраживању и развоју процеса ван производног окружења, могу се класификовати као моделирање и симулација. У односу на традиционално пројектовање процеса које је базирано на искуственом раду инжењера, доноси значајно смањење времена и трошкова при развоју производа. Предност оваквог начина пројектовања је могућност пројектних измена, како геометрије производа тако и параметара процеса, а све то уз минималне трошкове. У оваквим условима могућа је оптимизација пројектовања производа и процеса, предвиђање отказа и грешака производа. Смањење времена, самим тим и смањењем цене коштања развоја производа постиже се применом нумеричких симулација, у раној фази пројектовања. Технологија у којој нумеричке симулације налазе велику примену при развоју производа је и свакако технологија пластичног обликовања метала [1].

Технологија пластичног обликовања метала обухвата технолошке процесе код којих се под дејством довољно великог спољашњег оптерећења остварује пластична деформација, односно трајно мења облик полазног материјала. У току процеса пластичног обликовања у материјалу долази до значајних квалитативних промена тако да се његова механичка, технолошка и друга својства разликују од својстава које је имао пре процеса. Овом технологијом се добијају делови различитих облика и димензија, од различитих металних материјала у великом распону тачности и квалитета обраде. Полазни материјал је најчешће полуфабрикат у облику: лимова, плоча, цеви, пуних профила итд. који се такође добијају примарним процесима пластичног обликовања. Технологијом пластичног обликовања је могуће добити разне делове који налазе примену у: индустрији свих врста возила (аутомобили, возови, авиони итд.), индустрији везивних елемената, војној индустрији, итд., међу којима је и производња медицинских имплантата, у коју свакако спада и вештачки кук [2].

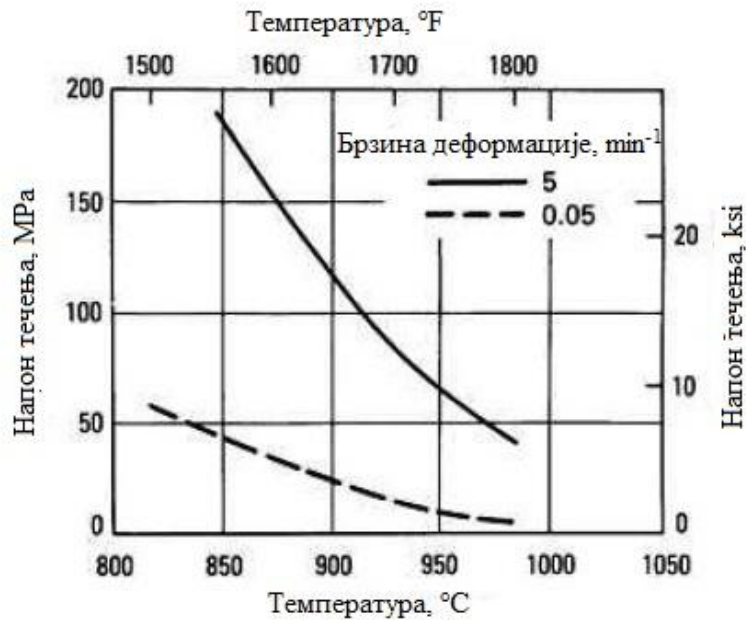
2. Изотермално ковање

Изотермално ковање је специјалан поступак пластичног обликовања метала који се налази у примени у индустрији почевши од 1960. године. Користи се за производњу делова за авио индустрију, лопатица турбине турбо млазног мотора, биомедицинских имплантата... Овом технологијом је могуће добити и тзв. *Near net shape* производе, односно производе чије димензије и квалитет површине одговарају финалном производу, или им је потребна само завршна механичка обрада.

Суштина процеса се огледа у томе да је температура алата, који је у контакту са припремком, на приближно истој, или мало мањој температури од температуре припремке. На тај начин је обезбеђена приближно константна температура припремке дуж целог процеса ковања, што је веома битно код неких материјала чији је напон течења веома осетљив на температуру и брзину деформације, као што су легуре титанијума и никла [3].

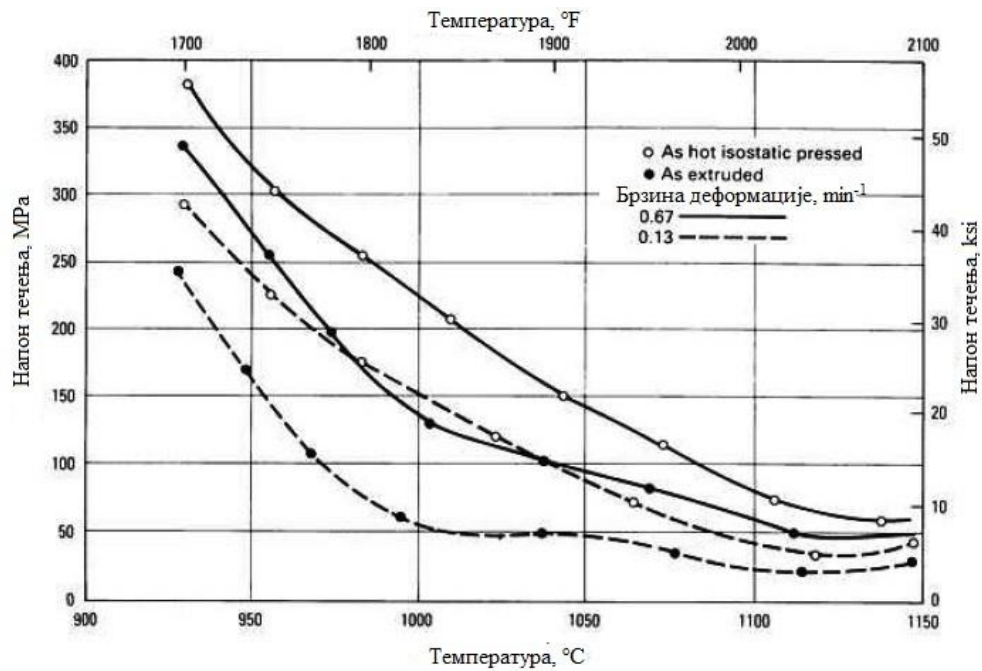
Код класичног ковања у алатима, алати се предгревају на 100 до 250 °C за ковање на чекићу, док се код ковања на пресама температура алата налази између 100 и 400 °C. Са друге стране температуре које захтева припремак су знатно веће, за титанијумске легуре од 850 до 980 °C [4], а за легуре на бази никла и челика од 980 до 1200 °C [3]. Такође, класично ковање се изводи при великим брзинама деформисања од 0,03 до 0,5 $\frac{m}{sek}$ за хидрауличне пресе, а за чекиће чак од 5 до 7 $\frac{m}{sek}$ [5].

Легуре титанијума и никла карактерише то да им је напон течења веома осетљив на промену брзине деформације и температуре. Са *слике 1* се види како промена температуре, или брзине деформације драстично утиче на напон течења *Ti-6Al-4V* легуре, промена температуре од само 100 °C повећава напон течења за дупло или чак више.



Слика 1. Утицај температуре и брзине деформације на напон течења Ti-6Al-4V [3]

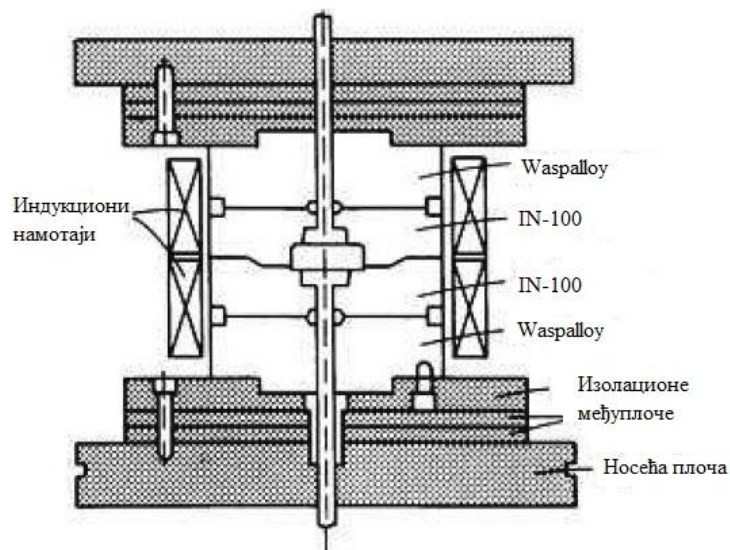
Такође сличан ефекат се запажа и код Alloy 95, (слика 2). Додатно, поменуте легуре имају веома узак спектар температура при којима се успешно обликују па је класично ковање ових легура пропраћено високим деформационим отпором, великим оптерећенима као и пукотинима у отковку.



Слика 2. Утицај температуре и брзине деформације на напон течења Alloy 95 [3]

Ове недостатке класичног поступка ковања је могуће заобићи ковањем при повишеним температурама алата, односно изотермалним ковањем при чему су температуре алата приближно исте или ниже од температуре припремка. Високе температуре алата се постижу и одржавају применом индукционих грејача, отпорних грејача, инфрацрвених грејача итд [3].

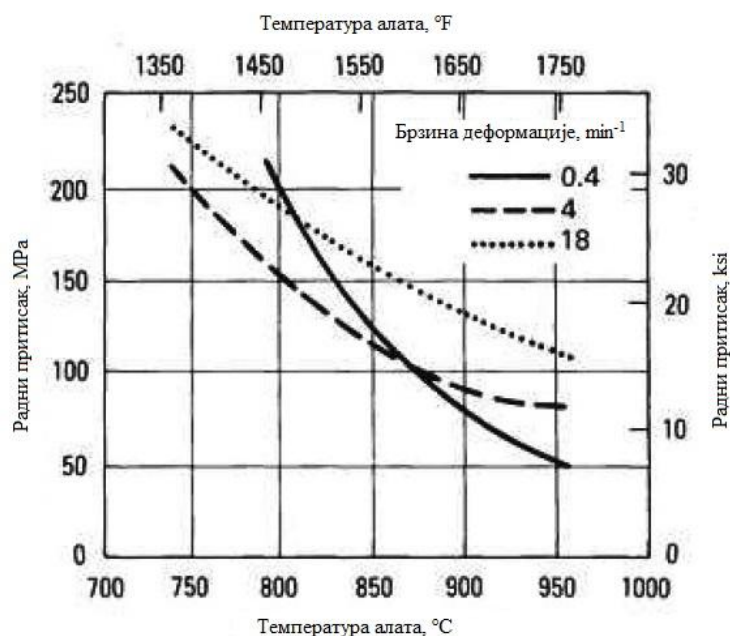
На слици 3 је приказана шема једног начин грејања алата путем индукционих грејача. Алати су обмотани индукционим намотајима кроз које пролази електрична струја. Индукциони намотаји се праве од бакра, у облику су цеви и лако се савијају око различитих облика алата. Кроз цеви протиче вода која их хлади. У циљу подједнаког загревања алата по целој запремини, кроз намотаје протиче наизменична струја фреквенције од 40 до 100 Hz. Велике разлике у температури по целој запремини алата могу довести до великих термичких напрезања и евентуално до пуцања алата [6].



Слика 3. Шема грејања алата путем индукционих грејача [3]

У алатима се налазе отвори, у којима су постављени термодетектори, који мере температуру и управљају грејачима, односно пале их и гасе у зависности од потребе, како би се температура алата одржавала у задатом оквиру. Између стола пресе, притискивача пресе и грејаних алата се налази више међуплоче које имају функцију да изолују сто и притискивач пресе од високих температура алата, које би могле неповољно да утичу на димензијску тачност пресе или чак сам хидрулични систем пресе [3].

Правила одабир температуре алата је један од одлучујућих фактора за успешну обраду изотермалним ковањем. Утицај температуре алата на радни притисак је дат на *слици 4* за ковање $Ti-6Al-4V$ легуре. Као што се види са *слике 4*, пад температуре са 950 на 730 °C има за последицу дуплирање радног притиска, што са друге стране може утицати на боље испуњавање сложеније гравуре. Одабир температуре алата је битан и за одабир материјала алата који треба да поднесе високе температуре. Такође, микроструктура површинског слоја одређених легура је условљена температуром алата [3].



Слика 4. Утицај температуре алата на радни притисак при различитим брзинама деформације $Ti-6Al-4V$ легуре [3]

2.1 Подмазивање

Један од највећих проблема при усвајању технологије изотермалног ковања је проналажење адекватног мазива. Наиме, конвенционална мазива на повећаним температурама брзо испаравају, разграђују се или реагују са топлим алатима, па се из тог разлога не могу користити.

Основне захтеве које мазиво треба да испуни при изотермалном ковању су :

- Мали коефицијент трења.
- Добра јачина нанетог филма, поготову на местима радијуса заобљења алата где је примећено интензивно хабање, тзв. Галинг, који настаје услед адхезионог везивања титанијумове или алуминијумове легуре са материјалом алата.
- Да спречи дифузију између припремака и алата, поготову при крају процеса ковања.
- Да заштити материјал припремака од интерстицијске контаминације током загревања и ковања [7].

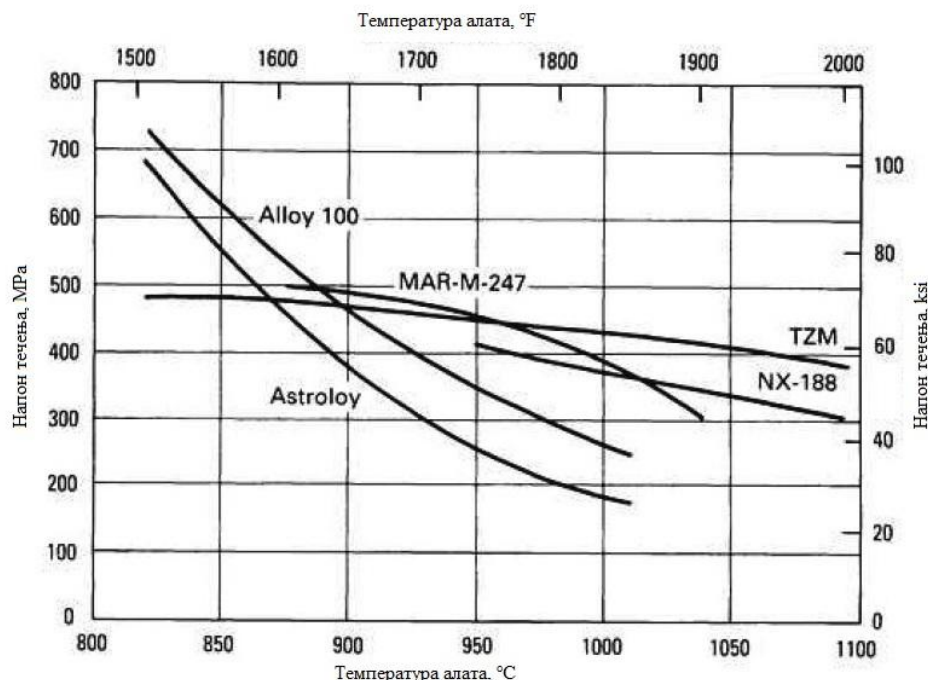
За температуре алата до 650 °C графитна мазива су прихватљива, док на већим температурама морају се користити мазива на бази стакла, или борон-нитрида [3].

Мазива на бази стакла која се користе при изотермалном ковању се састоје од стакла у облику праха, који се меша са водом и одређеним адитивима док се не направи суспензија. Тако добијена мешавина се прска на припремак, или се припремак потапа у мешавину. Како се радни комад загрева, вода испарава остављајући само честице стакла. Када температура порасте довољно високо, честице стакла се топе и шире по површини припремака. Како температура расте, вискозност стакла се смањује, па стакло почиње да се понаша као мазиво.

Пошто је већ речено да је битно обезбедити тачно одређену температуру припремака при ковању, губитак температуре се јавља при преносу припремака из машине за загревање до загрејаних алата, али и у контакту са алатом при ковању пошто је температура алата нижа. Уколико је мазиво нанесено, оно има и функцију изолатора, тако да је и мање губљење топлоте током процеса. Такође пошто се мазиво наноси на припремак пре загревања, припремак је и заштићен од оксидације [8].

2.2 Материјал алата

Материјал алата који се користи у изотермалном ковању мора да има велику отпорност на пузање али и довољну пластичност како не би дошло до пуцања алата, релативно велики коефицијент топлотне дифузије како би се смањиле температурне разлике, високу отпорност на оксидацију при повећаним температурама, висок модул еластичности и мали коефицијент термичке дилатације. Материјали који испуњавају ове услове су легирани челици *DIN 1.2344* и *DIN 1.4871* који се могу загревати до 600 °C. За веће температуре алата користе се легуре на бази никла као што су *Alloy 100*, *Astrolloy*, *NX 188*, *MAR-M-247*. Такође, користе се и молибденове легуре, као што је *TZM* (Титаниум-Циркониум-Молибден). На слици 5 је приказан напон течења неких легура при високим температурама које алат постиже при изотермалном ковању.



Слика 5. Напон течења легура алата у функцији температуре алата [3]

Легура молибдена *TZM* је најприхватљивији материјал алата код изотермалног ковања легура на бази никла које се кују при температурама од 1040 °C или вишим, док су *Astrolloy* и *IN 100* препоручљивији за изотермално ковање α - β титанијумове легуре, као што је *Ti-6Al-4V*, који се кује од 850 до 980 °C. За β титанијумове легуре као што је *Ti-10V-2Fe-3Al* који се кује на температурама од 820 °C или ниже, *Alloy 718* или *Alloy 713LC* представљају задовољавајуће компромисе [3].

Проблем употребе легуре молибдена *TZM* као материјала алата је у томе што има тенденцију да интензивира оксидира на температурама већим од 430 °C. Из тога разлога мора се обезбедити затворена атмосфера, било у вакууму или са инертним гасом. То значајно компликује саму машину, пошто је потребно обезбедити херметичност у преси око алата, компликује и сам процес израде, односно уношење и изношење припремке и отковка, продужује укупно време израде а као последица свега тога је и већа цена коштања.

Са друге стране већина легура никла не захтева посебну атмосферу, већ се може загревати на нормалном ваздуху. Због тога ови алати не захтевају специјалне машине, ни надоградње, осим система за грејање алата, па се могу сместити у пресе које се користе и за конвенционално ковање [3].

2.3 Облик припремка

Још један битан фактор за успешну реализацију изотермалног процеса ковања је и облик припремка с обзиром да утиче на попуњавање алата, појављивање преклопа и пукотина и других дефеката при ковању, величину металног зрна преко величине и једноликости пластичне деформације као и на квалитет површине преко свог утицаја на разливање мазива [7].

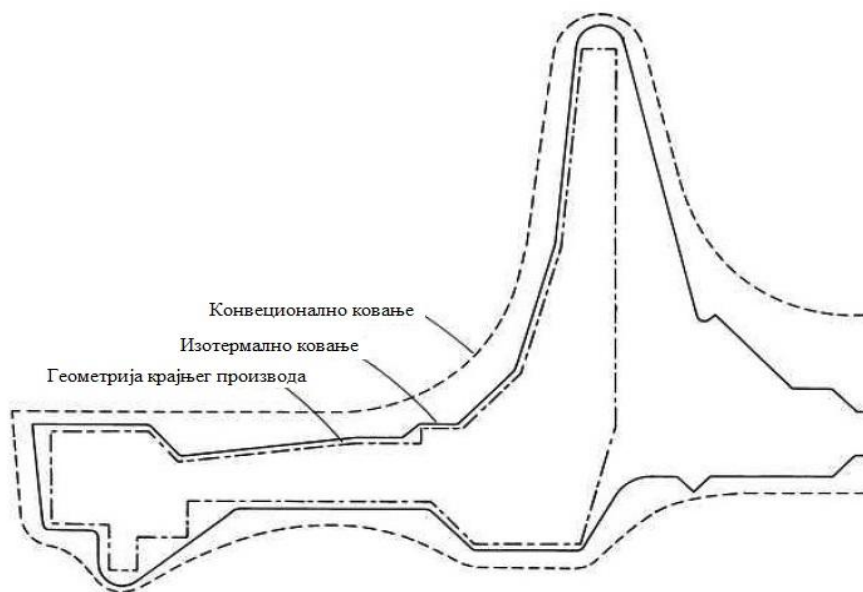
Један начин је конструисати комплексан облик припремка, веома близак коначном отковку, који се прво обрађује операцијама конвенционалог ковања, а затим се као завршни процес користи изотермално ковање како би се део довео до комплексне геометрије и предвиђене толеранције. Новији приступ је да се добије релативно једноставан облик у припремним операцијама које се кују на конвенционалан начин, а затим као завршно ковање се користи изотермални поступак.

У неким случајевима, као што је изотермално ковање суперпластичних легура, коначан облик отковка се добија у само једној операцији изотермалног ковања без потребе за припремним ковањем.

2.4 Предности изотермалног ковања у односу на конвенционално ковање

1) Смањена потрошња материјала

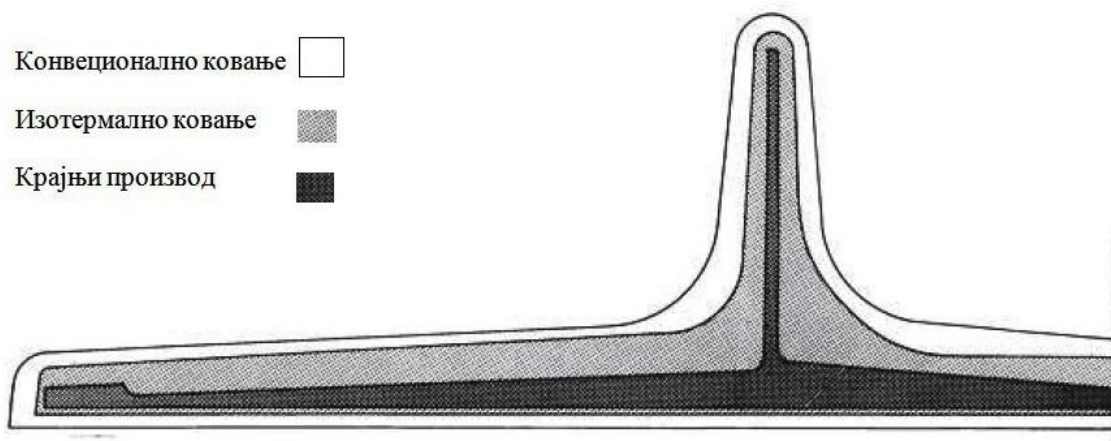
При ковању изотермалним поступком при конструисању отковка могуће је смањити ковачка заобљења, ковачке нагибе, као и ставити уже толеранције. Као последица тога постоји уштеда у запремини материјала, а како се углавном ради о скупоценим легурама и са економске стране уштеда је велика. Као пример уштеде материјала наводи се изотермално ковање диска од легуре на бази никла (*слика 6*), где се јасно види разлика између конвенционалног и изотермалног ковања.



Слика 6. Уштеда материјала потребног за изотермално ковање у односу на конвенционално ковање [3]

Такође је дат и пример изотермалног ковања једног дела од титанијумове легуре $Ti-6Al-4V$ (слика 7), са датом конкретном уштедом материјала [3].

	Конвенционално ковање	Изотермално ковање
Тежина крајњег производа, kg	28	28
Тежина отковка, kg	154	109
Тежина резаног материјала, kg	126	81
Уштеда материјала изотермалним ковањем, kg		45



Слика 7. Уштеда материјала код изотермалног ковања у односу на конвенционално [3]

2) Смањена накнадна обрада резањем

С обзиром да добијени отковак димензијски и по облику одговара готовом производу, није потребно вршити накнадну обраду резањем, или ипак је потребно само финално брушење. На тај начин је смањено време до израде коначног производа, као и наравно цена коштања [3].

3) Мања потребна снага машине

Како је напон течења мањи због високе температуре припремка и мале брзине деформације, величина потребне деформационе силе је мања у односу на класично ковање, па је могуће користити и машине које су мањих снага и јефтиније [9].

4) Униформнија својства

Пошто су током процеса ковања знатно мање температурне разлике припремка, добијени отковак има знатно униформније карактеристике [9].

5) Деформабилност

Одређене легуре никла, као што је *IN 100*, при ковању класичним поступком показују пукотине па се не могу користити за производњу делова. Међутим, изотермалним ковањем се побољшава деформабилност, односно ова легура показује особине суперпластичности па је могуће остварити знатно веће деформације и добре отковке [9].

3. Нумеричко моделирање процеса обраде деформисањем

Модерно потрошачко друштво свим привредним субјектима диктира изузетно оштре услове опстанка на тржишту. Да би једно предузеће обезбедило своју егзистенцију, то јест присутност на тржишту, неопходно је да одговори свим захтевима потрошача и да истраје у непрекидној трци унапређења квалитета.

Може се уочити да су произвођачи принуђени да уводе нове технологије и приступе у развоју и пројектовању производа и процеса, како би смањили време и трошкове производње и истовремено постигли висок квалитет и поузданост производа. Традиционално пројектовање процеса тзв. *trial and error*, и ако је базирано на богатом искуству из праксе, подразумева више узастопних тестирања и корекција алата. При чему је потребно искључити машину из производње, и користити је за тестирање, те се на тај начин губи одређена добит, а и време до коначног производа је веће. Због свега тога традиционално пројектовање не може да испрати захтеве модерног тржишта. Примена нових производних технологија и концепта конкурентног инжењеринга је неопходна. Према једној од многобројних дефиниција, конкурентно инжењерство представља приступ интегрисаном развоју производа, којим је омогућено истовремено одвијање свих релевантних активности, поступака и процеса, укључујући и производњу и пословање над моделом производа. На овај начин се интегришу сви елементи животног циклуса производа од идеје до уништења, укључујући висок квалитет, ниске трошкове, кратке рокове и посебне захтеве потрошача.

Под применом нових технологија подразумева се примена софтвера који су подржани одговарајућим хардвером. Модерни *CAD/CAM/CAE* системи су моћни алати који омогућавају симулацију животног циклуса производа. Пре свега ови алати омогућују угоднији рад са смањеном могућношћу појаве грешака, а и ако до њих дође, њихово уклањање је неупоредиво лакше и брже у односу на традиционалне методе развоја производа [10].

Алати за нумеричку симулацију производних процеса су не само подршка развоју производа и оптимизацији производних процеса, већ и средство за подршку *PLM (Product lifecycle management* - управљање животног циклуса производа) система, за доношење правих одлука од стране менаџмента, у раној фази пројектовања јер омогућује:

- прави избор производних технологија за производњу производа,
- прави избор материјала за производ,
- верификацију геометрије алата,
- смањење броја прототипова алата,

- оптимизацију параметара процеса за специфичне производне технологије,
- правилан избор производне опреме кроз процену деформационе силе.

Најшире примењивани и најмоћнији алат за нумеричку симулацију процеса обраде деформисањем је метода коначних елемената *FEM* (*Finite element method* - метода коначних елемената).

При избору алата за нумеричку симулацију процеса обраде треба сагледати следеће аспекте:

- концепт пластичног течења,
- карактеристике материјала дела и алата,
- дефинисање геометрије,
- дефинисање контактних услова,
- аутоматско генерисање и регенерисање мреже,
- компјутерско време [11].

3.1 Метода коначних елемената

Метода коначних елемената је настала из потребе за израчунавањем напона и деформација, а како се годинама развијала повећавао се и број величина који се могу израчунати у оквиру статичке и динамичке, термичке и електромагнетне анализе.

Метода коначних елемената спада у методе дискретне анализе. Заснива се на физичкој дискретизацији посматраног донема. Посматрани континуум са бесконачним бројем степени слободе се апроксимира дискретним моделом међусобно повезаних коначних елемената са коначним бројем степени слободе.

Суштина апроксимације континуума по МКЕ се састоји у следећем:

- Разматрано подручје континуума, помоћу замишљених линија или површина, дели се на одређени број мањих подручја коначних димензија. Поједина мања подручја се називају коначни елементи, а њихов скуп за цело подручје систем, или мрежа коначних елемената.
- Коначни елементи су међусобно повезани у коначном броју тачака које се налазе на контури елемената и називају се чворови;
- Стање у сваком коначном елементу (нпр. поље померања, деформација, напон, простирање температуре) описује се помоћу интерполационих функција и коначног броја параметара у чворовима који представљају основне непознате величине у МКЕ.

- Интерполационе функције су унапред задате функције за један тип коначног елемента и представљају везу између вредности променљиве поља у било којој тачки коначног елемента и вредности променљиве поља у чворовима [12].

Постоје четири основна вида методе коначних елемената:

- 1) директна метода,
- 2) варијациона метода,
 - a. принцип о минимуму потенцијалне енергије (метода деформација),
 - b. принцип о минимуму комплементарне енергије (метода сила),
 - c. *Reissner*-ов варијациони принцип (мешовита метода),
- 3) метода резидуума, и
- 4) метода баланса енергије.

Функције помоћу којих се представља поље променљивих у елементу, називају се интерполационе функције, функције облика или апроксимативне функције. Помоћу интерполационих функција се успоставља непосредна веза између вредности функције у било којој тачки елемента и основних непознатих параметара у чворовима. Вредност функције у некој тачки се интерполира између њених вредности у чворовима. Помоћу ових функција одређена је само квалитативно промена функције у елементу, што значи да је дефинисан само њен облик док је интезитет те промене одређен вредностима параметара у чворовима.

Процедура решавања проблема методом коначних елемената састоји се из пет специфичних корака:

1. Идентификација проблема,
2. Дефинисање елемената
3. Формирање једначина за елемент,
4. Повезивање једначина елемената,
5. Нумеричко решавање једначина.

Припрема анализе или препроцесирање је најважнија и најдуготрајнија фаза у процесу анализе МКЕ. Квалитет операција моделирања обављених у овој фази у великој мери утиче на квалитет резултата анализе. Улаз у фазу препроцесирања су геометријски и негеометријски подаци о структури, док као излаз из фазе препроцесирања имамо идеализовани и дискретизовани модел [11].

3.1.1 Идеализација

Геометријски модел може да садржи геометријске елементе који немају значај за анализу јер не утичу на напонско-деформациону слику објекта. Ради тога се формира идеализован

модел у коме су одбачени неважни детаљи. Идеализовани модел је упрошћен модел који не мора да представља целину објекта уколико може да се његовим симетричним формама представи функција и начин оптерећења целине [12].

Процес идеализације се састоји из следећих фаза:

- 1) Асимилација модела
 - а. Избор геометријског модела (која верзија је актуелна)
 - б. Трансформација модела (у одговарајући формат примерен МКЕ програму)
- 2) Атрибуција
 - а. Придруживање материјала (преко модула еластичности, Поасонов коефицијент, криве напон-деформација итд.)
 - б. Придруживање оптерећења (притисци, силе, топлотни флуks итд.)
 - с. Придруживање граничних услова (укљештења, покретни ослонци, температура итд.)
- 3) Апстракција
 - а. Уклањање детаља (оборене ивице, отвори, жљебови на некритичним местима)
 - б. Препознавање симетрије (потпуна или делимична симетрија геометрије и атрибута)
 - с. Редукција модела (3D у 2D, одбацивање симетричних делова) [11].

3.1.2 Дискретизација

Дискретизација је процес поделе континуума на дискретне делове, који се називају коначни елементи. Постоји пуно различитих типова елемената, у зависности од њиховог облика, линеарности и реда. Фактори који утичу на избор врсте елемената су врста проблема, геометрија, захтевана прецизност, расположивост у оквиру софтвера, природа физичког проблема и знање и искуство корисника.

Процес дискретизације се састоји из следећих фаза:

- 1) Зонирање у циљу израде правилне мреже, контроле величине елемената:
 - а. Идентификација потенцијалних зона,
 - б. Дефинисање карактеристичних зона (заједно са густином или локацијом чворова, типовима елемената),
 - с. Подела структуре на зоне.
- 2) Генерисање мреже, аутоматски по зонама, или ручно,
- 3) Оцена облика мреже од стране програма у току генерисања мреже, или на захтев,
- 4) Дискретизација атрибута (пребацавање оптерећења; граничних услова и материјала са геометрије на коначне елементе, програмски или ручно.),
- 5) Генерисање улазних података које врши програм [11].

3.1.3 Врсте *FE* елемената

Метода коначних елемената је оригинално развијена за решавање дводимензионалних (раванско напонско стање) проблема. Решавање 3D проблема као последицу има повећање броја једначина које треба решити, али коришћењем мреже *FE* елемената вишег реда и моћних хардвера ови проблеми се успешно решавају. Генерално, постоје два типа елемената: континуални и структурни. Континуални елементи су они који геометрију комплетно дефинишу преко координата чворова. Структурни елементи су они који се повинују претпоставкама о понашању структуре у чврстом материјалу.

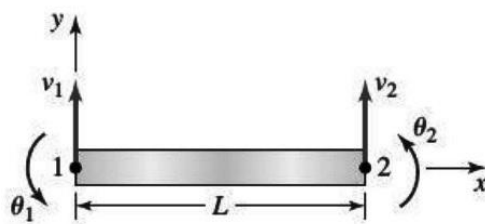
Избор типа коначног елемента је један од најважнијих корака у примени метода коначних елемената. Правилан избор је веома битан за добијање тачних резултата. Основне особине коначних елемената су:

- облик,
- број и врста чворова,
- број и врста степени слободе у појединим чворовима,
- врста интерполационих функција.

Без било ког од ових параметара, коначни елемент није у потпуности дефинисан. С обзиром на њихов облик, елементи могу бити са праволинијским и криволинијским контурама. Пошто се у *FE* анализи креира модел са циљем да се предвиди понашање континуума под дејством неког оптерећења, избор врсте елемента и његове величине је веома битна. Такође величина елемента утиче на прецизност резултата. *FEM* софтвери, генерално, имају могућност аутоматског генерисања мреже и регенерисања (*remeshing*) са троугаоним, четвороугаоним, тетраедарским и хексаедарским елементима. Битна је подела на:

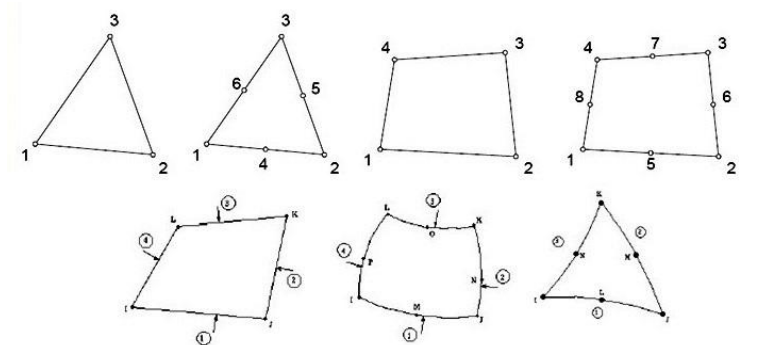
- 1) линијске,
- 2) раванске, и
- 3) просторне елементе.

Линијски коначни елемент је део праве или криве линије. Код овог типа елемента једина димензија која се разматра је дужина. Најпознатији елемент је свакако греда (слика 8).



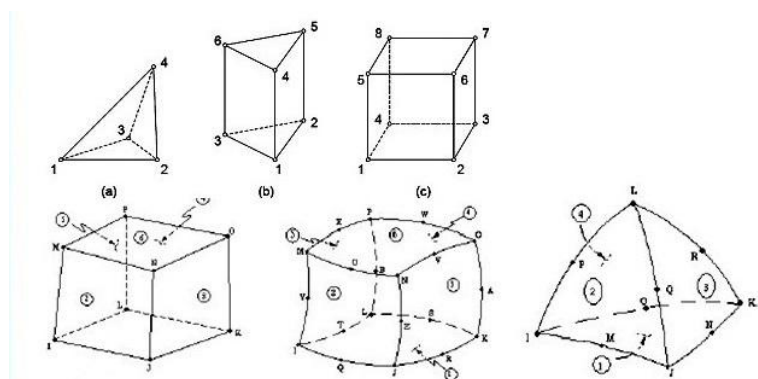
Слика 8. Линијски коначни елемент, греда [13]

Равански коначни елементи се користе за анализу проблема који се могу посматрати као дводимензионални, односно код раванског стања напона и деформације, или оносиметричног стања деформације. Најчешће су троугаоног или четвороугаоног облика, могу бити криволинијски или праволинијски (слика 9).



Слика 9. Облик раванских коначних елемената [12]

Просторни коначни елементи се користе за анализу тродимензионалних проблема и обично су облика тетраедра или призме. Као и равански, могу бити праволинијски и криволинијски (слика 10) [10].



Слика 10. Облик тродимензионалних коначних елемената [12]

3.1.3 Фазе FE анализе

FE анализа пролази кроз различите фазе следећим редоследом:

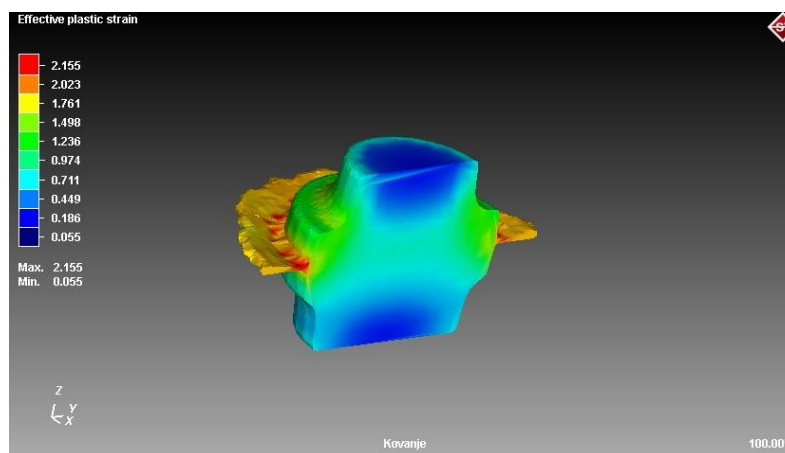
1. Постављање задатка;
2. Припрема анализе, односно препроцесирање;
3. Анализа, тј. процесирање;
4. Обрада резултата, или постпроцесирање;
5. Провера и анализа резултата;

Фаза препроцесирања почиње идентификацијом геометрије и улазних података о понашању материјала, са одговарајућом конститутивном једначином. У најбољем случају, геометрија се може унети као *CAD* модел. Међутим, пошто такви модели садрже доста детаљне податке о геометрији, укључујући мале радијусе и оборене ивице, које додатно компликују и продужавају време прорачуна, неопходно је урадити упрошћења геометрије, избацавањем непотребних детаља, или разматрањем постојања симетрије.

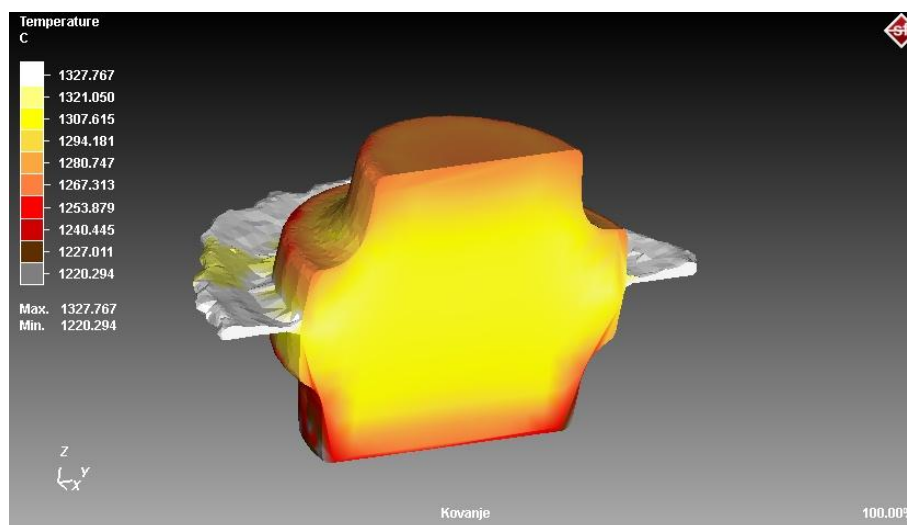
Након тога се приступа генерисању почетне *FE* мреже за обрадак и алате, што представља најважнији и најтежи корак у *FE* анализи. Потребно је знати коју врсту елемента изабрати, као и густину мреже, да би добијени резултат био у оквиру захтева. Након генерисања мреже, она се мора детаљно прегледати, и евентуално побољшати у зонама са сложеном геометријом.

У фази нумеричке анализе, односно фази препроцесирања, *FE* програм аутоматски генерише матрице које описују понашање сваког елемента, комбинује ове матрице у велике матричне једначине, које представљају *FE* структуру, и решава једначине за одређивање непознатих величина у чворовима. Прорачуни могу бити дуготрајни, и по неколико сати, или чак дана, што пре свега зависи од хардверских карактеристика, и комплексности процеса који се симулира.

По завршетку фазе процесирања, добијају се резултати који се даље интерпретирају и прегледају у фази постпроцесирања, од стране корисника. Савремени *FE* софтвери имају широке могућности приказа излазних резултата у виду напонских поља, поља деформације, температуре, дијаграма деформационе силе итд. Графички прикази су у боји, а симулација процеса се може снимити и као видео датотека. Пример излазног резултата, пластичне деформације је дат на *слици 11*. На *слици 12* је дата расподела температуре. Овакав вид репрезентовања резултата даје веома јасну слику о процесу [11].



Слика 11. Пластична деформација дела



Слика 12. Расподела температура

3.2. Моделирање процеса *FEM*

У *FE* анализи производних процеса, сам процес се мора посматрати као систем међусобно повезаних релевантних параметара. Кључни технички проблеми који се морају разматрати у анализи процеса се односе на:

- припремак: величина и облик, материјал, хемијски састав и микроструктура, особине течења у условима обраде (напон течења у функцији деформације, брзине деформације и температуре), термичке и физичке особине;
- алат: геометрија, стање површина, материјал и тврдоћа, температура прегревања, крутост и тачност;
- услове у међуконтакту: финализација површина, подмазивање, трење и трансфер топлоте;
- деформациону зону: механика пластичног деформисања, течење материјала, напони, брзине и температуре;
- производну опрему: брзина, продуктивност, капацитет у погледу максималне силе и енергије, крутост и прецизност.

Утицајни параметри процеса се, међутим, не могу посматрати и анализирати појединачно, с обзиром на међусобни утицај. У тој анализи морају се задовољити услови равнотеже, компатибилност једначина деформације-померања, и у неким случајевима једначине топлотне равнотеже. Поред тога, она захтева одговорајуће граничне услове, који укључују

померања и брзине на једном делу површина дела који се анализира, напони и трансфер топлоте на другој страни, као и услове контактнoг трења.

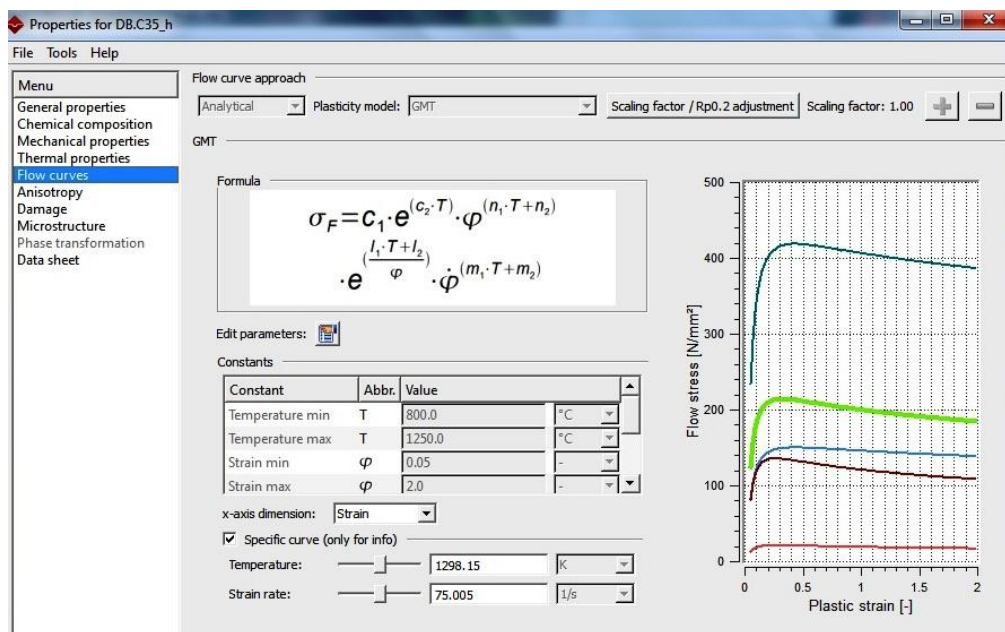
Практичне нумеричке симулације процеса укључују:

- пројектовање технолошких операција процеса, уз процену деформационих сила, напона у алатима и међуоблика обратка;
- предвиђање хабања алата и века трајања;
- предвиђање и елиминација дефеката, као што су преклопи, унутрашње и спољашње напрстине;
- истраживање утицаја трења на течење материјала;
- процена особина обратка и микроструктуре, еластичног исправљања и заосталих напона [11].

3.3 Улазни подаци за нумеричко моделирање процеса

3.3.1 Особине и понашање материјала

У анализи процеса обраде методом коначних елемената потребно је математички описати пластично течење материјала. Постоје две формулације, које се користе за описивање понашања материјала при деформисању. Један модел је структурна формулација (*structural formulation*), преко анализе деформисања чврстог тела, и друга модел је формулација течења (*flow formulation*), сличан концепту механике флуида. У принципу формулација течења примењује се у *FEM* анализи процеса топле запреминске обраде метала, где су механичке особине материјала сензитивне на брзину деформације. Структурна формулација, са друге стране, се користи за симулацију процеса хладне обраде, где је занемарљив утицај брзине деформације на карактеристике течења материјала. За прецизно нумеричко одређивање течења материјала при пластичном деформисању и одређивање деформационе силе и енергије процеса, веома је важно тачно одредити карактеристике течења материјала, односно криве течења. Оне се одређују експериментално на више начина, а најчешће тестом увијања, затезања, и притискивања. Савремени софтвери располажу богатим базама података о материјалима, које садрже податке о стандардним карактеристикама материјала, као и податке о кривама течења у функцији деформације (*слика 13*), брзине деформације, и температуре. То омогућује брзу и једноставну припрему улазних података за симулације процеса [11].



Слика 13. Графици кривих течења у функцији деформације

3.3.2 Геометрија

У зависности од сложености геометрије алата и припремка, нумеричке симулације процеса се могу изводити као дводимензионалне (у условима осносиметричног или раванског деформационог стања) и тродимензионалне *FE* анализе.

У дводимензионалним проблемима геометрија обратка и алата се представља произвољном геометријом у равни, формираном комбинацијом линија, крива, и лукова. Пошто је неопходно формирати *FE* мрежу обратка за нумеричку симулацију његовог обликовања, геометрија обратка се формира увек са затвореним контурама. У симулацији процеса на повишеним температурама, где је изражен трансфер топлоте у међуконтакту обратка и алата, неопходно је дефинисати геометрију алата као затворену контуру, како би се генерисала *FE* мрежа алата, и пратили температурни ефекти и еласто-пластична анализа алата.

У тродимензионалним симулацијама геометрија алата и обратка се дефинише површинским, а најбоље запреминским моделима. Они се могу увести из других *CAD/CAM* софтвера, преко стандардних формата за трансфер података о геометрији [11].

3.3.3 Генерисање и регенерисање *FE* мреже

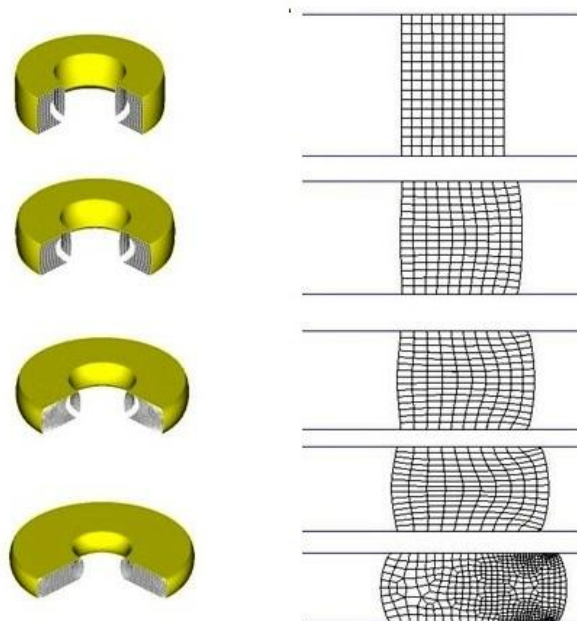
При пластичном обликовању материјала у разним технолошким процесима, обрадак се подвргава великим пластичним деформацијама и релативно померање између деформисаног материјала и површина алата је значајно. У симулацијама таквих процеса, и ако је почетна мрежа припремка добро генерисана и има жељену густину, услед настанка великих деформација у току процеса искривљеност мреже у појединим зонама постаје значајна. Стога је неопходно генерисати нову *FE* мрежу, да би се симулација процеса наставила, и трансформисати податке са старе на нову мрежу, да би резултати били прецизни. Процес генерисања нове мреже, тзв. *remeshing*, је захтеван посао и склон грешкама. Програмски пакети намењени *FEM* нумеричкој симулацији и анализи процеса, углавном имају модуле за аутоматско генерисање мреже коначних елемената (*AMG-automatic mesh generation*). Поступак регенерисања мреже, *remeshing*, је такође аутоматизован.

Процес регенерисања мреже садржи следеће активности:

- одређивање услова када је потребан *remeshing*;
- дефинисање оптималне густине мреже, у зависности од сложености геометрије дела;
- реконструкција мреже на основну дефинисане густине;
- трансфер информација, односно стања параметара анализе, укључујући и граничне услове, са старе на нову мрежу;
- наставак симулације.

Густина *FE* мреже треба да се прилагоди сложености геометријских детаља обратка и алата у свим корацима симулације. Да би се максимизирала геометријска прилагодљивост густине мреже треба узети у обзир граничне контуре алата и локалну дебљину обратка.

За добијање финалне, потребне густине мреже, корисник мора да изабере максималан број елемената довољан да се симулација изведе до краја са захтеваном прецизношћу. Претерано велики број елемената успорава симулацију и захтева дуже време за прорачун, али и даје прецизније резултате. На *слици 14* је приказан резултат регенерисања мреже [11].



Слика 14. Аутоматско генерисање и регенерисање мреже (remeshing) [14]

3.3.4 Услови у међуконтакту (трење и трансфер топлоте)

Услови контактнoг трења и трансфера топлоте у међуконтакту између алата и обратка има значајан утицај на течење материјала и износ деформационе силе, односно потребне енергије за његово обликовање. Поред улазних података о материјалу, њихово дефинисање има веома велики значај за прецизност резултата нумеричке симулације [11].

Утицај трења се и огледа у микроструктурним променама деформисаног материјала, хабањ у алата и повећање потребне енергије за деформисање [14].

За математичко описивање контактнoг трења у процесима обраде деформисањем користе се три закона, теорије трења. Генерално категоризација закона и теорија о трењу је:

1. *Amonton*-ов и *Coulomb*-ов закон

$$\tau = \mu p, \text{ где је } 0 \leq \mu \leq 0,577$$

2. Закон константног трења

$$\tau = m \kappa, 0 \leq m \leq 1$$

3. Адхезионе теорије, које узимају у обзир реалну храпавост контактних површина [14].

Први закон трења је описан као пропорционалан нормалном притиску, а мера пропорционалности је изражена преко коефицијента трења μ .

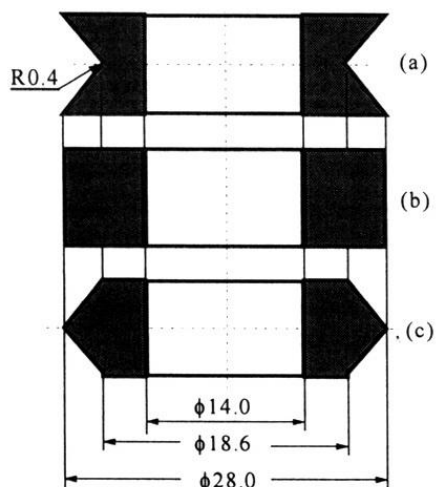
Други модел трења претпоставља константни тангенцијални напон трења у контактним површинама, што је реално случај при постојању великих нормалних притисака.

У нумеричким симулацијама запреминског пластичног обликовања материјала боље резултате даје закон константног трења од *Coulomb*-овог закона, па се углавном задаје вредност фактора трења m као улазни податак.

Веза између фактора и коефицијента трења је дата изразом:

$$\mu = \frac{m}{\sqrt{3}}$$

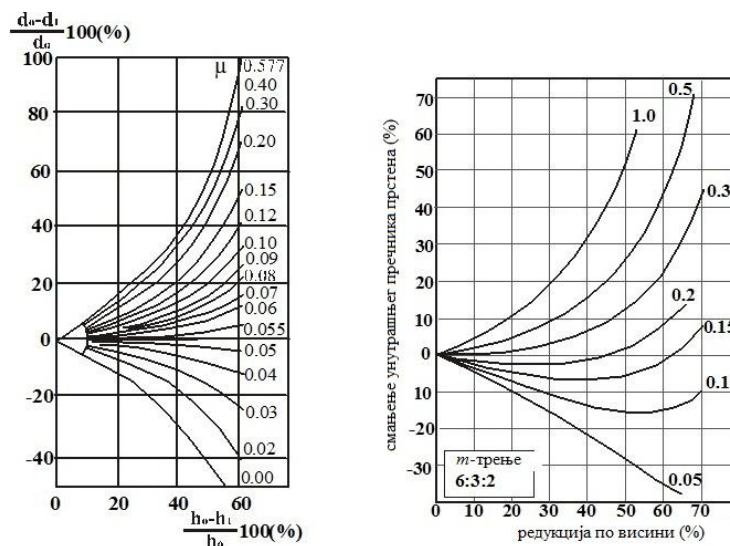
Уобичајно је да се гранични услови контактнoг трења одређују стандардним тестовима, од којих је слободно сабијање прстена (*ring test*) најшире примењивана, универзална метода. Метода се састоји у праћењу промена унутрашњег пречника прстена, који се сабија, а за које се сматра да представљају меру осетљивости на делујуће контактнo трење. Димензије прстена морају бити у односу $D:d:h = 6:3:2$, за стандардни тест (слика 15).



Слика 15. Геометрија прстена [14]

На истој слици су приказани облици прстена за алтернативне *ring test* методе, које се примењују за одређивање коефицијента трења у условима малих (слика 15.a) и великих нормалних притисака (слика 15.c). Графичка зависност између деформације висине и деформације унутрашњег пречника, при различитим утицајима трења, даје калибрационе криве, на основу којих се лако одређује вредност коефицијента/фактора трења.

На слици 16 су приказане калибрационе криве *Male-Cocroft* за одређивање коефицијента трења μ , и *Lee-Altan* калибрационе криве за одређивање фактора трења m [11].



Слика 16. Калибрационе μ и m криве [14]

Транфер топлоте у међуконтакту алата и материјала се најчешће дефинише експерименталним одређивањем коефицијента трансфера топлоте (HTC - *heat transfer coefficient*). У специјално направљене отворе у алату се постављају термпарови, за регистровање температуре у зони блиској контакту са загрејаним алатом. Када се добије експериментална расподела температура, она се упоређује са оном добијеном FE симулацијом са различитим задатим вредностима коефицијента HTC . Вредности HTC која даје сличну расподелу температура као у експерименту је важећа вредност за испитивани материјал [11].

3.4 Применљивост FE софтвера

Да би неки програм, развијен на бази методе коначних елемената и поставки фундаменталне пластичности, био применљив за нумеричке симулације процеса, коју изводи крајњи корисник, мора задовољити специфичне захтеве и имати пратеће програме, као:

1. Програмске модуле и процедуре за:

- интерактивно препроцесирање, које обезбеђује кориснику унос почетне геометрије, улазних података о карактеристикама материјала дела и алата, података о граничним условима и параметара за генерисање и регенерисање FE мреже;
- аутоматско генерисање и регенерисање мреже, која омогућује прецизну и ефикасну симулацију;
- интерактивно постпроцесирање за презентацију резултата FEM анализе.

2. Одговарајуће улазне податке који описују:

- термичке и физичке карактеристике материјала дела и алата;
- трансфер торлоте и трење у међуконтакту, у условима обраде;
- течење материјала и његово понашање при релативно великим деформацијама, које настаје у процесима запреминске обраде.

3. Могућност анализе процеса при:

- симулацији обраде под условом да је алат крут, ради смањења времена прорачуна;
- коришћењу контактних напона и дистрибуције температуре дела, ради добијања напонско температурне анализе алата.

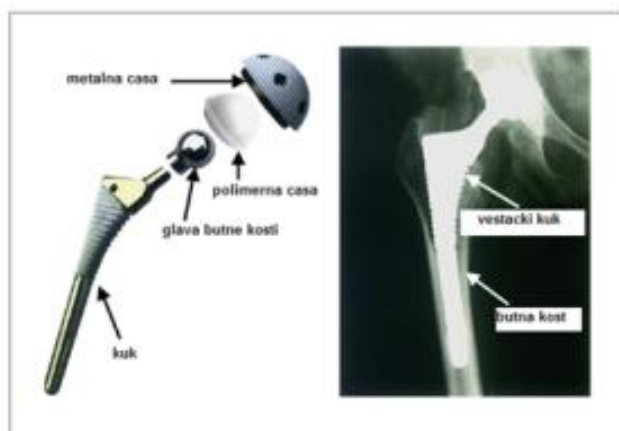
Време које је потребно за нумеричку симулацију неког процеса зависи од врсте проблема, да ли је дводимензионални или тродимензионални проблем, као и од перформанси самог компјутера. При томе је за симулацију 3D проблема потребно знатно више времена него за 2D, који се мери од неколико часова, па чак до неколико дана.

Да би софтвер могао наћи примену у индустрији, мора да задовољи следеће захтеве:

- програм мора бити разумљив и доступан већем броју инжењера и пројектаната,
- кориснички итерфејс мора бити разумљив и лак за коришћење,
- резултати анализе и симулације требају бити презентирани, преко постпроцесора, на начин који је разумљив и користан за крајњег корисника,
- инсталација програма мора бити пропраћена обуком кадра,
- могућност симулације различитих процеса обраде [11].

4. Нумеричко моделирање ковања вештачког кука од челика

Оштећење тзв. тешких ткива у људском организму последица су многих незгода, старења, болести итд. Уколико се повреде, односно ако се оштећења не могу санирати, потребно је заменити исте. У савременој медицини се успешно уграђују вештачки кукови, ручни зглобови, колена итд. На *слици 17* је приказан шематски приказ вештачког кука.



Слика 17. Шематски приказ вештачког кука [15]

Вештачки кукови се праве од различитих легура нерђајућег челика, титанијума као и различитих легура кобалта [1].

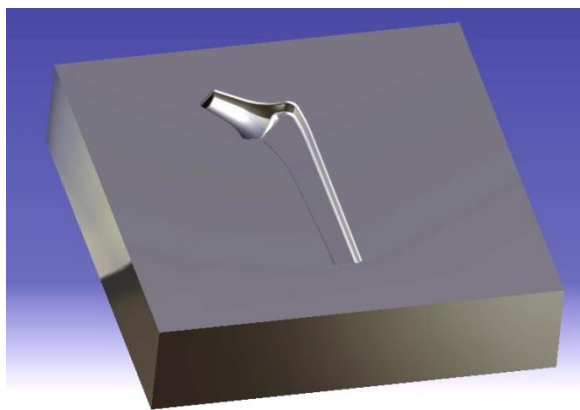
Симулација ковања вештачког кука је вршена у програмском пакету *simufact. forming 12.0*. Суштина симулације процеса ковања вештачког кука је одређивање адекватних процесних параметара ковања, као и упоређивање резултата са ковањем од титанијумове легуре, са различитим процесним параметрима, што ће бити дато у следећем поглављу. Изглед готовог производа је дат на *слици 18*.



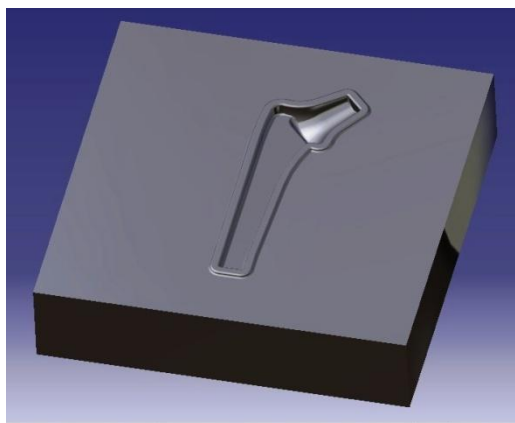
Слика 18. Вештачки кук [10]

4.1 Улазни подаци симулације

Геометрија алата која се користи при симулацији је увезена из 3D модела који је урађен у програмском пакету *Catia V5*. На *слици 19* је приказан модел горњег, а на *слици 20* модел доњег алата који се користи у симулацији.



Слика 19. Доњи део алата



Слика 20. Горњи део алата

Модел припремка је такође увезен из поменутог софтвера, а његов изглед је дат на *слици 21*.



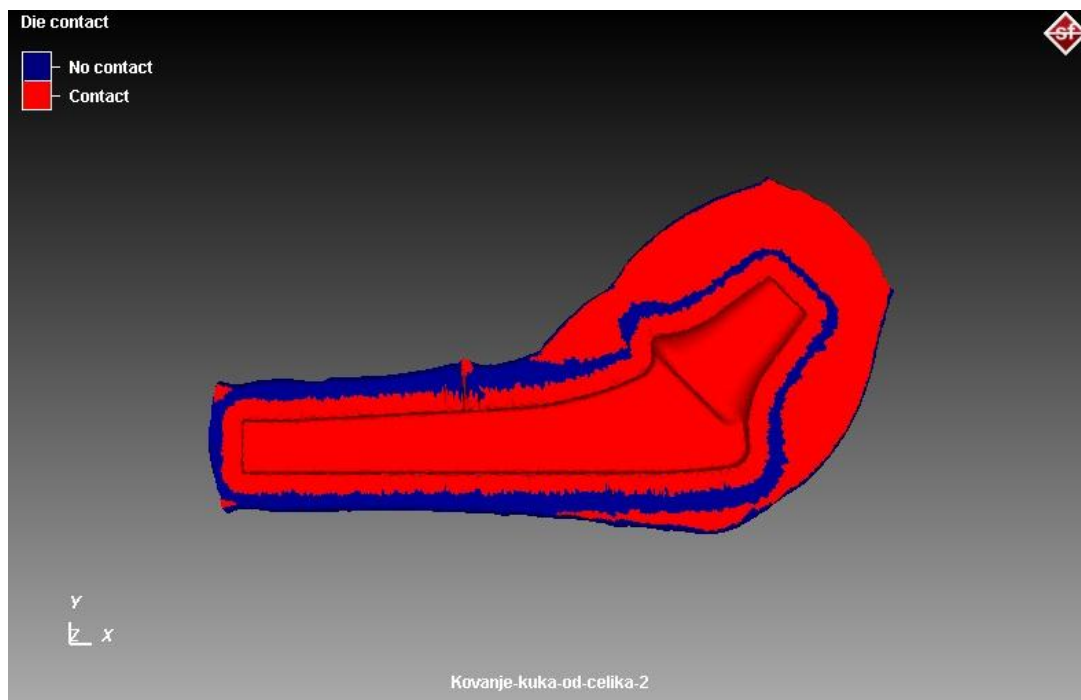
Слика 21. Модел припремка

Остали подаци који су нумерички унесени су:

- Материјал припремка: нерђајући челик, ознаке по *DIN* стандарду 1.4301
- Материјал алата: нерђајући челик, по *DIN* стандарду 1.2344
- Температура алата: 250 °C
- Температура припремка: 1000 °C
- Фактор трења: $m = 0,6$
- Машина: хидраулична преса
- Брзина деформисања: 250 mm/s

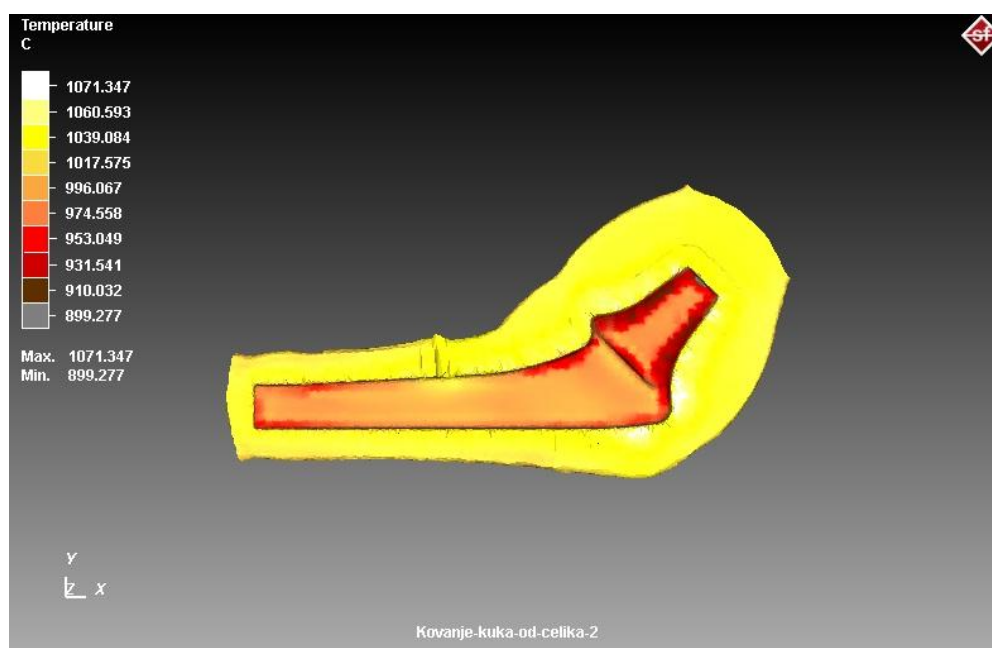
4.2 Резултати симулације

Након завршеног препроцесирања, извршена је симулација, а резултати су дати на следећим сликама. На *слици 22* је приказан контакт алата и отковка.



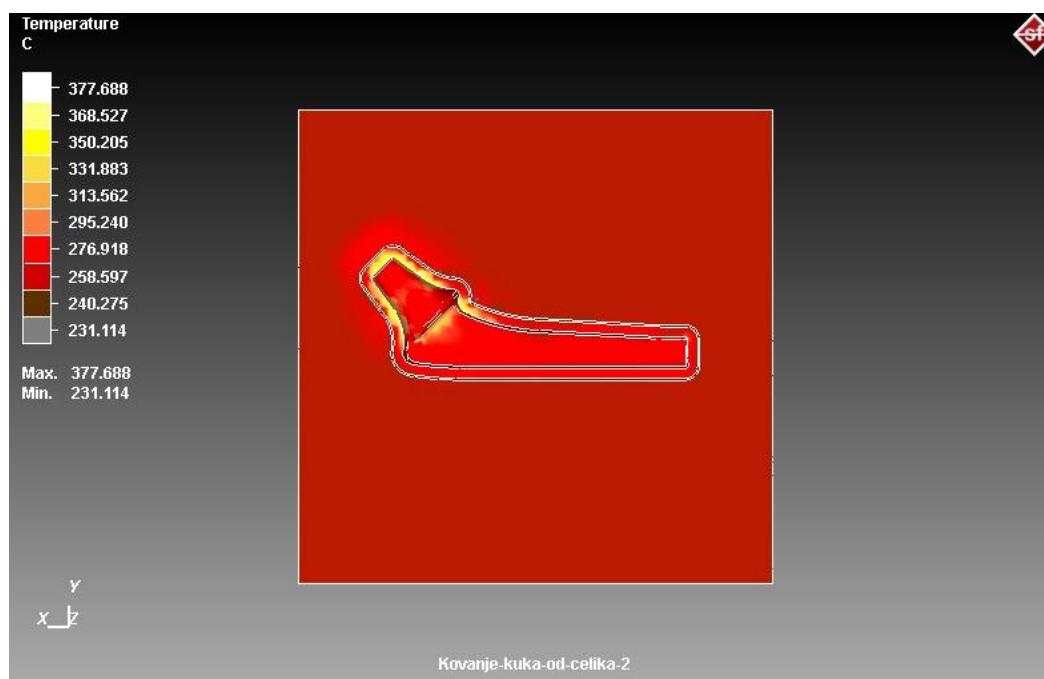
Слика 22. Контакт алата и отковка

На слици 23 је приказан распоред температура отковка по завршетку процеса.



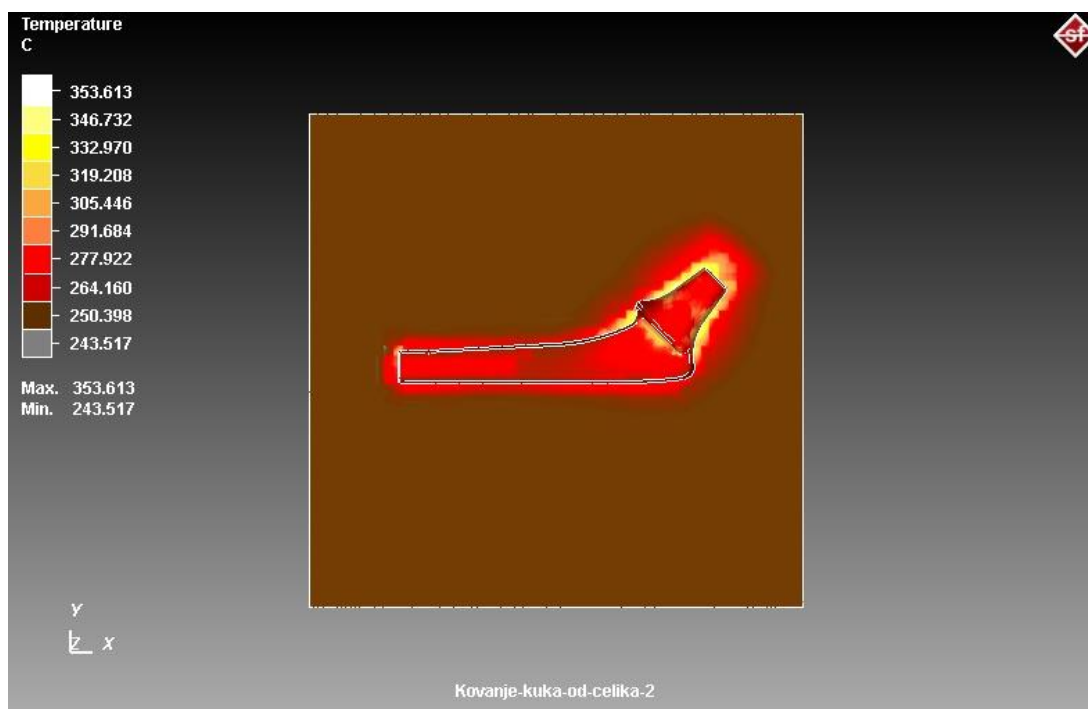
Слика 23. Расподела температура

На слици 24 је дата расподела температура горњег алата.



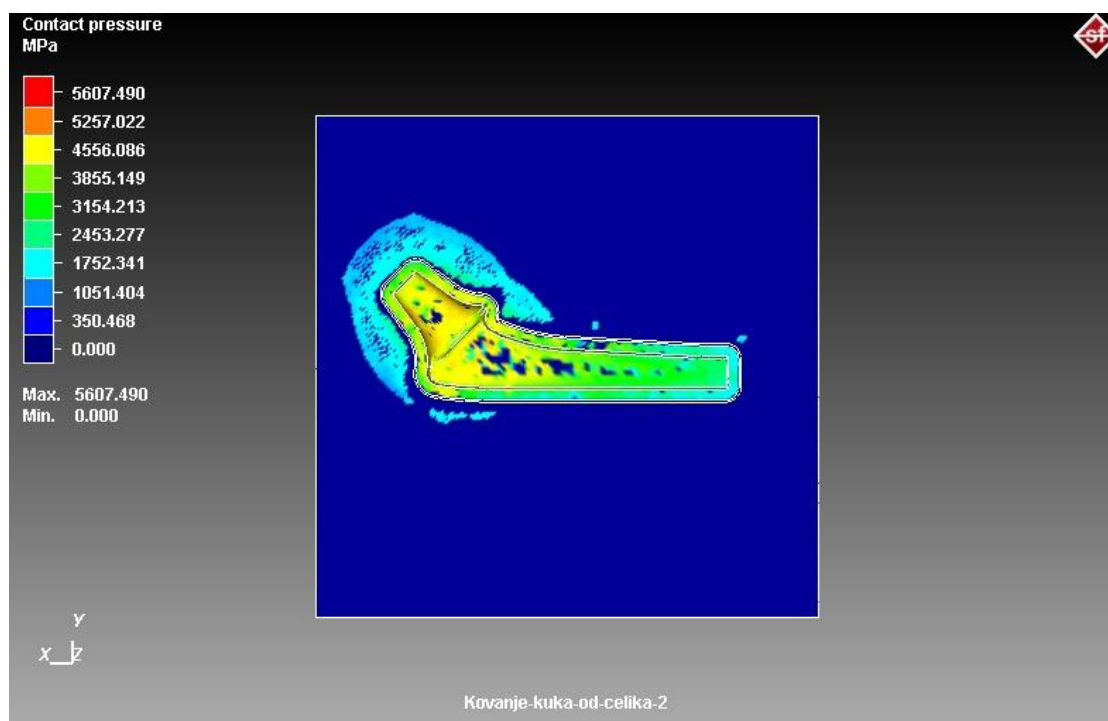
Слика 24. Расподела температура горњег алата

На слици 25 је дата расподела температура доњег алата.



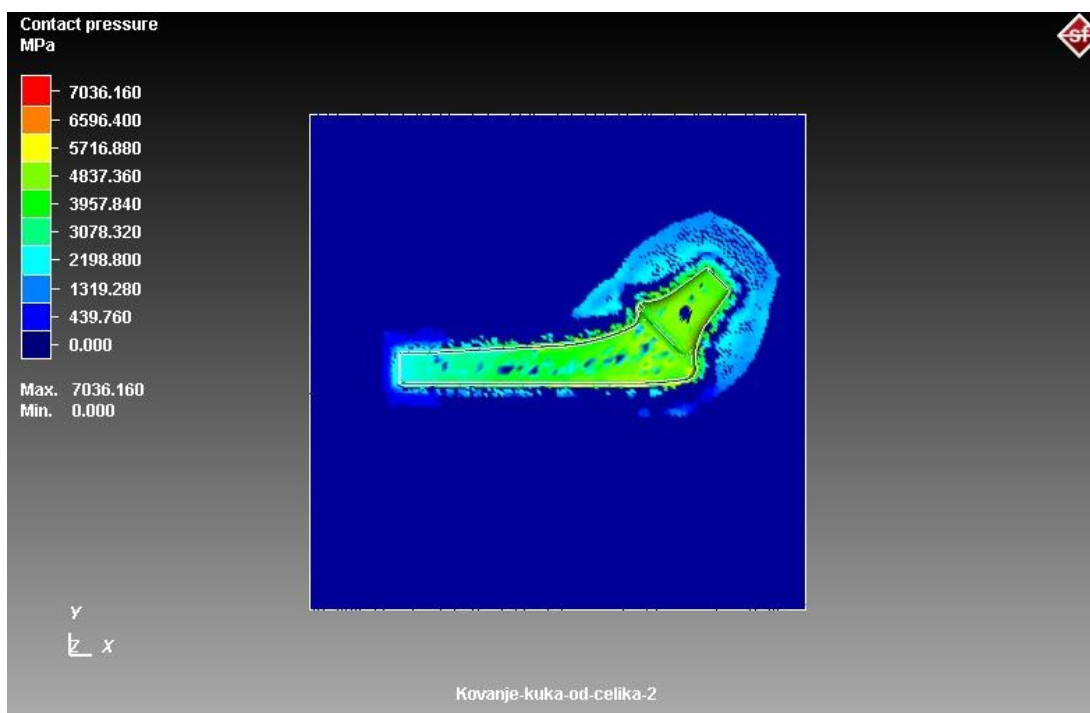
Слика 25. Расподела температура доњег алата

На слици 26 су приказани контактни притисци који делују на горњи алат.



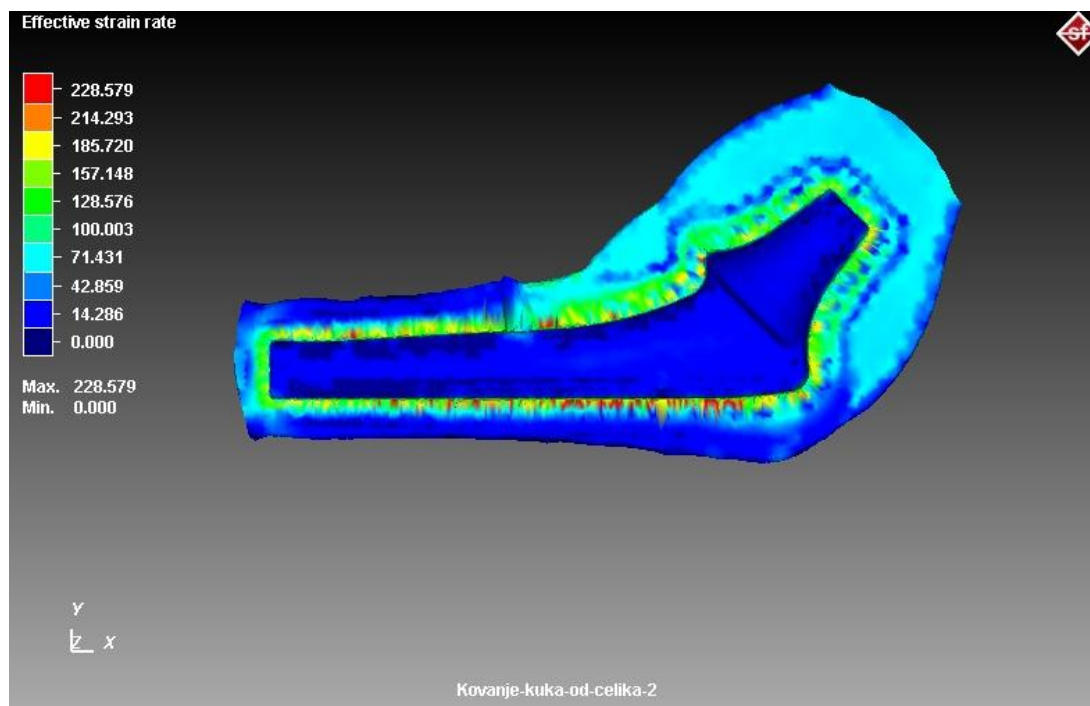
Слика 26. Контактни притисци горњег алата

На слици 27 су приказани контактни притисци који делују на доњи алат.



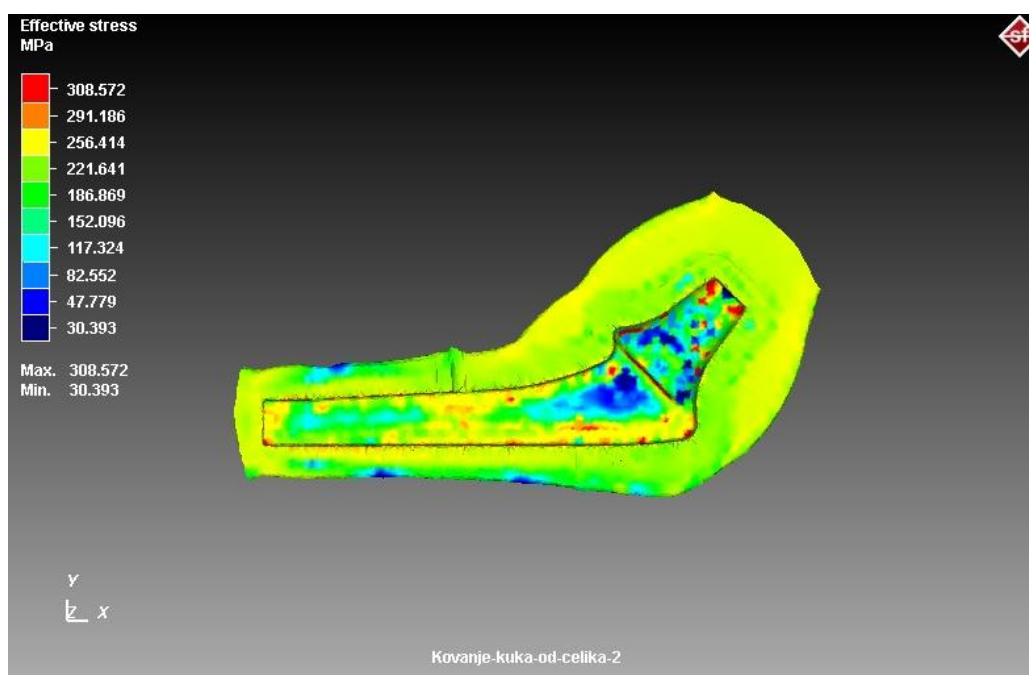
Слика 27. Контактни притисци доњег алата

На слици 28 је дата брзина деформације.



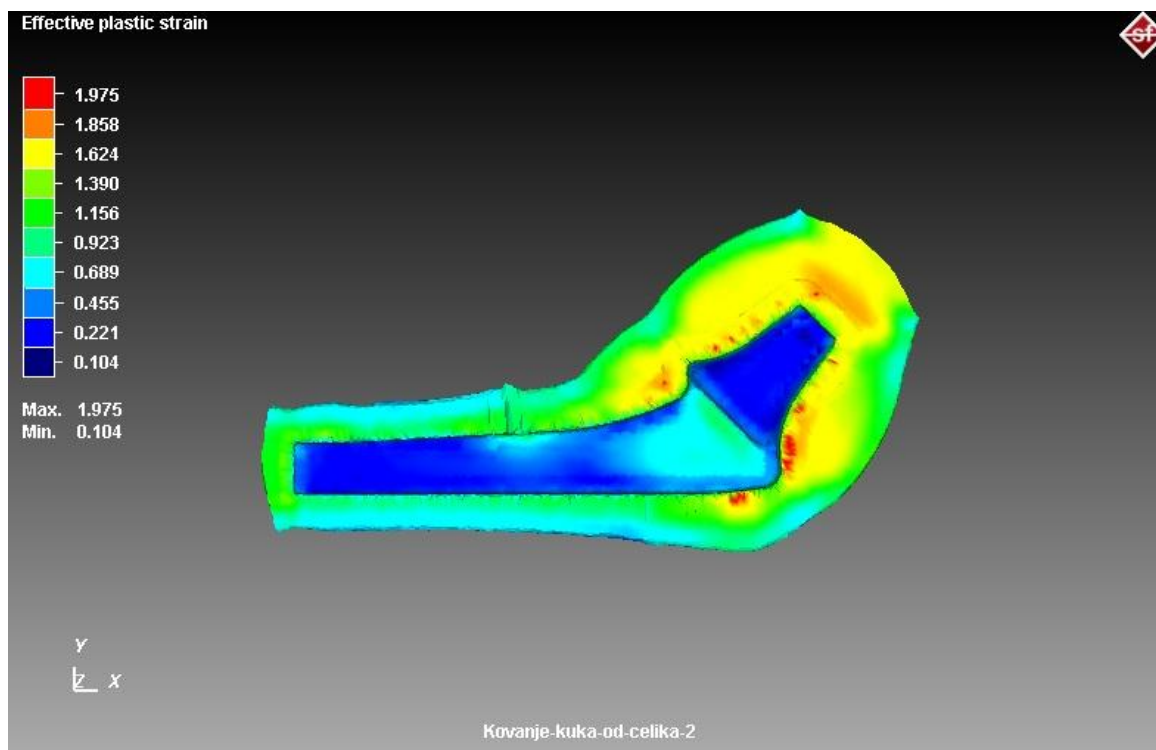
Слика 28. Брзина деформације

На слици 29 је приказан ефективни напон по завршетку процеса.



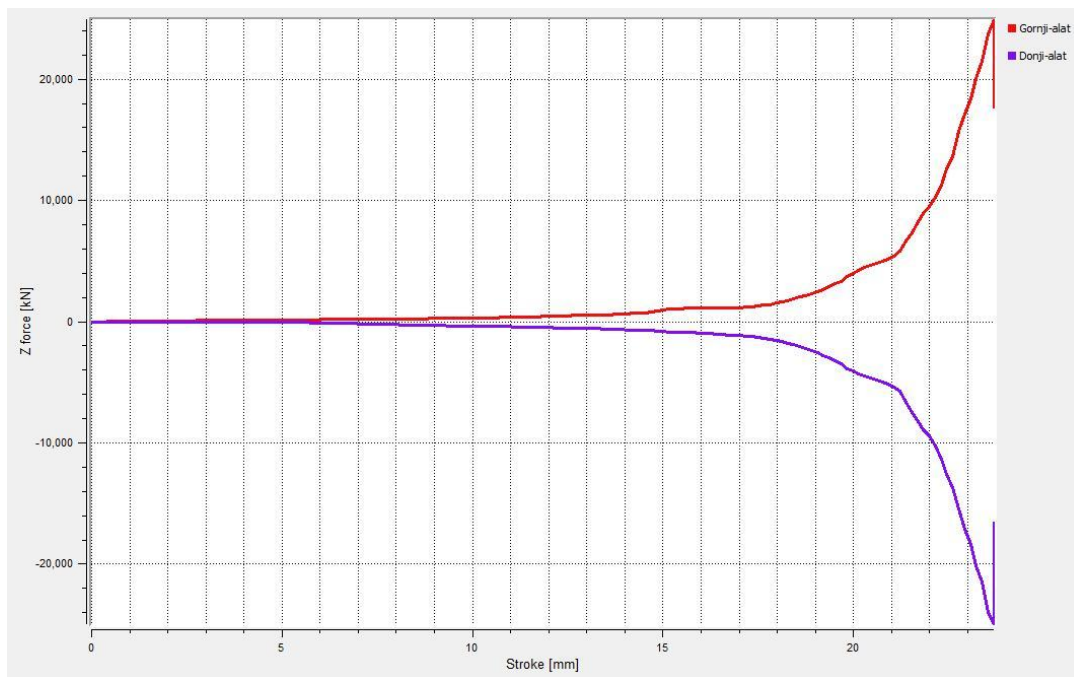
Слика 29. Расподела ефективног напона

На слици 30 је дат приказ ефективне пластичне деформације.



Слика 30. Ефективна пластична деформација

На слици 31 је дат график деформационих сила.



Слика 31. График деформационих сила

5. Нумеричко моделирање процеса изотермалног ковања вештачког кука од титанијумске легуре

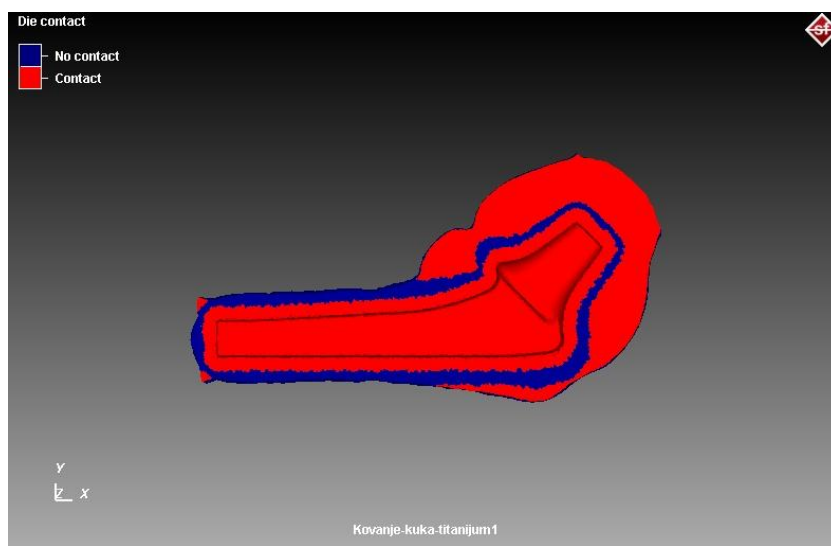
С обзиром да је задатак овог рада упоређивање ковања вештачког кука од челика, са ковањем од титанијумске легуре $Ti-6Al-4V$, при изотермалним условима, модели геометрије, односно, алати и припремак су остали исти. Урађене су четири различите симулације, које су разликују у задатим брзинама деформисања, и температурама алата.

5.1 Симулација 1.

Улазни подаци за симулацију 1 су:

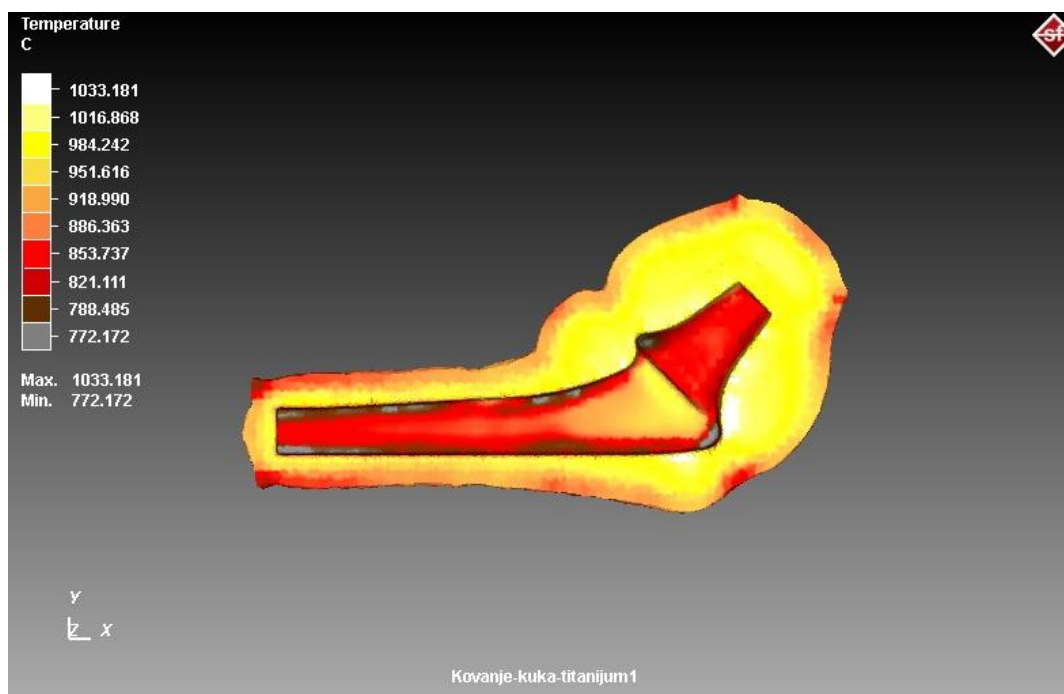
- Материјал припремка: легура титанијума, $Ti-6Al-4V$
- Материјал алата: нерђајући челик, по DIN стандарду 1.2344
- Температура алата: $400\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Температура припремка: $900\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Фактор трења: $m = 0,4$
- Машина: хидраулична преса
- Брзина деформисања: 500 mm/s

Након извршене симулације, добијени су резултати приказани на следећим сликама. На слици 32 је приказан контакт алата и припремка, са које се види да је алат успешно попуњен.



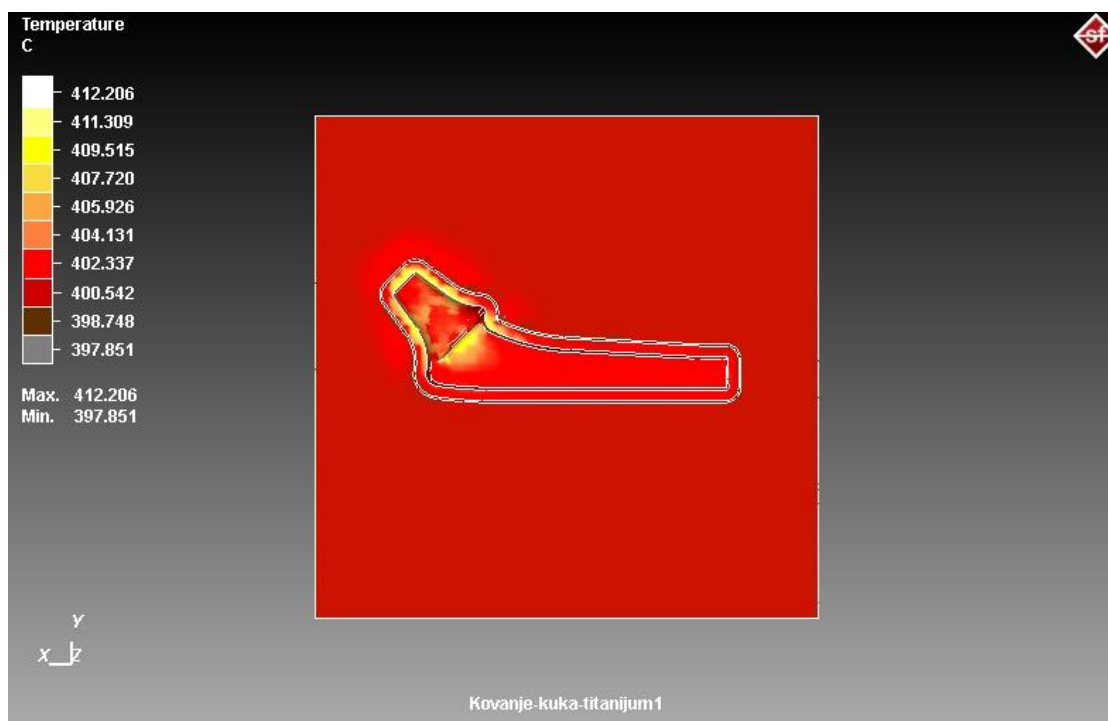
Слика 32. Контакт алата и отковка

На слици 33 је приказана расподела температура отков ка.



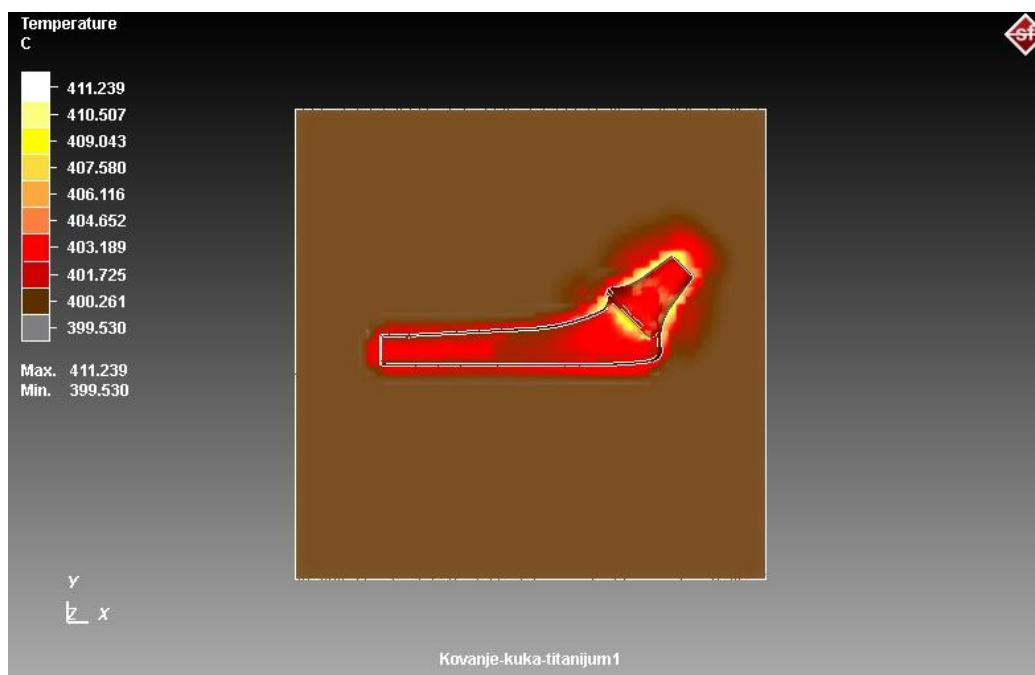
Слика 33. Расподела температура

На слици 34 је приказана расподела температура по горњем алату.



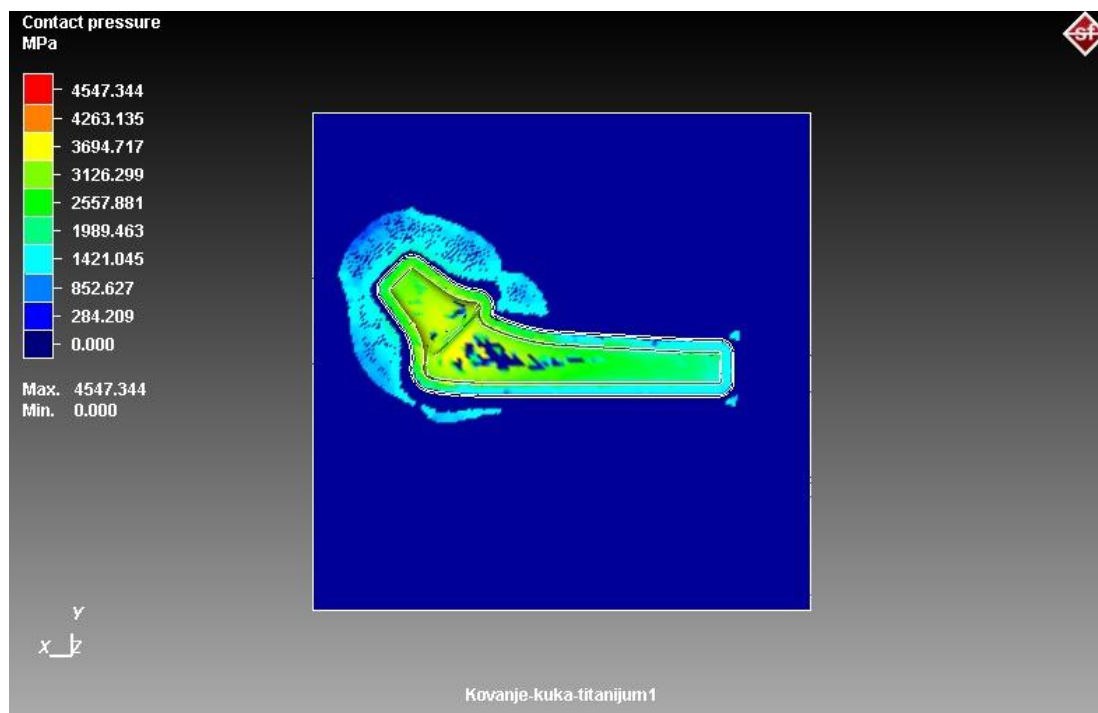
Слика 34. Расподела температура по горњем алату

На слици 35 је дата расподела температура по доњем алату.



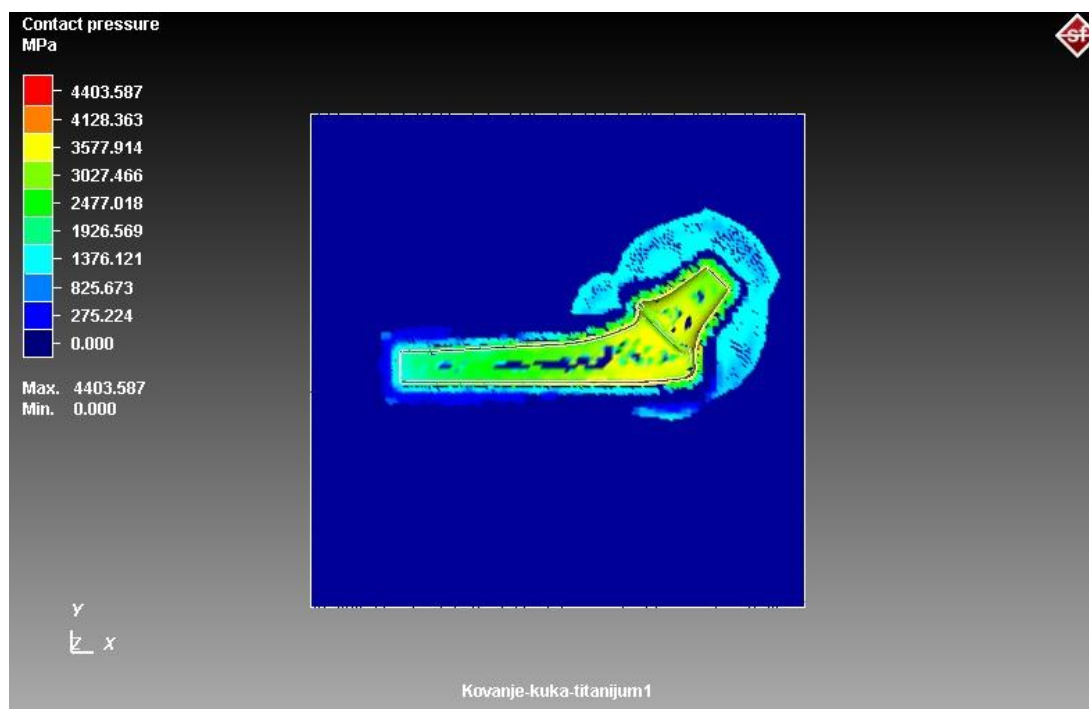
Слика 35. Расподела температура по доњем алату

На слици 36 је дат распоред контактних притисака који делују на горњи алат.



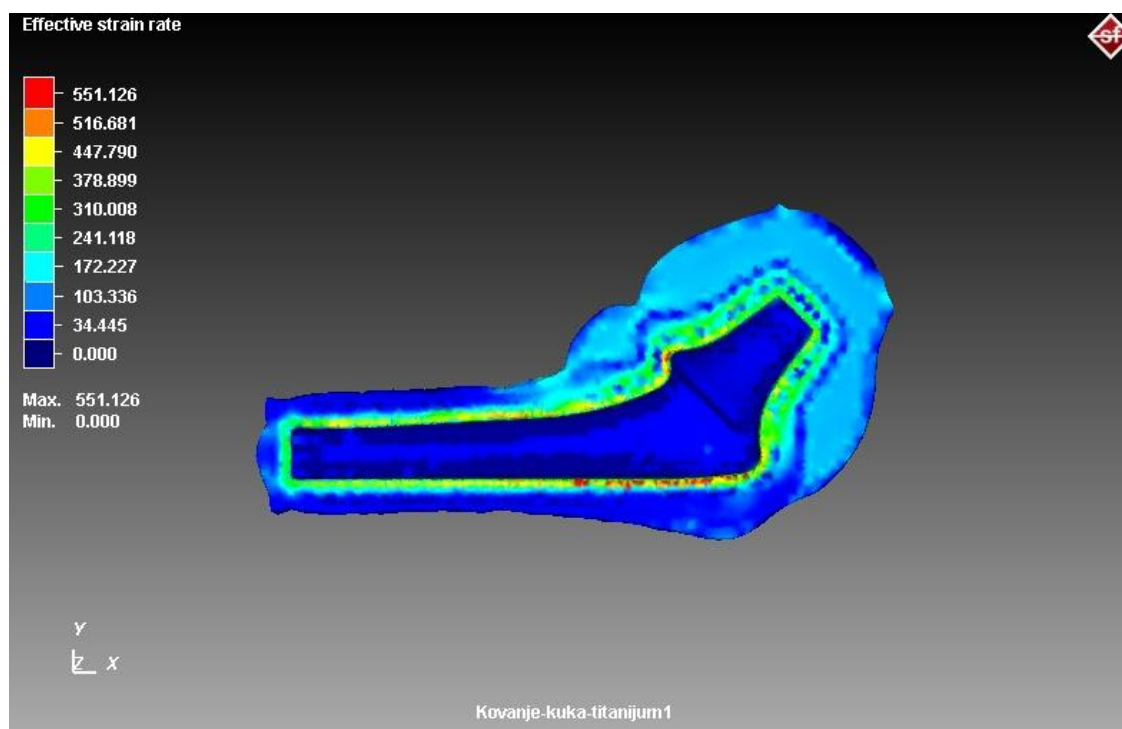
Слика 36. Расподела контактних притисака по горњем алату

На слици 37 је приказано деловање контактних притисака по доњем алату.



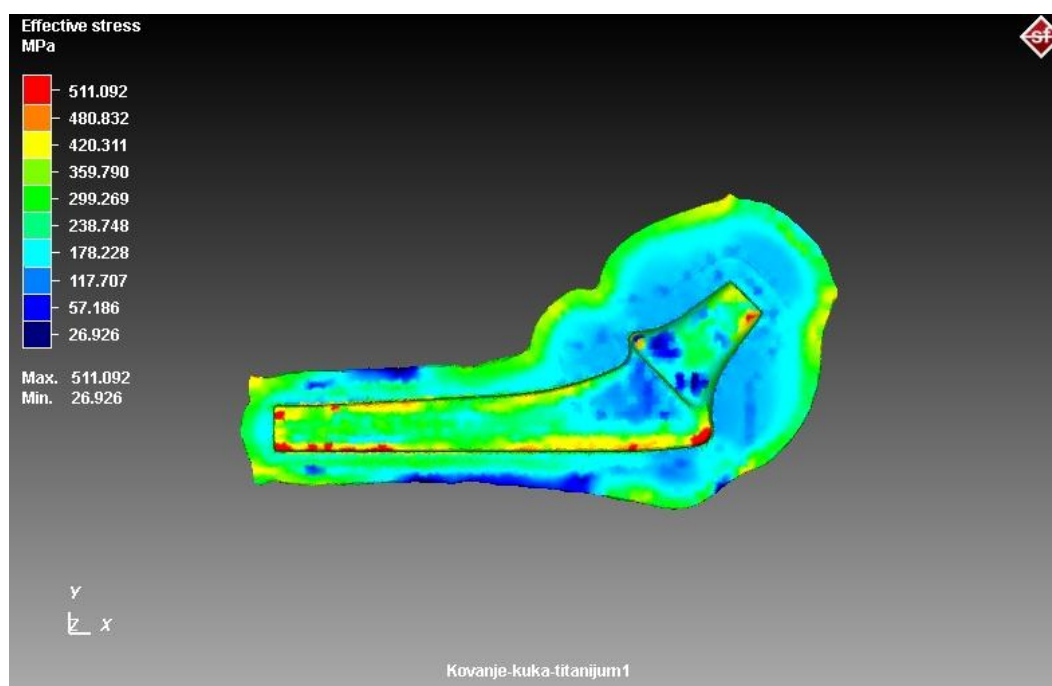
Слика 37. Деловање контактних притисака на доњи алат

На слици 38 је приказана расподела брзине деформације отковка.



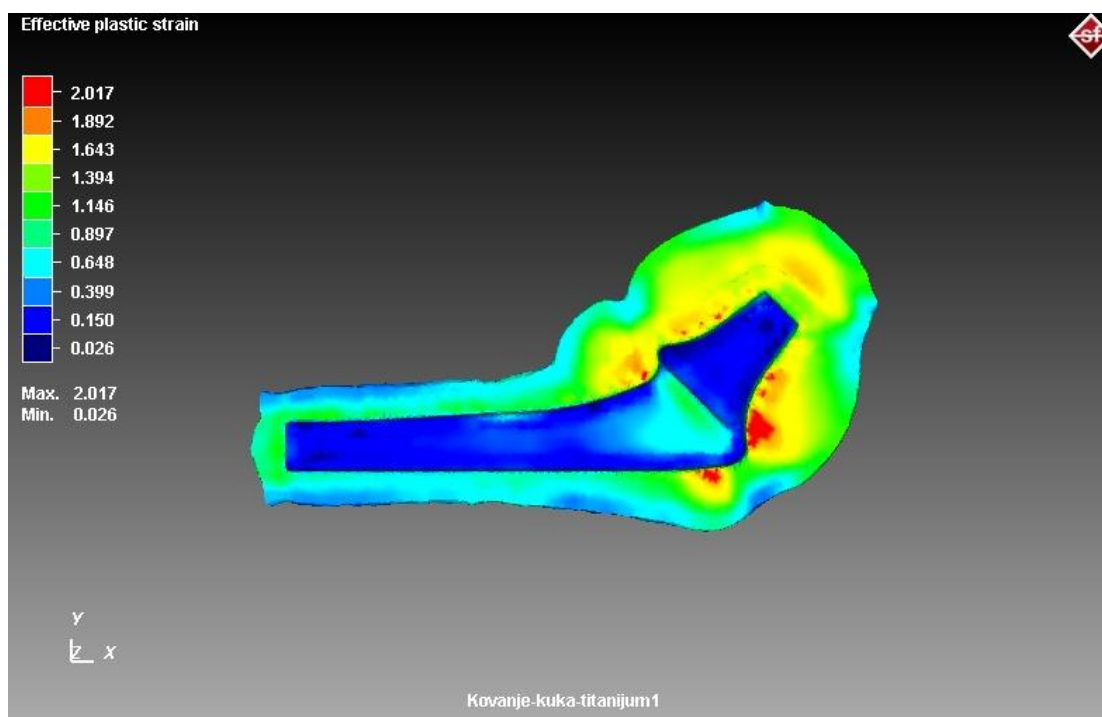
Слика 38. Расподела брзина деформације отковка

На слици 39 је приказана расподела ефективног напона отковка.



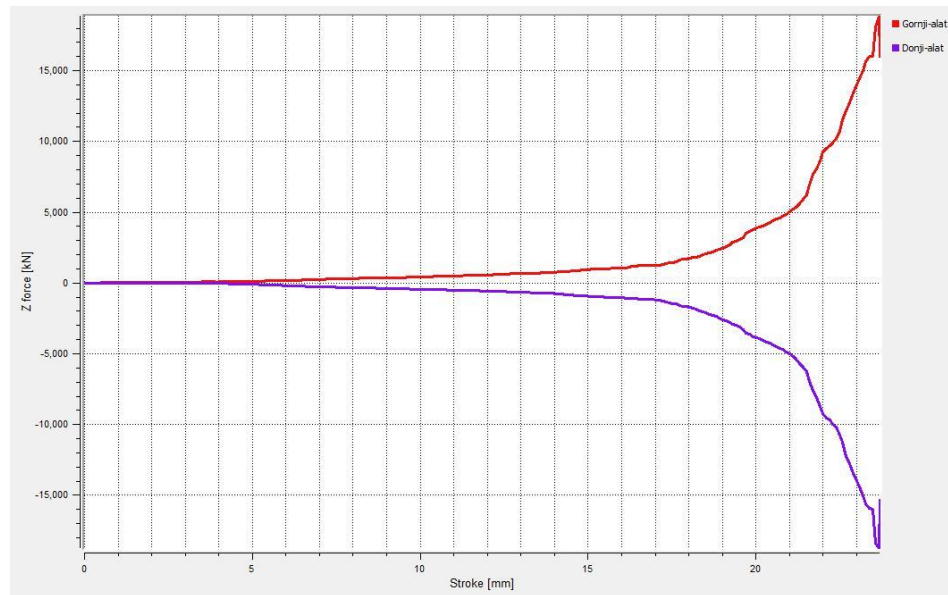
Слика 39. Расподела ефективног напона

На слици 40 је приказана деформација отковка.



Слика 40. Ефективна деформација отковка

На слици 41 је приказан график деформационих сила.



Слика 41. График деформационих сила

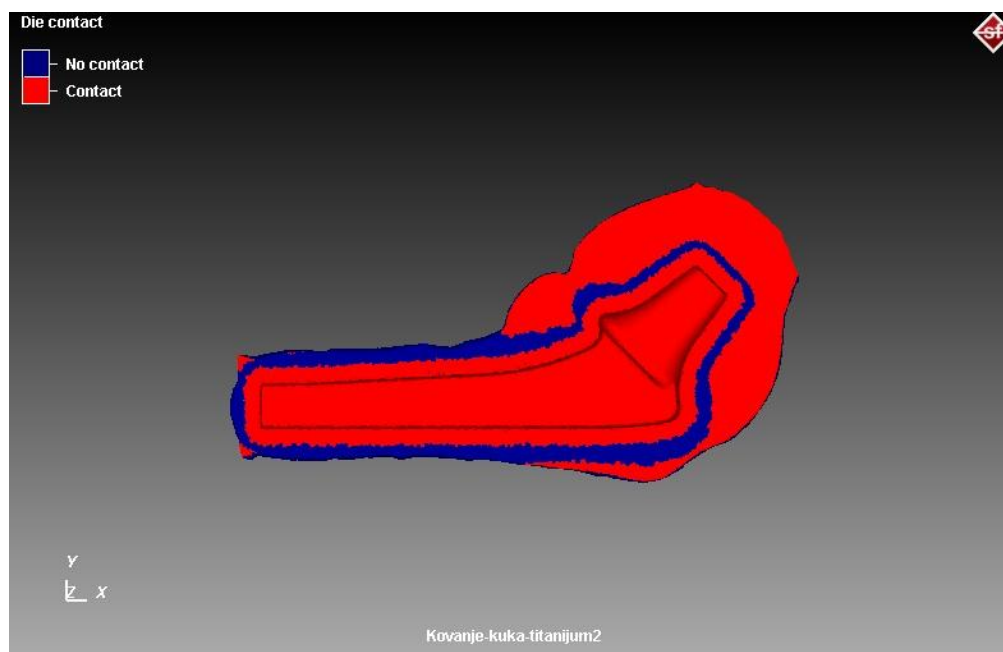
5.2 Симулација 2.

Улазни подаци за симулацију 2 су:

- Материјал припремка: легура титанијума, $Ti-6Al-4V$
- Материјал алата: нерђајући челик, по DIN стандарду 1.2344
- Температура алата: $600\text{ }^{\circ}C$
- Температура припремка: $900\text{ }^{\circ}C$
- Фактор трења: $m = 0,4$
- Машина: хидраулична преса
- Брзина деформисања: 500 mm/s

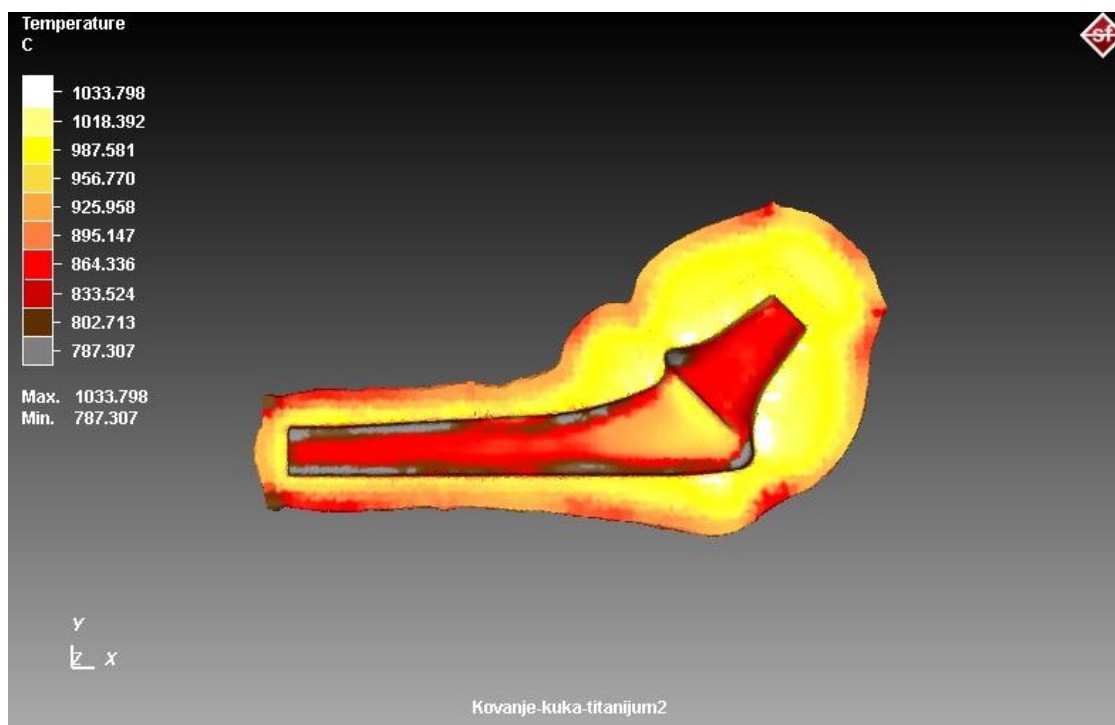
Након што је извршена симулација, добијени су резултати који су приказани на следећим сликама.

На слици 42 је приказан контакт алата и отковка , са којег се види да је алат успешно попуњен.



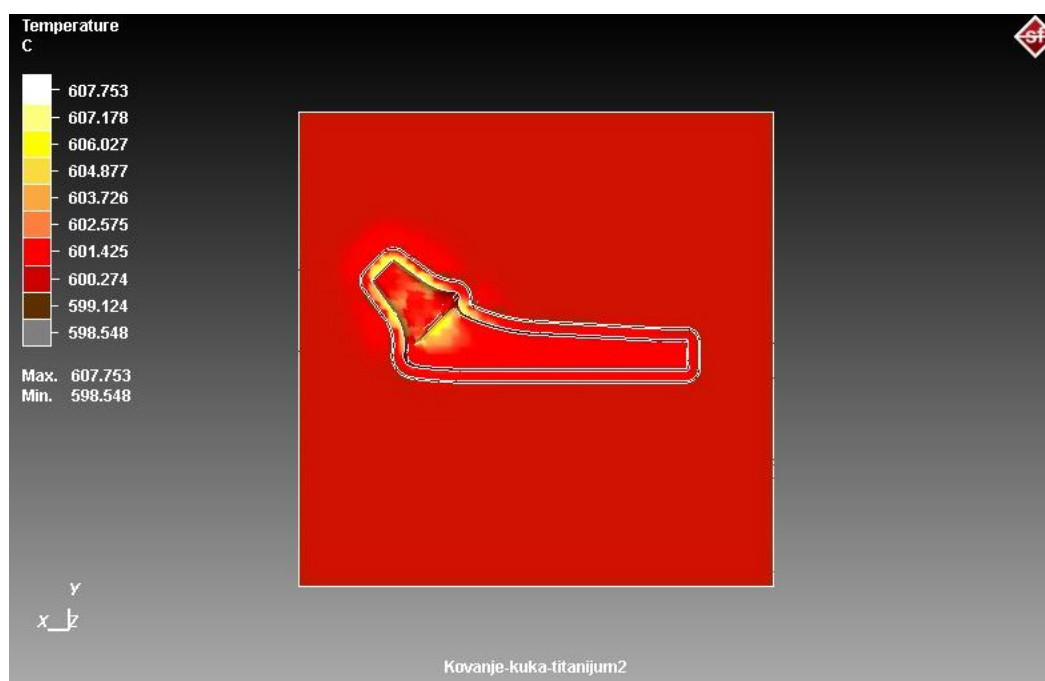
Слика 42. Попуњеност алата

На слици 43 је приказана расподела температура отковка.



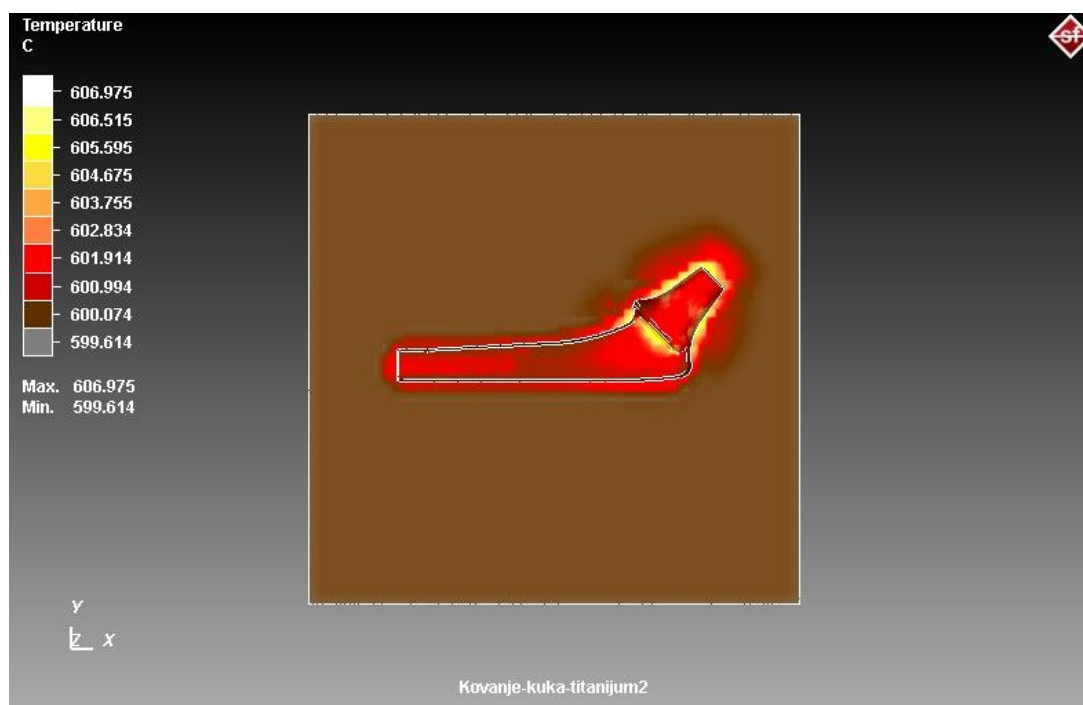
Слика 43. Расподела температура отковка

На слици 44 је дата расподела температура горњег алата.



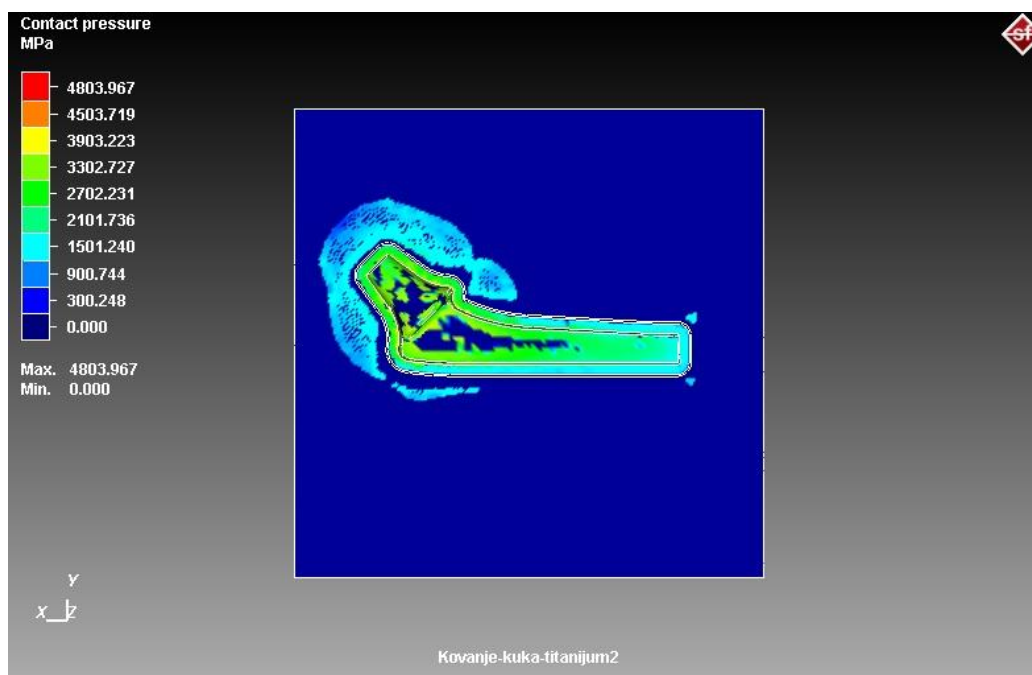
Слика 44. Расподела температура горњег алата

На слици 45 је дата расподела температура доњег алата.



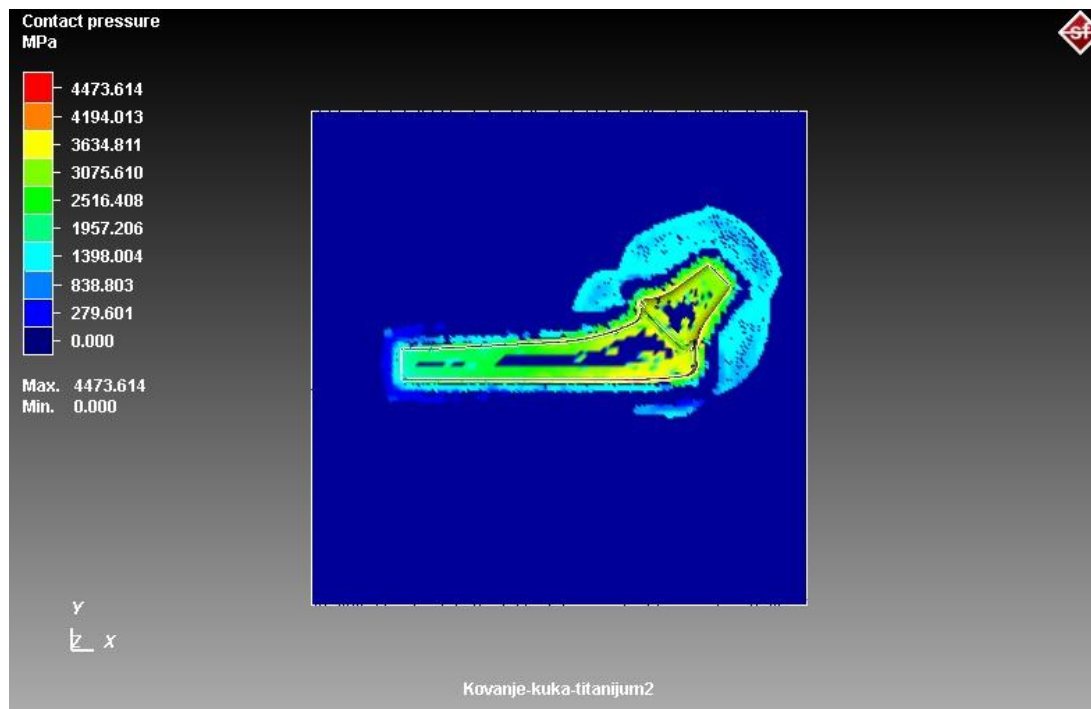
Слика 45. Расподела температура доњег алата

На слици 46 је приказано деловање контактеног притиска на горњи алат.



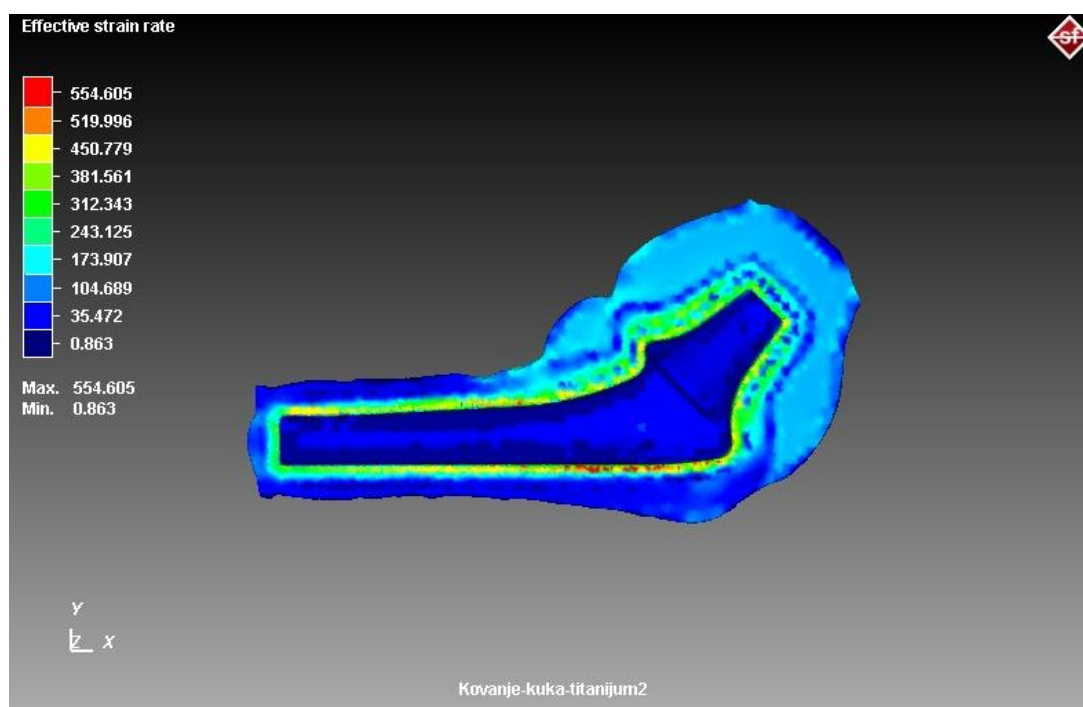
Слика 46. Деловање контактеног притиска на горњи алат

На слици 47 је приказано деловање контактеног притиска на доњи алат.



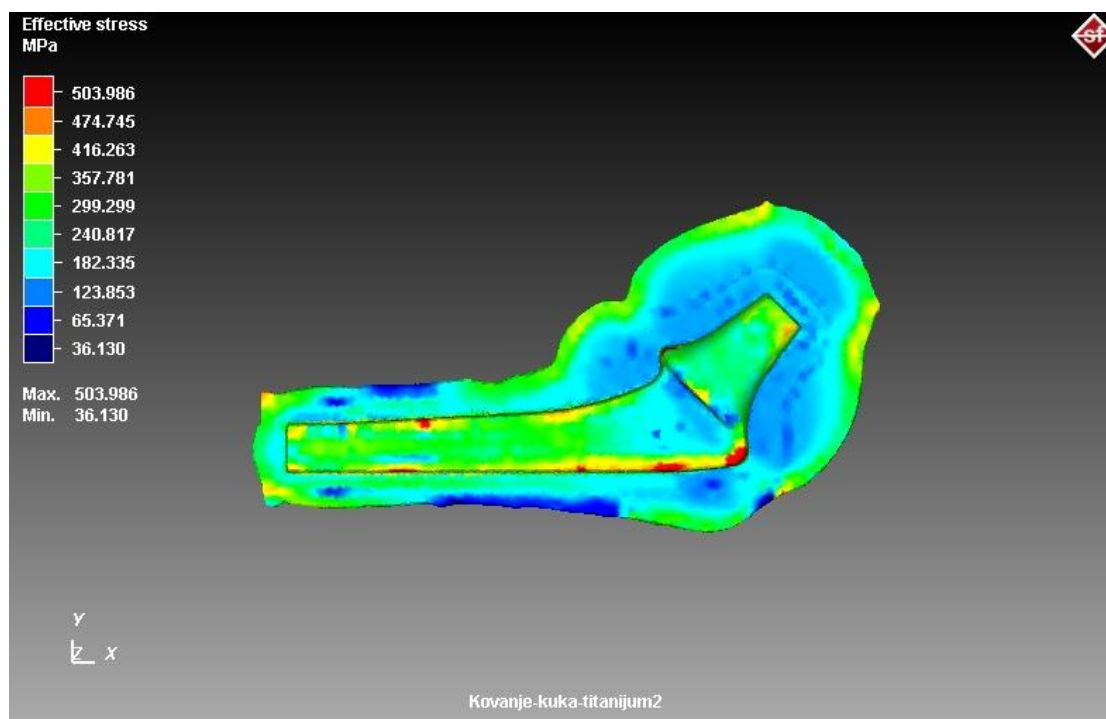
Слика 47. Деловање контактеног притиска на доњи алат

На слици 48 је приказана брзина деформације отковка.



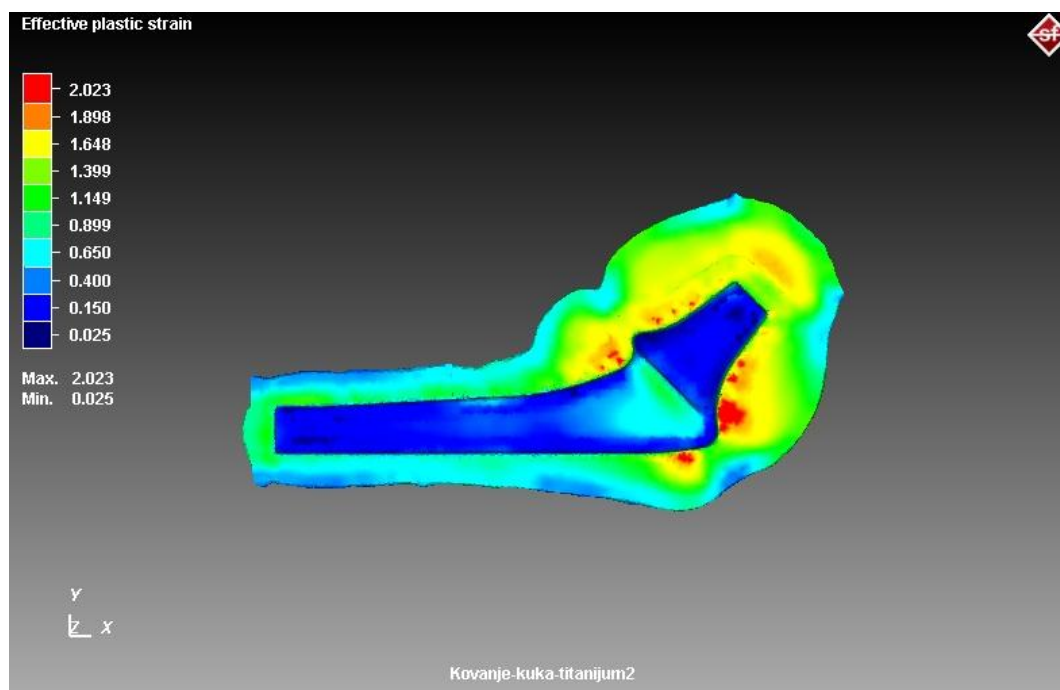
Слика 48. Брзина деформације

На слици 49 су приказани ефективни напони.



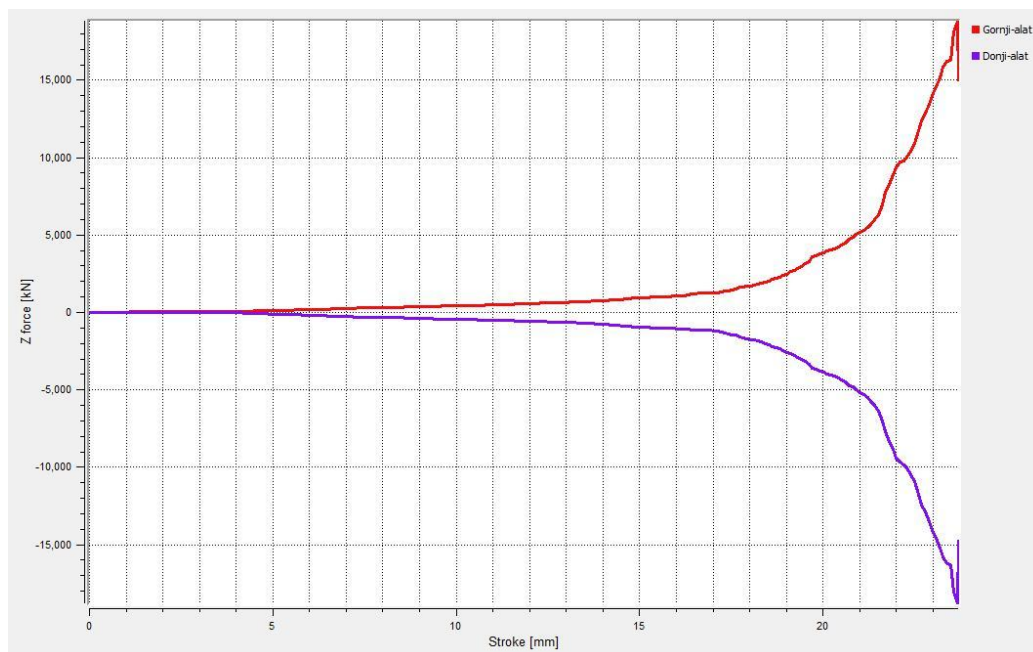
Слика 49. Ефективни напони

На слици 50 је приказана ефективна пластична деформација.



Слика 50. Ефективна пластична деформација

На слици 51 је приказан график деформационих сила.



Слика 51. График деформационих сила

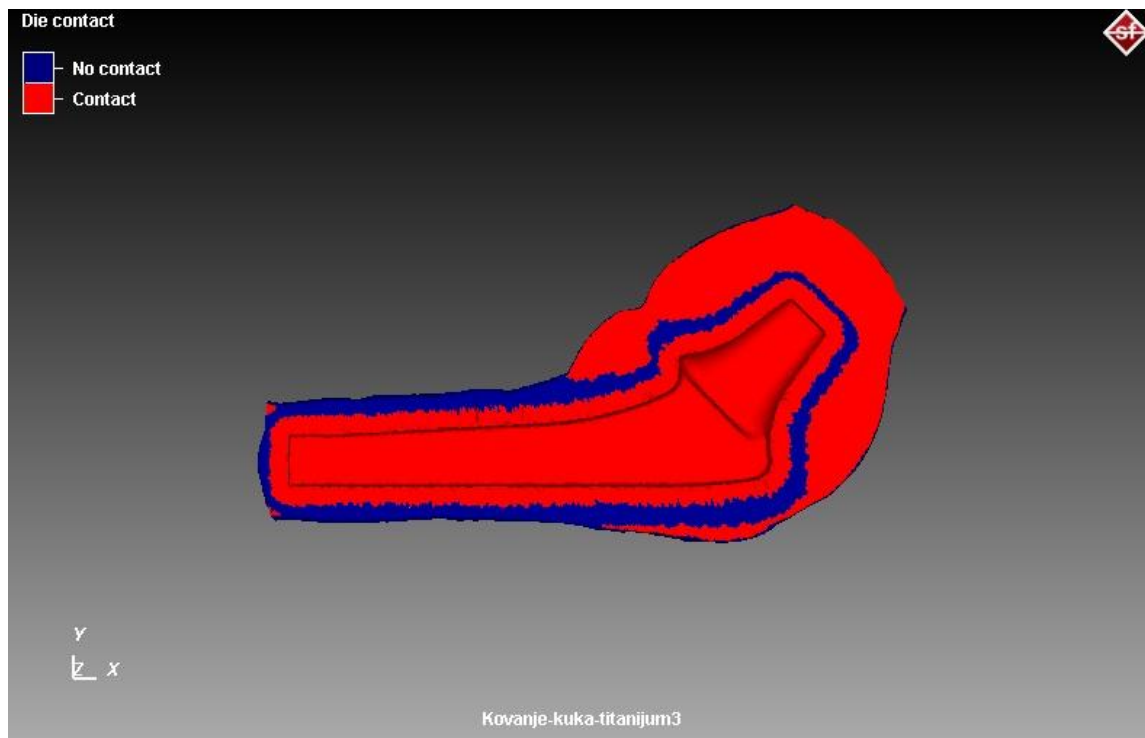
5.3 Симулација 3.

Улазни подаци за симулацију 3 су:

- Материјал припремка: легура титанијума, $Ti-6Al-4V$
- Материјал алата: нерђајући челик, по DIN стандарду 1.2344
- Температура алата: $400\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Температура припремка: $900\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Фактор трења: $m=0,4$
- Машина: хидраулична преса
- Брзина деформисања: 10 mm/s

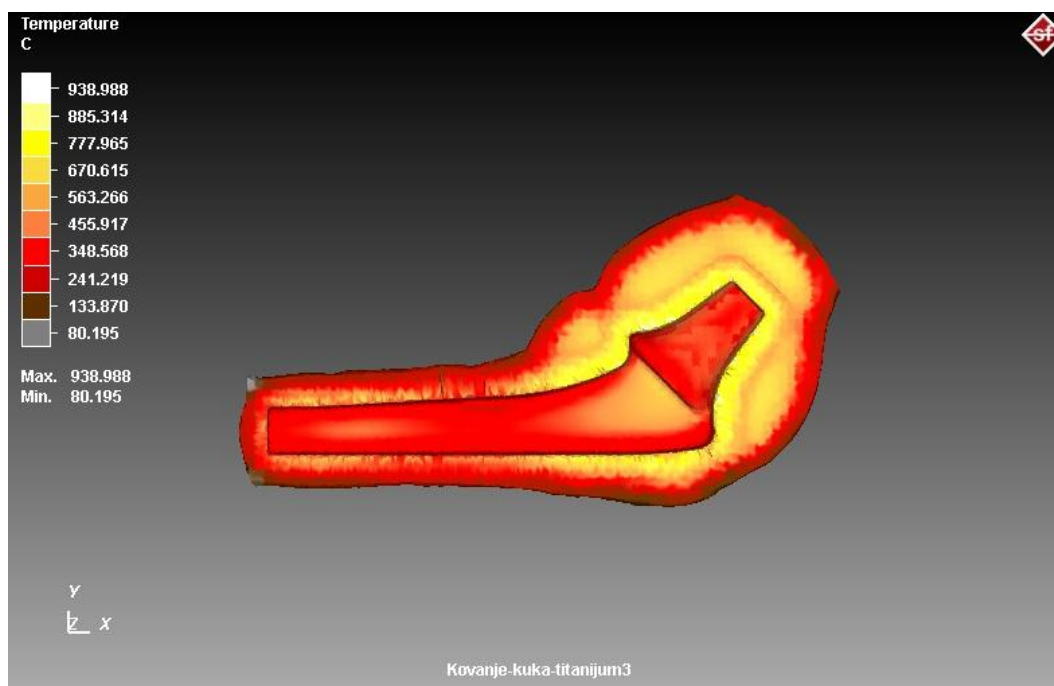
Након извршетка симулације, добијени су резултати који су добијени на следећим сликама.

На слици 52 је дат контакт алата и отковка, на ком се примећује да је гравура у потпуности попуњена.



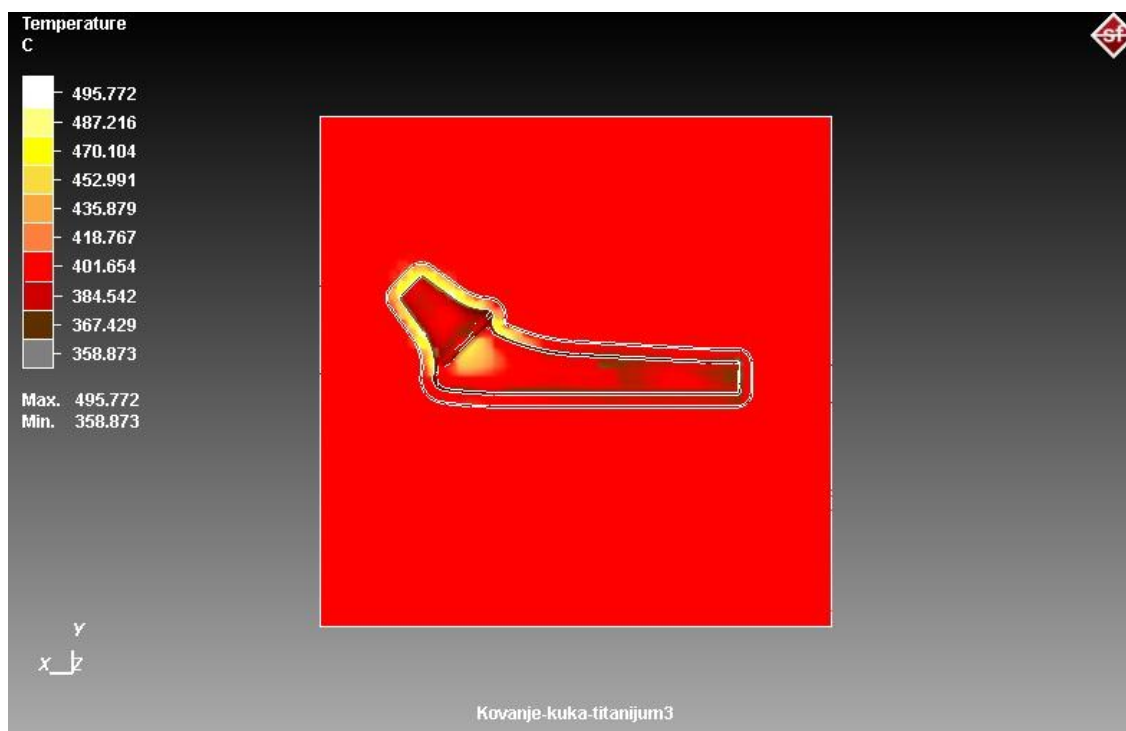
Слика 52. Контакт алата и отковка

На слици 53 је дата расподела температура отковка.



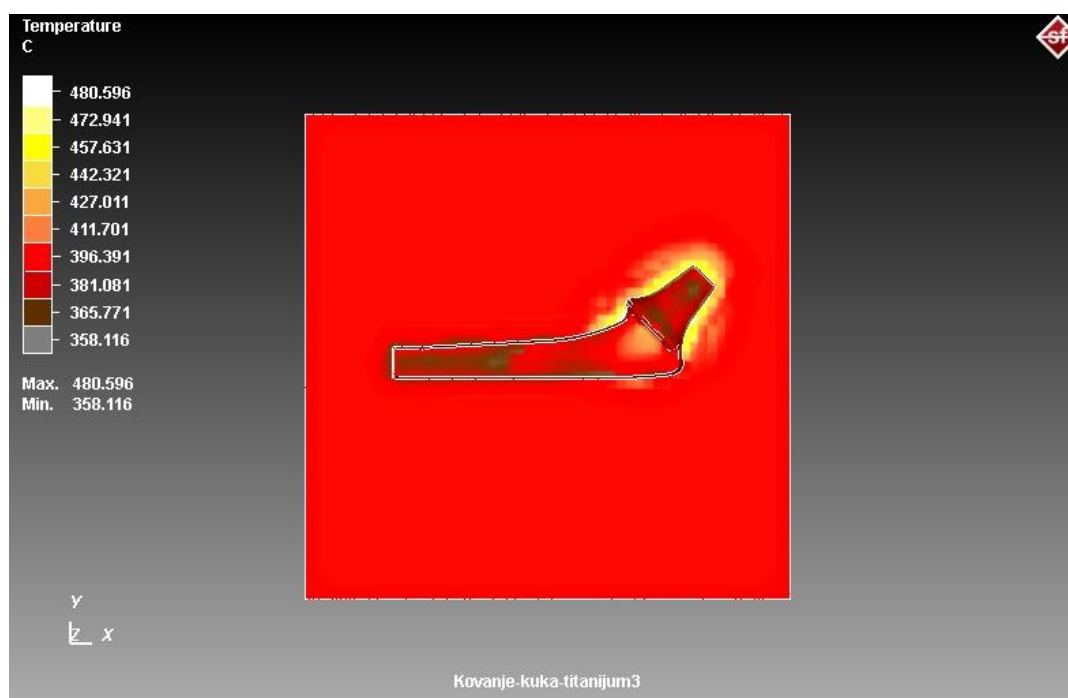
Слика 53. Расподела температуре

На слици 54 је дата расподела температуре горњег алата.



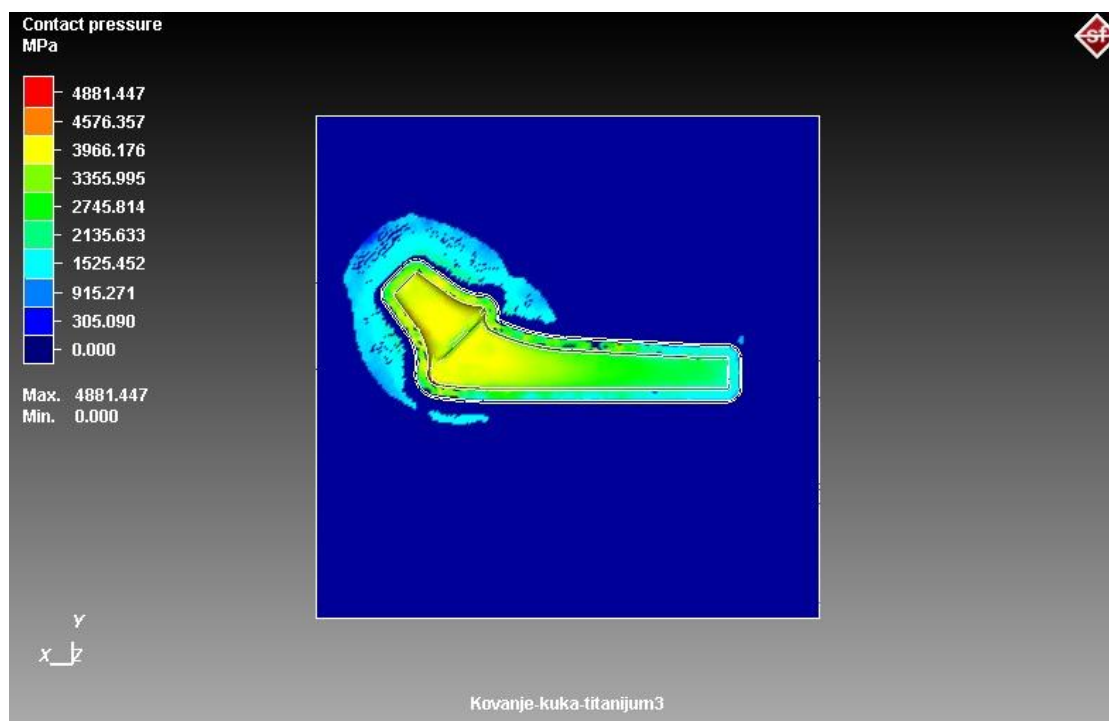
Слика 54. Расподела температуре горњег алата

На слици 55 је приказан распоред температуре доњег алата.



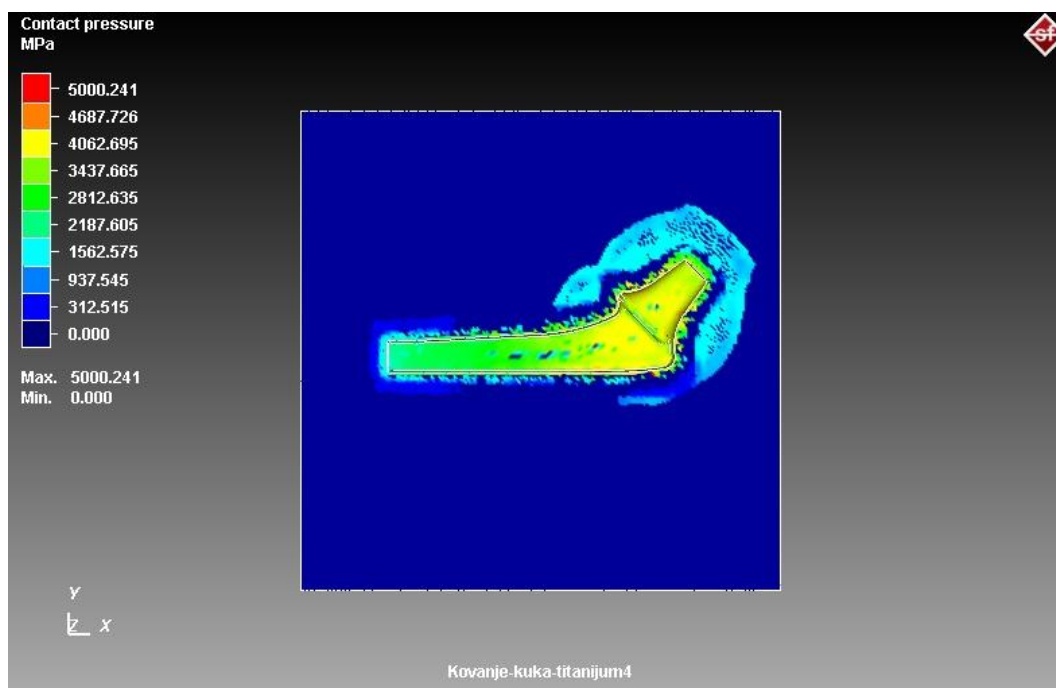
Слика 55. Распоред температура доњег дела алата

На слици 56 је приказано деловање контактних притисака на горњи алат.



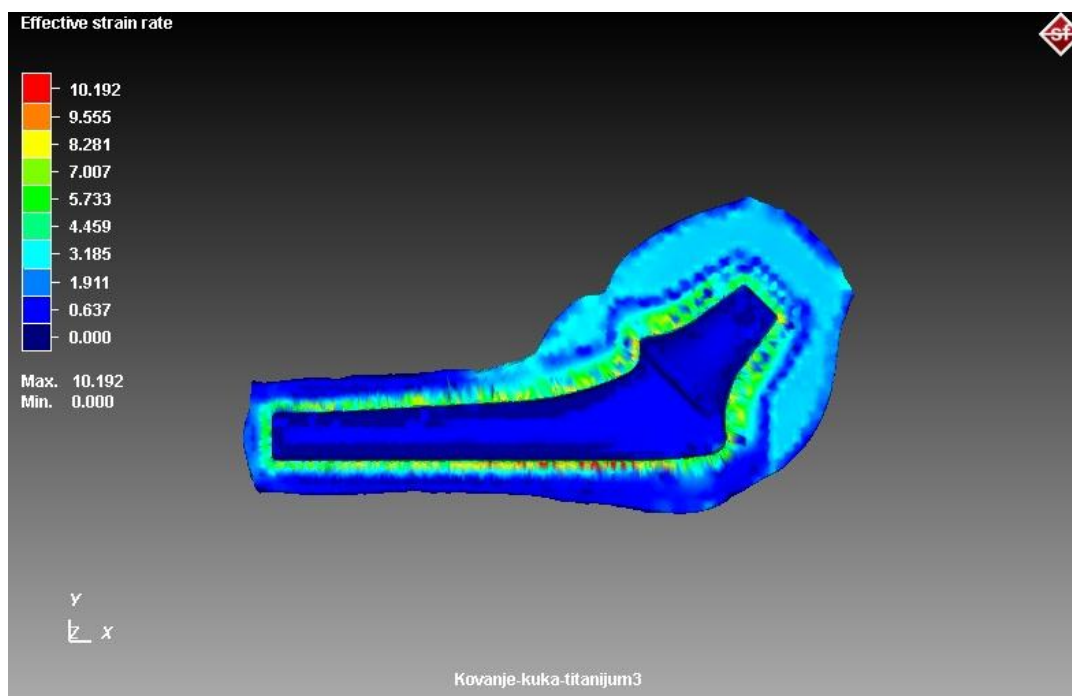
Слика 56. Деловање контактних притисака на горњи алат

На слици 57 је приказано деловање контактних притисака на доњи алат.



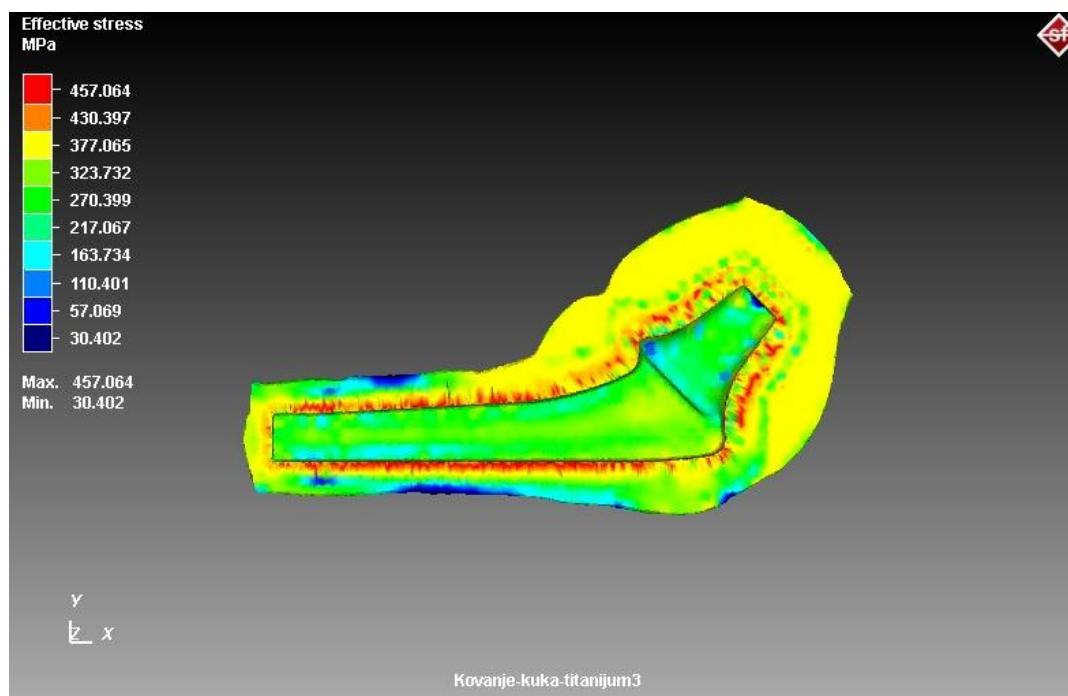
Слика 57. Деловање контактнoг притиска на доњи алат

На слици 58 је дата брзина деформације.



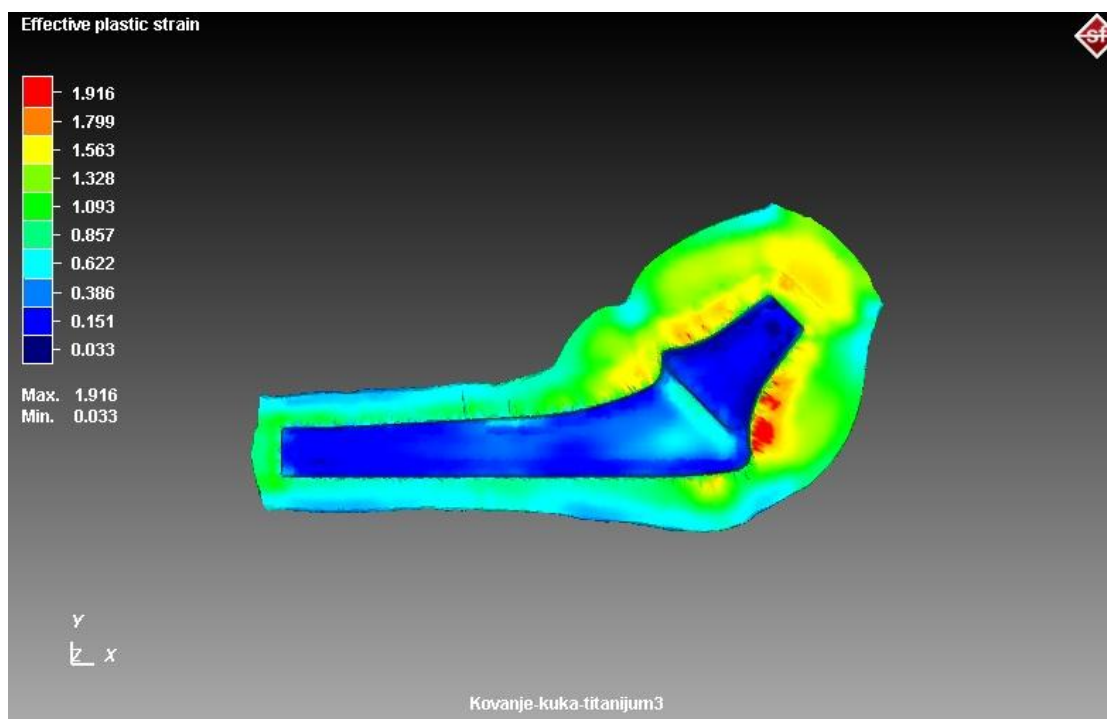
Слика 58. Брзина деформације

На слици 59 је приказан ефективни напон.



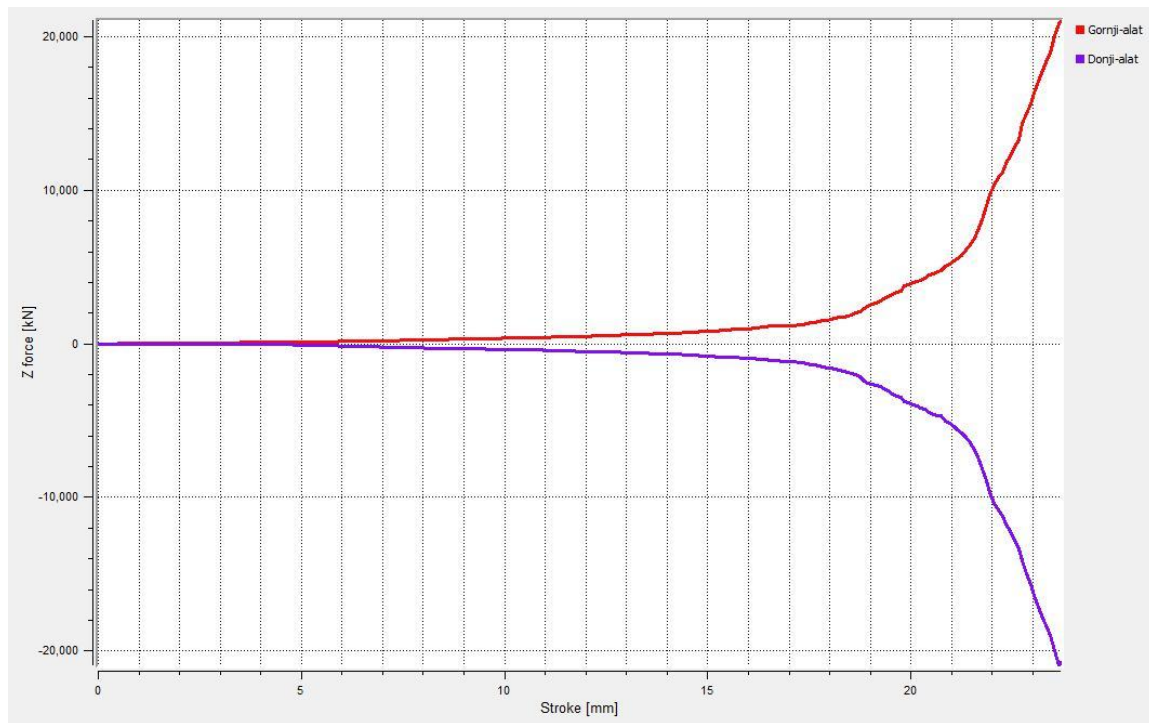
Слика 59. Ефективни напон

На слици 60 је дат приказ ефективне пластичне деформације.



Слика 60. Ефективна пластична деформација

На слици 61 је дат график деформационе силе.



Слика 61. График деформационе силе

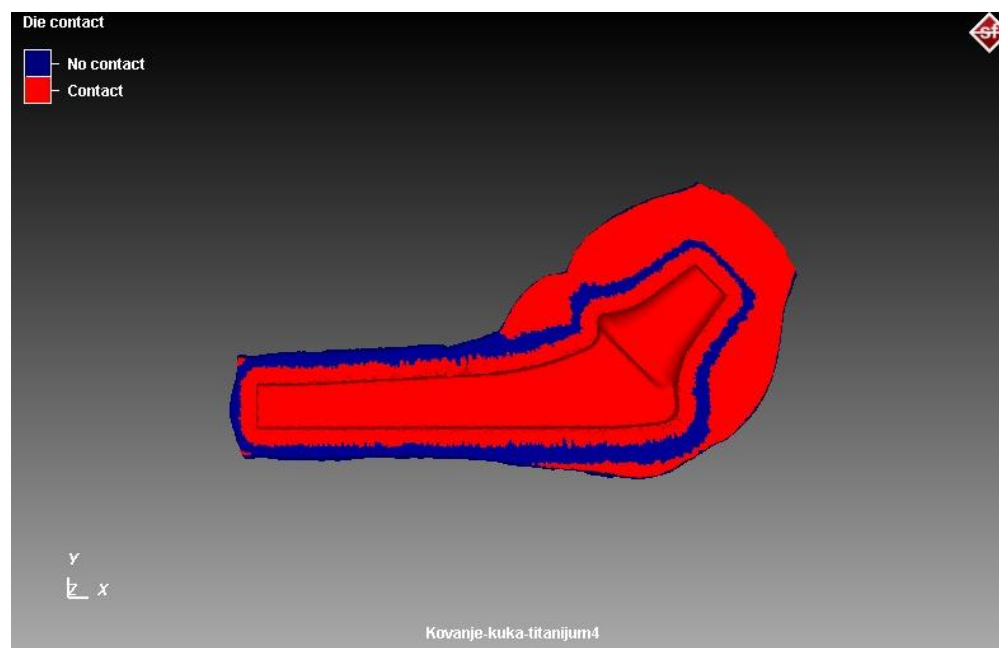
5.4 Симулација 4.

Улазни подаци за симулацију 4 су:

- Материјал припремка: легура титанијума, *Ti-6Al-4V*
- Материјал алата: нерђајући челик, по *DIN* стандарду 1.2344
- Температура алата: 600 °C
- Температура припремка: 900 °C
- Фактор трења: $m = 0,4$
- Машина: хидраулична преса
- Брзина деформисања: 10 mm/s

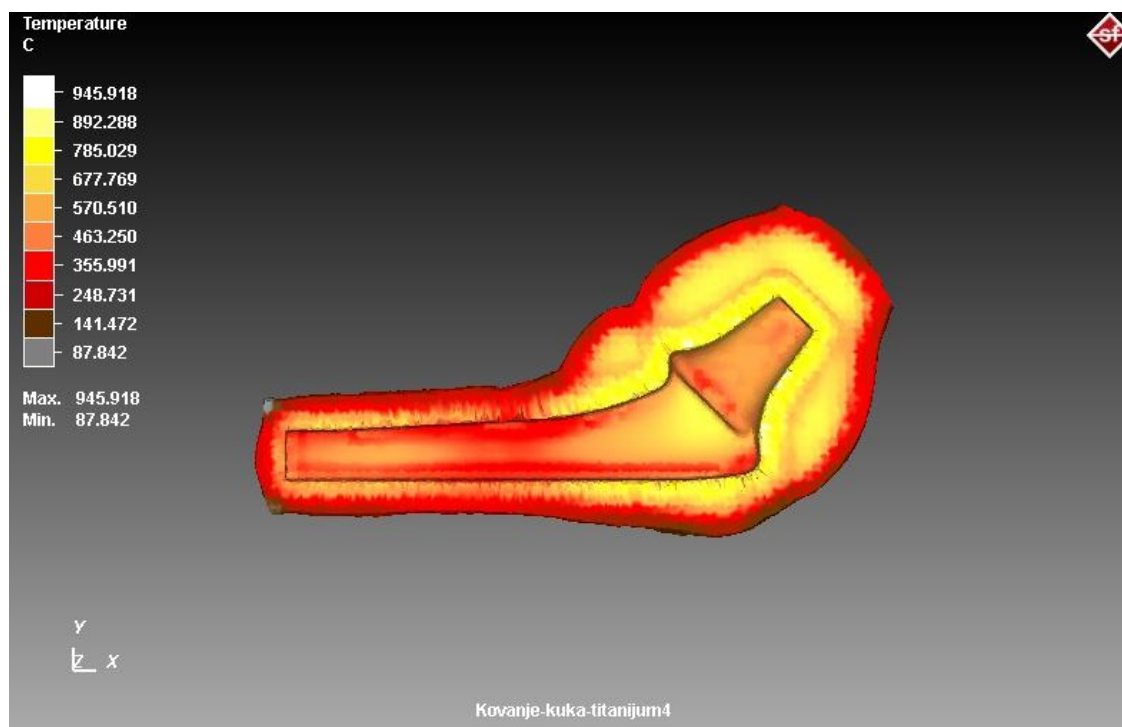
Након завршетка симулације, добијени су резултати који су приказани на следећим сликама.

На слици 62 је дат приказ контакта алата и припремка, из ког се закључује да је гравура попуњена.



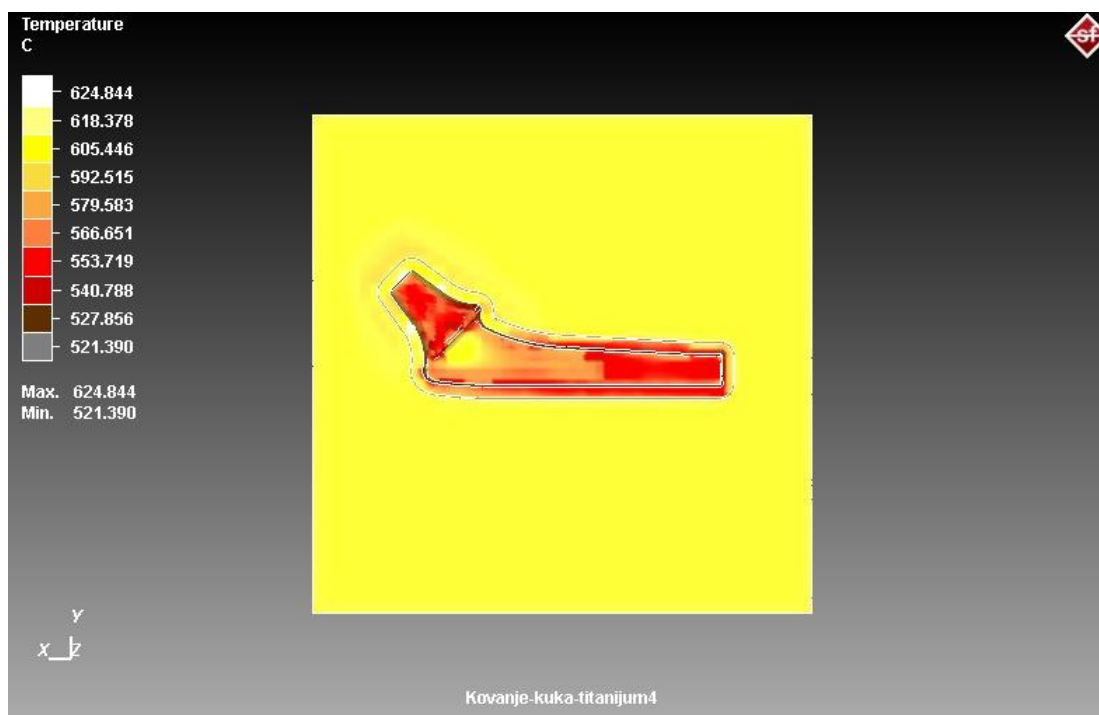
Слика 62. Контакт алата и отковка

На слици 63 је дата расподела температура отковка.



Слика 63. Расподела температуре

На слици 64 је дата расподела температуре горњег алата.



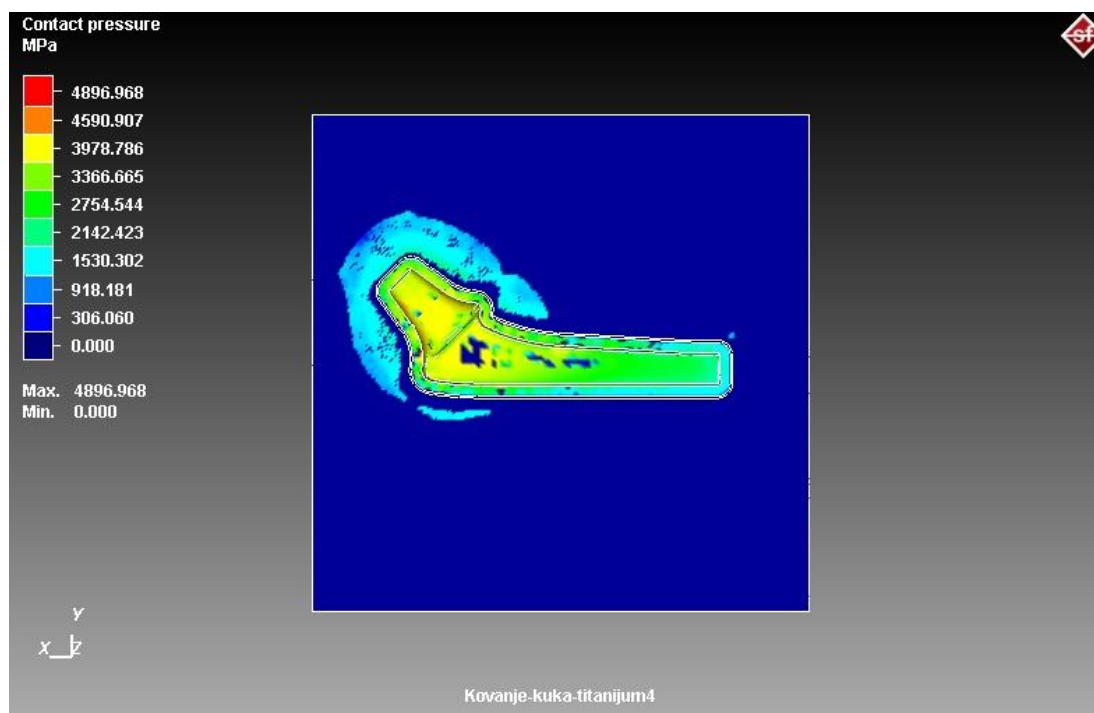
Слика 64. Расподела температуре горњег алата

На слици 64 је дата расподела температуре доњег алата.



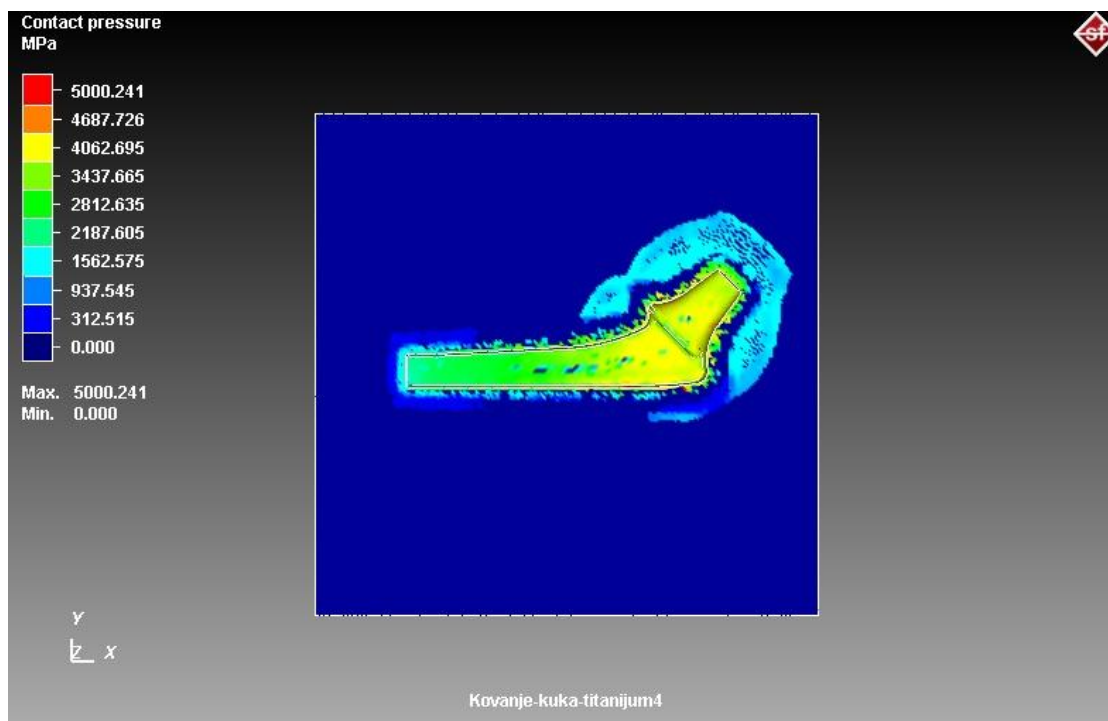
Слика 65. Расподела температуре доњег алата

На слици 66 је дато деловање контактнoг притиска на горњи алат.



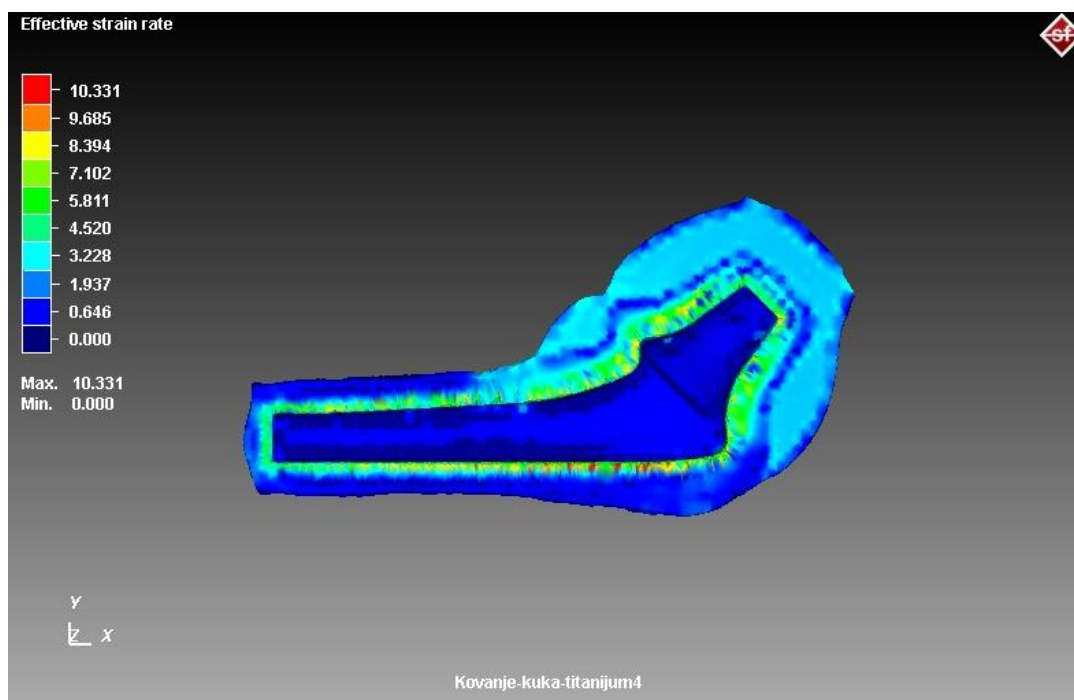
Слика 66. Деловање контактнoг притиска на горњи алат

На слици 67 је дато деловање контактнoг притиска на доњи алат.



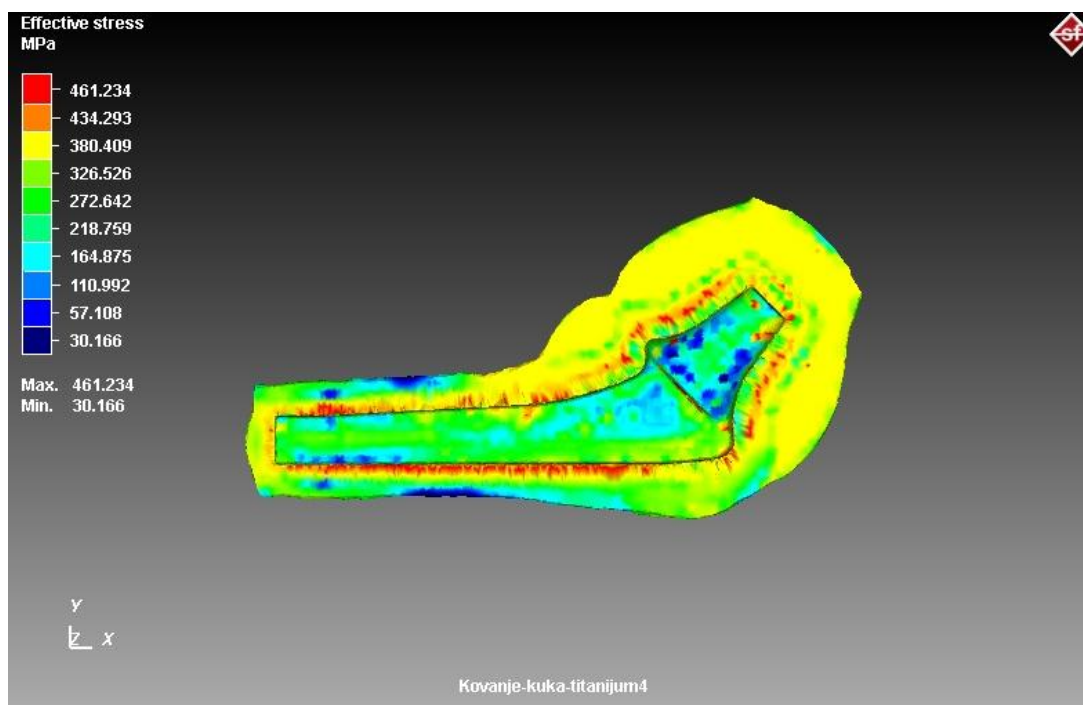
Слика 67. Деловање контактнoг притиска на доњи алат

На слици 68 је дата брзина деформације.



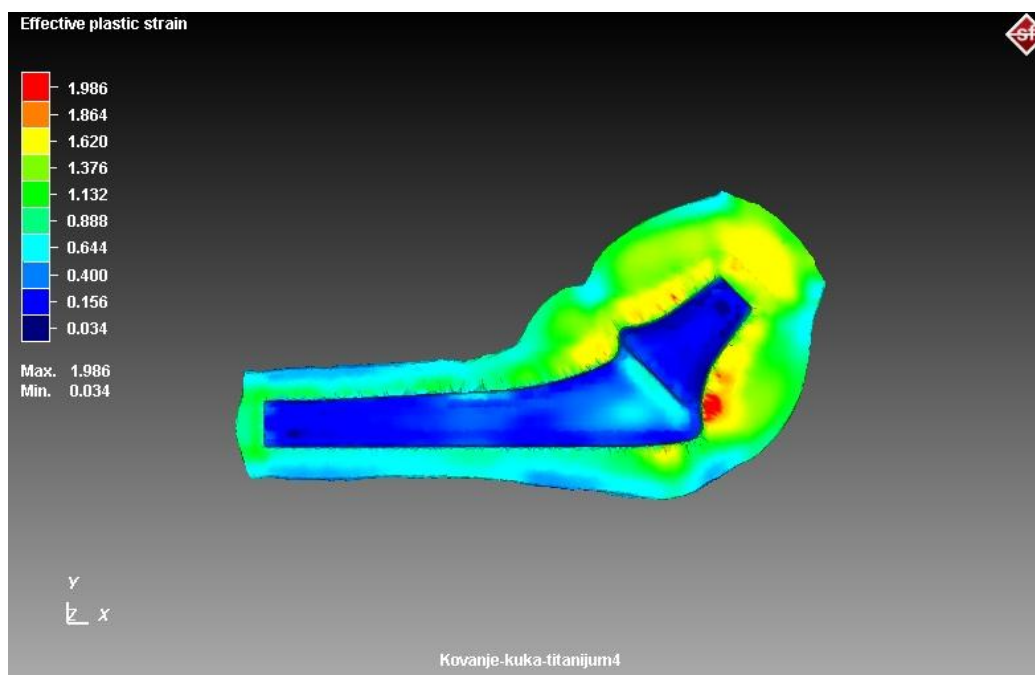
Слика 68. Брзина деформације

На слици 69 је дат ефективни напон.



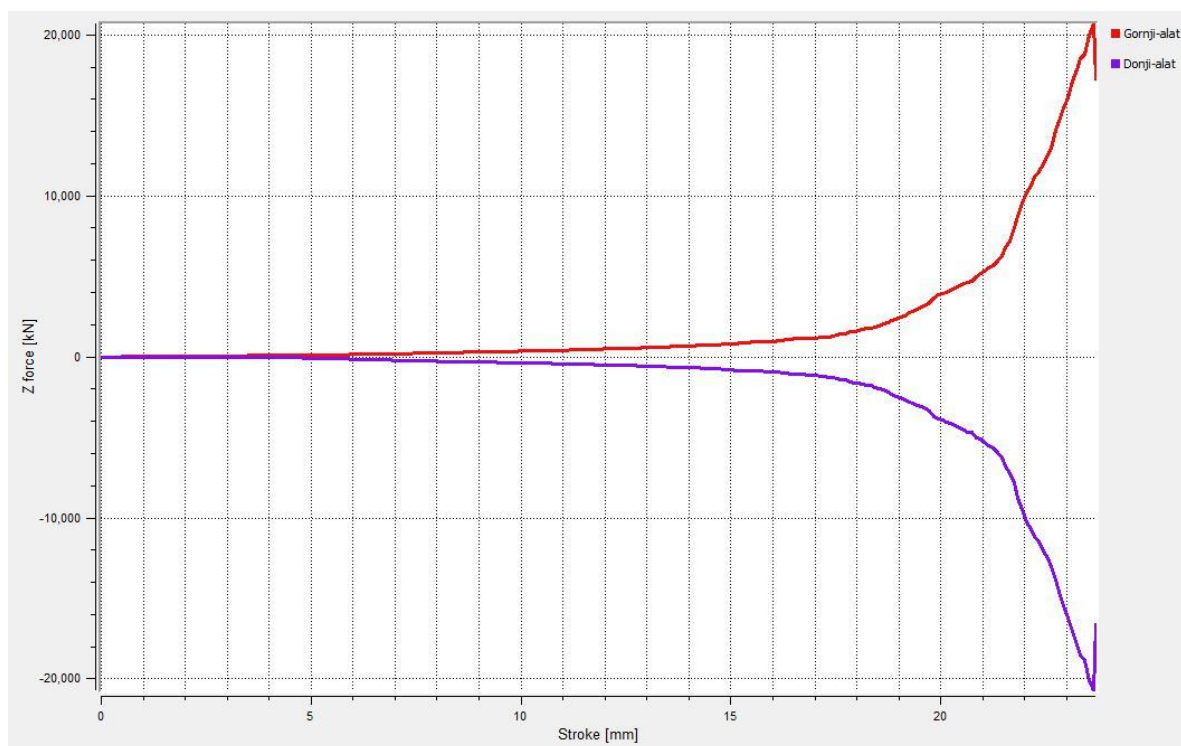
Слика 69. Ефективни напон

На слици 70 је дата ефективна пластична деформација.



Слика 70. Ефективна пластична деформација

На слици 71 је дат график деформационих сила.



Слика 71. График деформационе силе

6. Анализа резултата и закључак

Упоредивањем резултата 1. симулације ковања вештачког кука од титанијумске легуре са резултатима ковања од челика, долази се до закључка да је применом титанијума контактни притисак који делује на алате знатно смањен. Поготову на доњем делу алата што се види са *слике 27 (стр. 31)* за ковање од челика и *слике 37 (стр. 37)* за ковање од титанијумске легуре. Такође је смањена и деформациона сила што се види са *слике 31 (стр. 33)* за ковање од челика и *слике 41 (стр. 39)* за ковање од титанијумске легуре, што значи да је за ковање потребна машина мање снаге. Међутим, са *слике 33 (стр. 35)* се види да температура отковка знатно прелази максималну препоручену температуру ковања $Ti-6Al-4V$ легуре од 980° , што може лоше утицати на микроструктуру готовог отковка [3].

Такође проблем се запажа и у 2. симулацији где отковак (*слика 43 стр. 40*) прелази препоручене температуре ковања. Ефективни напон у 1. симулацији (*слика 39 стр. 38*) и 2. симулацији (*слика 49 стр. 43*), је знатно већи од напона отковка од челика (*слика 29 стр. 32*).

Температура отковка у 3. симулацији (*слика 53 стр. 46*) је задовољавајућа, међутим велике су разлике у температури сегмената површине горњег (*слика 54 стр. 46*), а тако и доњег алата (*слика 55 стр. 47*), што може узроковати пуцање алата.

У 4. симулацији температура алата је хомогенија (*слика 64 и слика 65 стр. 52*), а и температура отковка (*слика 63 стр. 51*) је у пожељном оквиру. Одавде се изводи закључак да се вештачки кук од титанијумске легуре $Ti-6Al-4V$ може производити у истим алатима, као и при ковању од челика, коришћењем параметара 4. симулације (*стр. 50*) и на истој машини с обзиром да је потребна снага машине, односно деформациона сила коју машина остварује релативно иста (*слика 71 стр. 55 и слика 31 стр. 33*).

[15] http://hr.swewe.net/word_show.htm/?1296059_1&Biomedicinski_Materijali, приступио
11.10.2015