

**ИСТРАЖИВАЊЕ УТИЦАЈА МОДЕЛА ТРЕЊА НА КАРАКТЕРИСТИКЕ ПРОЦЕСА КОМБИНОВАНОГ ИСТИСКИВАЊА ПУТЕМ НУМЕРИЧКИХ СИМУЛАЦИЈА****RESEARCH ON THE IMPACT OF FRICTION MODELS ON THE CHARACTERISTICS OF COMBINED EXTRUSION PROCESSES THROUGH NUMERICAL SIMULATIONS**

Балша Дачевић, Факултет техничких наука, Нови Сад

**Област – МАШИНСТВО**

**Кратак садржај** – У раду је испитиван утицај модела трења на процес комбинованог истискивања путем нумеричких симулација. Симулације су моделоване по узору на експеримент и њихови резултати су упоређени. Испитиван је утицај трења на геометријске карактеристике готовог дела и дијаграм сила ход.

**Кључне речи:** Контактна трење, модели трења, комбиновано истискивање, Метода коначних елемената

**Abstract** – In this paper characteristics of combined extrusion processes were researched through numerical simulations. Simulations were modelled after experimental setup and later their results were compared. Characteristics that were investigated are geometrical characteristics of finished part and Force-stroke diagram.

**Keywords:** Friction, friction models, combined extrusion, Finite element method

**1. УВОД**

Контактна трење представља један од најважнијих фактора процеса обраде деформисањем који у великој мери утиче на тачност и квалитет финалног дела, као и радни век алата. Како би се оптимално пројектовао процес обраде и правилно конструисао алат, његово познавање и квантитативно одређивање је од круцијалног значаја [1,2,3]. На основу бројних истраживања, развијени су различити теоријски модели који описују контактне услове на граничној површини алат-обрадак [4,5].

У овом раду је испитиван утицај модела трења на карактеристике процеса комбинованог истискивања. Нумеричким симулацијама, методом коначних елемената, добијени су резултати који су упоређени са експерименталним.

**2. МОДЕЛИ КОНТАКТНОГ ТРЕЊА**

Као последица релативног померања материјала у односу на површину алата контактна трење има за последицу стварање тангенцијалних напона у приграничним слојевима материјала. Како би

се анализирано напонско стање у току процеса деформисања, веома је значајно питање квантитативне оцене и изражавања величине тангенцијалног напона услед контактнoг трења, односно обухватање утицаја трења на промену напонског стања [5].

У процесима обраде деформисањем се користе три закона, теорије, односно модела за математичко описивање контактнoг трења [5]:

- Кулонов модел,
- модел константног трења,
- адхезионе теорије.

У случају Кулоновог модела, тангенцијални напон се рачуна преко коефицијента трења  $\mu$ , који представља однос тангенцијалног и нормалног напона [5].

Аналитички се изражава преко релације која је још позната и као Кулонов закон [1]:

$$\tau_k = \mu \cdot \sigma_n \quad (1)$$

где  $\tau_k$  представља тангенцијални напон на контактнoј површини услед контактнoг трења а  $\sigma_n$  одговарајући нормални напон.

Модел константног трења се односи на изражавање тангенцијалног напона преко константног фактора смицања и максималног тангенцијалног напона. Релација којом се аналитички изражава овај модел јесте [5]:

$$\tau_k = m \cdot \tau_{max} \quad (2)$$

где  $\tau_k$  представља тангенцијални напон на контактнoј површини услед контактнoг трења,  $m$  фактор смицања, односно трења и  $\tau_{max}$  максимални тангенцијални напон.

Претходна два закона немају генералну вредност, и не “покривају” области средњих нормалних притисака. Управо зато су развијене адхезионе теорије које представљају групу модела који узимају у обзир реалну хрпавост контактних површина и покривају све области притисака [4].

Wanheim је развио универзални модел који покрива све области притисака који се иначе назива и општи модел. Аналитички се изражава [4]:

$$\tau = f \cdot \alpha \cdot k \quad (3)$$

**НАПОМЕНА:**

Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Младомир Милутиновић, ред. проф.

где је  $\tau$  тангенцијални напон на контактної површини услед контактног трења,  $f$  фактор трења,  $0 \leq f \leq 1$ ,  $\alpha$  однос реалне зоне контакта и рачунске површине контакта,  $k$  напон течења.

### 3. МЕТОДА КОНАЧНИХ ЕЛЕМЕНАТА

С обзиром да експерименталне методе испитивања генерално изискују пуно времена, нумеричке симулације представљају веома користан и ефикасан алат за предвиђање проблема у индустријској производњи уз смањење времена и трошкова развоја. Основна предност нумеричких симулација јесте могућност извођења “Шта ако” симулација, где се без додатних трошкова могу испитати различити сценарији и пробати алтернативна пројектна решења [4].

Основна идеја која лежи иза методе коначних елемената јесте проналажење решења компликованих проблема заменом за једноставнији. Како се уведе овакве измене проналажење егзактног решења није могуће, већ добијени резултат представља апроксимирано решење [6].

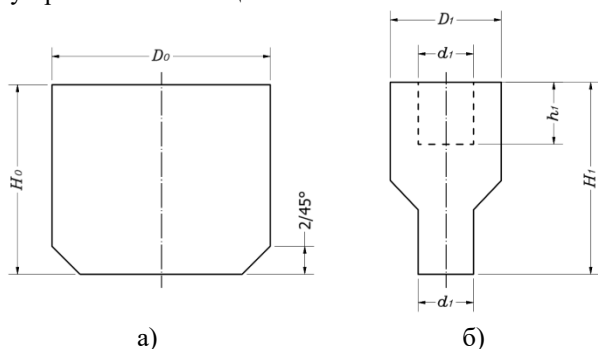
Ова метода спада у методе дискретне анализе и заснива се на физичкој дискретизацији посматраног домена. Принцип на коме се базира се састоји од раздвајања посматраног континуума (са бесконачним бројем степени слободе) на ограничен број међусобно повезаних делова (са ограниченим бројем степени слободе), који се називају коначни елементи. [4, 7].

Све нумеричке симулације у овом раду су урађене у програмском пакету Simufact Forming 12 који се користи за анализу процеса пластичног деформисања методом коначних елемената.

### 4. ПРЕГЛЕД РЕЗУЛТАТА ЕКСПЕРИМЕНТА

Експериментални део рада је одрађен у оквиру Мастер рада [8]. За истискивање узорака је коришћена хидраулична преса Sack&Kiesselbach номиналне силе 6,3 MN и две матрице различите геометрије једне са углом конуса од 30° и друге са углом конуса од 90°. Помоћу сваке матрице истиснута су четири узорка са различитим ходовима алата: 9mm, 12mm, 15mm и 18mm.

Карактеристичне димензије припремка и готовог дела су приказани на слици 1.



Слика 1. а) Припремак б) готов део [8]

Резултати промене деформационе силе у зависности од хода алата су добијени у (\*.xls) формату и они су

приказани у компарацији са резултатима добијеним путем нумеричких симулацијама

### 5. ПРИПРЕМА НУМЕРИЧКЕ АНАЛИЗЕ

Први корак у припреми нумеричких симулација јесте дефинисање врсте обраде, након чега је извршен унос геометрије алата у програм за вршење симулација.

С обзиром да се ради о алатима са конусним површинама њихово моделирање је урађено у CAD програму SolidEdge 2022. Конверзија (\*.par) формата модела у (\*.stl) формат је извршена у бинарном облику са фином толеранцијом конверзије од 0,001mm.

Матрице и жиг су моделовани као апсолутно крута тела услед чега није потребно извршити избор материјала. Материјал узорка је Ч1531 (C45E) чије је дефинисање за потребе нумеричких симулација извршено мануелно.

Крива течења [8] је добијена рачунском методом и њен облик је приказан испод:

$$K = 289,67 + 597,58 \cdot \varphi^{0,333} \quad (4)$$

Остале неопходне карактеристике материјала су приказане у табели 1.

Табела 1. Карактеристике материјала

Модул еластичности [MPa]	210000
Густина материјала [kg/m <sup>3</sup> ]	7800
Poisson-ов коефицијент	0,3

Коефицијенти и фактори трења који су коришћени у симулацијама су приказани у табели 2.

Табела 2. Модели трења и вредности коефицијента/фактора трења

Кулонов модел трења, $\mu$	0,08; 0,11; 0,2
Модел константног трења, $m$	0,14; 0,19; 0,35
Комбиновани модел трења, $\mu$ + $m$	0,08 + 0,14; 0,11 + 0,19; 0,08 + 0,14

Топлотни параметри су приказани у табели 3. док је температура околине подешена на 20°C.

Табела 3. Топлотни параметри

Топлотни параметар	Алати	Обрадак
Почетна температура [°C]	20	20
Коефицијент преноса топлоте на околину [W/m <sup>2</sup> ·K]	50	50
Коефицијент преноса топлоте на обрадак [W/m <sup>2</sup> ·K]	20000	/
Емисиона способност	0,25	0,25

Дискретизација модела узорка је урађена са коначним елементом типа Quad(10), односно квадратним коначним елементом са десет чворова. Формирање мреже је извршено на основу величине коначног елемента која је износила 0,2 mm па је број елемената након дискретизације износио 6673 елемента

Последњи корак пре почетка симулација јесте дефинисање хода алата који износе 9mm, 12mm, 15mm и 18mm.

## 6. ПРЕГЛЕД РЕЗУЛТАТА НУМЕРИЧКИХ СИМУЛАЦИЈА

### 6.1. Праћење геометријских промена

У табелама 4 и 5 су приказани добијени резултати за димензију  $h1$  заједно са експерименталним за оба типа матрице.

У случају матрице са углом конуса од  $30^\circ$ , видимо да се при ходу алата од 9mm јављају знатна одступања у односу на експериментално добијени резултат, где су се ниже вредности коефицијента и фактора трења показале тачније резултате.

За вредности хода од 12, 15 и 18mm најприближнији резултати су добијени коришћењем модела константног трења за вредност фактора  $m=0,14$  и коришћењем комбинованог модела за вредности  $\mu=0,08$  и  $m=0,14$ .

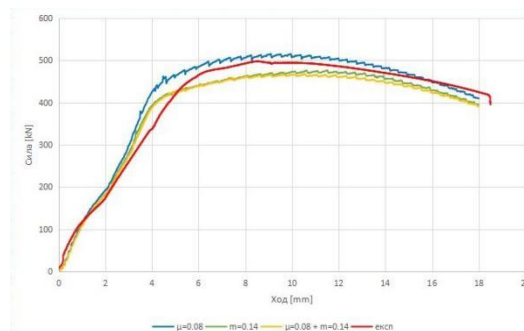
Највећа одступања су се јавила у случају коришћења Кулоновог модела трења, где су добијене вредности у свим случајевима биле више у односу на друга два модела. Може се закључити да у случају матрице са углом од  $30^\circ$  стварним контактним условима боље одговарају ниже вредности трења.

У случају матрице са углом конуса  $90^\circ$ , ситуација је знатно другачија. При ходовима алата 9mm, 12mm и 15mm експериментално измерена вредност је виша од оних добијених симулацијом и приближније су јој оне којима одговарају веће вредности трења.

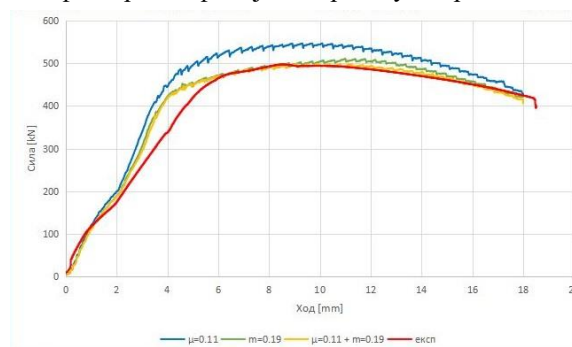
У процесу са ходом алата од 18mm најприближнији резултати су добијени коришћењем најнижих вредности коефицијента и фактора, где је модел константног трења за вредност  $m=0,14$  пружио најтачнији резултат.

### 6.2. Дијаграм сила ход

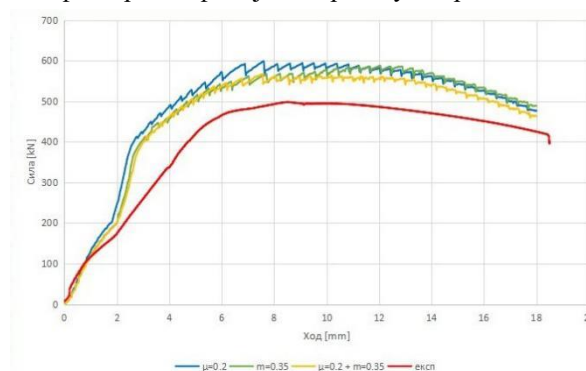
На сликама 2, 3 и 4 приказани су дијаграми сила ход за различите моделе трења при ходу алата од 18mm у матрици са углом од  $30^\circ$ .



Слика 2. Сила ход дијаграм за најниже вредности фактора/коефицијента трења у матрици од  $30^\circ$



Слика 3. Сила ход дијаграм за средње вредности фактора/коефицијента трења у матрици од  $30^\circ$



Слика 4. Сила ход дијаграм за највише вредности фактора/коефицијента трења у матрици од  $30^\circ$

Табела 4. Димензија  $h1$  при употреби матрице са углом конуса од  $30^\circ$

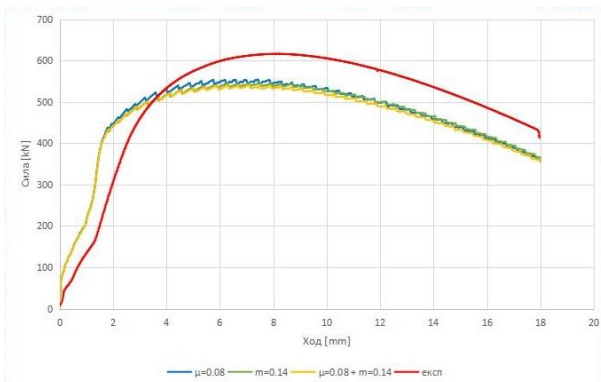
Ход	$h1$									Експ.
	$\mu=0.08$	$\mu=0.11$	$\mu=0.2$	$m=0.14$	$m=0.19$	$m=0.35$	$\mu=0.08 + m=0.14$	$\mu=0.11 + m=0.19$	$\mu=0.2 + m=0.35$	
9mm	4.47	5.512	7.093	3.182	4.153	6.576	3.138	4.098	6.524	1.57
12mm	6.757	7.796	9.904	5.318	6.435	9.181	5.241	6.361	8.99	4.73
15mm	9.084	10.12	12.407	7.629	8.763	11.692	7.54	8.702	11.354	7.23
18mm	11.393	12.451	14.76	9.973	11.085	14.006	9.877	11.03	13.696	8.46

Табела 5. Димензија  $h1$  при употреби матрице са углом конуса од  $90^\circ$

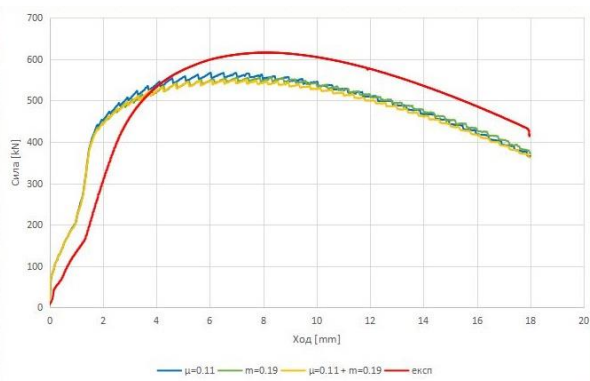
Ход	$h1$									Експ.
	$\mu=0.08$	$\mu=0.11$	$\mu=0.2$	$m=0.14$	$m=0.19$	$m=0.35$	$\mu=0.08 + m=0.14$	$\mu=0.11 + m=0.19$	$\mu=0.2 + m=0.35$	
9mm	7.717	8.002	8.304	7.562	7.888	8.286	7.496	7.8	8.246	9.39
12mm	10.336	10.682	11.144	10.156	10.542	11.104	10.068	10.434	11.018	12.14
15mm	12.95	13.341	13.892	12.796	13.228	13.952	12.673	13.074	13.73	14.07
18mm	15.575	15.96	16.648	15.447	15.903	16.82	15.299	15.71	16.465	15.46

Најприближнији резултати сила ход дијаграма су добијени коришћењем Кулоновог модела за вредност коефицијента трења  $\mu=0,08$ , модела константног трења за вредност фактора трења  $m=0,19$  и коришћењем комбинованог модела за вредности  $\mu=0,11$  и  $m=0,19$ . Уз то да је приликом употребе константног и комбинованог модела дошло до скоро идентичних криви.

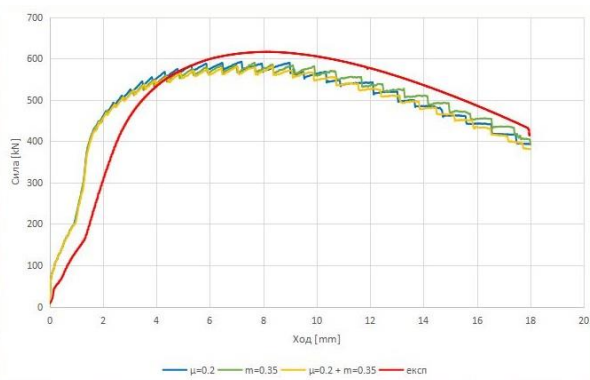
На сликама 5, 6 и 7 су приказани дијаграми сила ход за различите моделе трења при ходу алата од 18mm у матрици са углом од  $90^\circ$ .



Слика 5. Сила ход дијаграм за најниже вредности фактора/коефицијента трења у матрици од  $90^\circ$



Слика 6. Сила ход дијаграм за средње вредности фактора/коефицијента трења у матрици од  $90^\circ$



Слика 7. Сила ход дијаграм за највише вредности фактора/коефицијента трења у матрици од  $90^\circ$

Код матрице са углом конуса од  $90^\circ$  видимо да се приликом коришћења еквивалентних коефицијената и фактора трења добијају веома слични дијаграми сила-ход.

Најприближније вредности су добијене коришћењем највиших вредности коефицијента/фактора трења.

## 7. ЗАКЉУЧАК

Моделу су се при еквивалентним вредностима фактора и коефицијента генерално понашали уједначено. Уочена већа одступања могу бити услед одступања модела од реалних услова експеримента.

Што се тиче димензионих карактеристика, приликом испитивања је уочено да најрелевантније резултате пружа комбиновани модел. Модел константног трења је дао нешто мању тачност у односу на њега, док су коришћењем Кулоновог модела уочена највећа одступања. Најбоља поклапања су добијена приликом коришћења комбинованог модела трења за вредности фактора и коефицијента трења  $\mu=0,08 + m=0,14$ .

Током испитивања дијаграма сила-ход видимо да су се у матрици од  $30^\circ$  тачније показале ниже вредности коефицијента односно фактора трења, док је код матрице од  $90^\circ$  ситуација супротна.

## 8. ЛИТЕРАТУРА

- [1] M. Plančak, D. Vilotić, “*Tehnologija plastičnog deformisanja*”, Novi Sad, Fakultet tehničkih nauka, 2012.
- [2] M. Plančak, Z. Car, M. Kršulja, D. Vilotić, I. Kačmarčik, D. Movrin, “*Possibilities to Measure Contact Friction in Bulk Metal Forming*”, Technical Gazette, 19(4), pp.727–734, 2012.
- [3] Đ. Čupković, M. Plančak, D. Vilotić, K. Kuzman, “*Utjecaj kontaktnog trenja na proces dvostrukog suprotnosmernog istiskivanja.*”, Kragujevac Srbija i Crna gora, YUTRIB’05 9ta jugoslovenska konferencija o tribologiji, 2005.
- [4] V. Mandić, “*Fizičko i numeričko modeliranje procesa obrade deformisanjem*”, Kragujevac, Fakultet inženjerskih nauka, 2012.
- [5] V. Vujović, “*Obrada deformisanjem u mašinstvu: I deo*”, Novi Sad, Fakultet tehničkih nauka, 1990.
- [6] S:S. Rao, “*The Finite Element Method in Engineering*”, Elsevier, 2011.
- [7] F. Klocke, “*Manufacturing Processes 4 Forming*”, Berlin, Heidelberg Springer, 2013.
- [8] D. Čizmić, “*Istraživanje toka materijala pri kombinovanom istiskivanju u funkciji geometrije matrice*”, Novi Sad, Fakultet tehničkih nauka, Master rad 2014.

### Кратка биографија:



**Балша Дачевић** рођен је у Новом Саду 1996. год. Основне студије завршио је на Факултету техничких наука 2019. године. Мастер студије уписује исте године на Факултету техничких наука у Новом Саду на департману за производно машинство, смер Савремене технологије обликовања материјала. Тренутно је запослен у Hillmeg Engineering-у на позицији конструктора кочионих система за лучке кранове.  
контакт: bdacevic96@gmail.com