

КРАЙНО-ЕЛЕМЕНТНО МОДЕЛИРАНЕ НА ДЪЛБОЧИНАТА НА УЯКЧЕНИЯ СЛОЙ ПРИ ПРОЦЕСА ППД ЧРЕЗ СЪБИРАНЕ НА ВЪРТЕНИЯ ОКОЛО КРЪСТОСАНИ ОСИ

FINITE ELEMENT MODELING THE HARDENING LAYER DEPTH IN BURNISHING PROCESS BY ADDING ROTATIONS AROUND CROSSING AXES

Г. В. Дунчева¹, К. К. Крумов², И. М. Амуджев¹, Т. В. Кузманов²

¹Технически университет - Габрово

²Технически университет – София, филиал Пловдив

Abstract

The paper presents the outcomes from numerical investigations by means of the finite element method of the burnishing process of external cylindrical surfaces in an aspect of microhardness obtained. A numerical experimental design has been conducted. The objective functions are the superficial microhardness and the hardening depth. The governing parameters are: burnishing force, burnishing feed rate, toroidal surface radius of the deforming roller. An optimal second order plan has been used. The mathematical models have been obtained by means of a regresional analysis.

Keywords: burnishing, microhardness, FE analysis.

ВЪВЕДЕНИЕ

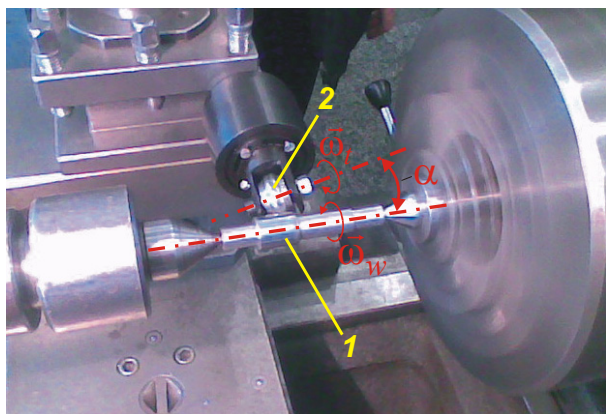
Комплексът от характеристики (микро- и макрогеометрия, микротвърдост, остатъчни напрежения, микроструктура и др.), определящ състоянието на повърхностния слой, е известен в литературата като “surface integrity” (SI) [1]. Качеството на повърхностните слоеве пряко определя експлоатационните им свойства, а чрез тях има решаващо значение за работоспособността, срока на експлоатация и сигурността на конструкционните елементи. Работоспособността на конструкционните елементи с външни цилиндрични повърхнини се определя или от якостта им на умора (при циклично натоварване) или от тяхната износоустойчивост (експлоатацията им е свързана с относително движение по работните им цилиндрични повърхнини). И в двата случая е в сила тезата за решаващото значение на състоянието на повърхностния слой, респ. SI. За конкретен материал SI зависи от технологичния процес на изработване и сглобяване, а в най-голяма степен – от вида на механич-

ното въздействие при довършващото обработване – чрез рязане или повърхностно пластично деформиране (ППД). Предимствата на ППД по отношение на качеството на получавания повърхностен слой са установени от много автори [2-7]. Постига се повишена микротвърдост, по-голяма дълбочина на уякчения слой и остатъчни напрежения на натиск.

Един от най-малко изследваните методи за обработване чрез ППД на външни цилиндрични повърхнини е обтъркаване с плъзгане в тангенциално и осово направление. От гледна точка на кинематика на идеално твърдо тяло, последният метод се реализира като движението на ролката по отношение на заготовката е суперпозиция от събиране на въртения около кръстосани оси и трансляция по направление на оста на заготовката [8].

Кинематиката на процеса ППД чрез събиране на въртения около кръстосани оси схематично е показана на фиг. 1. Заготовката 1 получава въртене около неподвижната

си ос с ъглова скорост $\vec{\omega}_w$ от патронника на струга. Деформиращата ролка 2, имаща то-роидална работна повърхнина, се притиска към обработваната заготовка посредством еластична система и получава въртене около неподвижната си ос с ъглова скорост $\vec{\omega}_l$. Осите на ролката и заготовката са кръстосани под ъгъл α . В контактната точка O на ролката и заготовката се получава релативна линейна скорост $\vec{v}_O^r$, която при отсъствие на подавателно движение се явява скорост на деформиране. Ако на системата заготовка-ролка се предаде ъглова скорост $-\vec{\omega}_w$, то движението на ролката около неподвижната заготовка е събиране на въртения около кръстосани оси. Кинематичната схема на метода представлява модификация на синтезираните в [9] схеми.



Фиг. 1. Същност на процеса

Изменението на повърхностната микротвърдост, следствие на механично въздействие, се дължи на уякчаване на материала, настъпващо след провлачването му. Провлачването се характеризира с наличие на пластична деформация. Предвид факта, че дори за едномерно напрегнато състояние деформираното състояние е тримерно, провлачването се характеризира с еквивалентна пластична деформация [10]. Следователно съществува пряка корелация между еквивалентната пластична деформация и микротвърдостта. На тази база е приложен следният комбиниран подход за изследване на микротвърдостта и дълбочината на уякчаване на външни цилиндрични повърхнини, подложени на ППД посредством събиране на въртения около пресичащи се оси:

- Етап I: По експериментален път, на базата на планиран експеримент, се измерва микротвърдостта на обработени външни цилиндрични повърхнини. По този начин се получава информация в количествен аспект за качеството на обработената повърхнина от гледна точка “микротвърдост на повърхностния слой”. Получените резултати са показани в [11].

- Етап II: На базата на разработения в [8] крайно-елементен модел на процеса се извършва числено моделиране на еквивалентната пластична деформация на повърхностния слой и на дълбочината на уякчения слой – слой с еквивалентна пластична деформация. По този начин се получава информация в качествен и количествен аспект за качеството на обработената повърхнина от гледна точка, съответно “микротвърдост на повърхността и в дълбочина” и “дълбочина на уякчения слой”.

Обект на настоящата работа е втория етап като обработваните заготовки са от стомана 40X.

ИЗЛОЖЕНИЕ

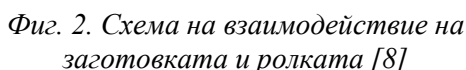
➤ КЕ модел

Използван е КЕ модел, разработен в [8]. Моделът на взаимодействие между деформиращата ролка и заготовката е следният: равнинно деформирано състояние на частта от заготовката, намираща се в непосредствена близост с ролката, като последната упражнява радиален натиск върху заготовката до достигане на необходимата дълбочина на проникване, след което се изтегля радиално в обратната посока, премества се по оста на заготовката на разстояние f (осовото подаване) и цикълът се повтаря. Моделирана е област от заготовката с размери $7 \times 6 \text{ mm}$ (фиг. 2).

КЕ модел е показан на фиг. 3. Използвани са равнинно деформирани четириъгълни крайни елементи тип CPE4R. Конститутивният модел на материала е [8]:

$$\sigma = 475(1 + 421\varepsilon_p)^{0.2}, \quad (1)$$

където ε_p е пластична деформация.



➤ План на числения експеримент

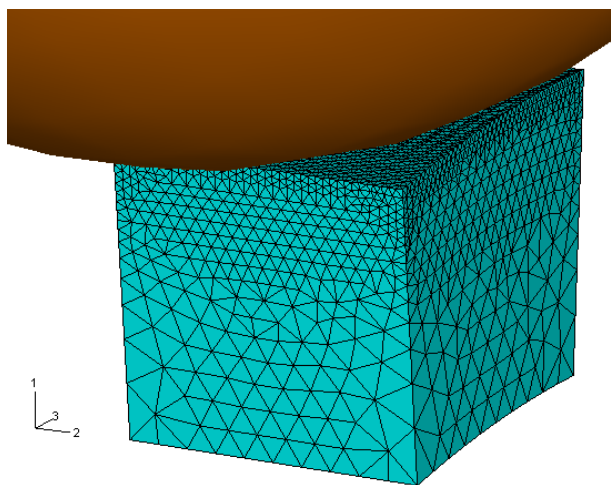
Извършен е планиран числен (посредством КЕ симулации) експеримент с три фактора: радиус на закръгление на ролката r , сила на притискане F_b и подаване f . Използван е КЕ модел от т. 2. Предвид спецификата на КЕ модел и тежестта на отделните фактори, ъгълът на кръстосване между осите α , честотата на въртене на заготовката n_w , началната грапавост R_a^{init} и броят на преходите N не са взети под внимание. Нивата на вариране на избраните управляващи фактори са посочени в табл. 1 и са избрани в по-широки граници в сравнение с натурните експерименти за грапавостта и микротвърдостта с оглед разширяване на интервала на валидност на получения модел. Целевите функции са еквивалентната пластична деформация в повърхностния слой $Y_{\varepsilon_p^{екв}}$, % и дълбочината на уякчения слой $Y_{d_{\varepsilon_p^{екв}}}$.

Управляващи фактори		Нива на факторите		
		кодирани		
		-1	0	+1
Натурални	Кодирани	натурални		
Радиус на закръгление на ролката r , mm	x_1	2	9	16
Сила на притискане на ролката към заготовката F_b , N	x_2	100	400	700
Подаване f , $mm / об$	x_3	0.02	0.11	0.2

F_b, N	Дълбочина на проникване d_p, mm		
	$r = 2, mm$	$r = 9, mm$	$r = 16, mm$
100	0.0049606	0.0039485	0.00295299
400	0.0127936	0.00769385	0.00661899
700	0.0206266	0.01169285	0.01028499

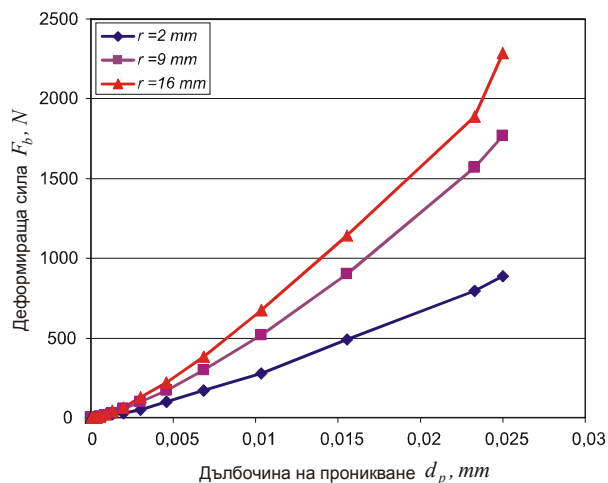
Зависимостта на силата на притискане F_b от дълбочината на проникване d_p е намерена посредством КЕ симулация с 3D КЕ модел, разработен в [8]. Показан е на фиг. 4. Деформиращата тороидална ролка е моделирана като идеално твърдо тяло с диаметър $d_r = 20\text{ mm}$ и радиус на закръгление $R = 3\text{ mm}$. От заготовката, започвайки от повърхностния слой, е изрязано тяло с размери $2 \times 2 \times 2\text{ mm}$. Оста 2 е ос на заготовката. Началните микрограпавини на повърхностния слой имат стъпка 0.1 mm и височина $R_z = 6\text{ }\mu\text{m}$. Тялото е изрязано посредством цилиндрична повърхнина и две двойки успоредни равнини. Моделираната част от заготовката е дискретизирана с 31948 тетрахедрални КЕ тип C3D4 за повърхностния слой с дебелина 0.5 mm и 11590 тетрахедрални КЕ от същия тип за основния материал. Материалът на заготовката е с конститутивни модели както следва: за повърхностния слой – зависимост (1), а за основния материал – зависимостта $\sigma - \varepsilon$ от едномерен тест на чист опън. Дефинирано е изотропно уякчаване.

Зададено е преместване на инструмента чрез RP, а резултатът е търсен като реакция в същата точка. Тази реакция съответства на силата F_b , а преместването – на дълбочината на проникване d_p . Между деформиращата ролка и заготовката е дефиниран нормален контакт с възможност за отделяне и тангенциален контакт без триене.



Фиг. 4. 3D КЕ модел [8]

Резултатите са показани на фиг. 5. Дълбочината на проникване в експерименталните точки е показана в табл. 2.

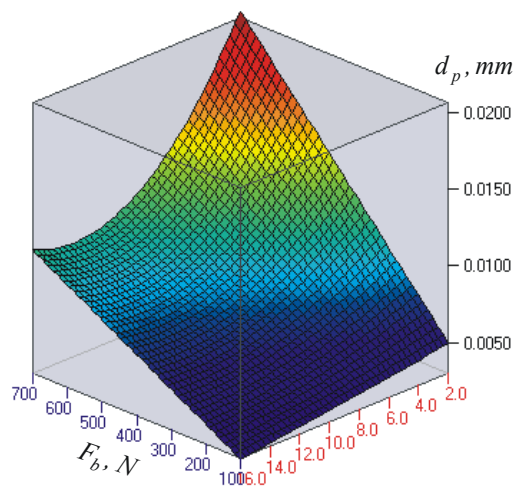


Фиг. 5. Зависимостта на силата на притискане F_b от дълбочината на проникване d_p

На базата на получените в табл. 2. резултати от КЕ симулации е проведен регресионен анализ посредством QStatLab с цел получаване на математични модели $d_p = d_p(r, F_b)$ и $F_b = F_b(d_p, r)$. Последните са във вид на двумерни полиноми:

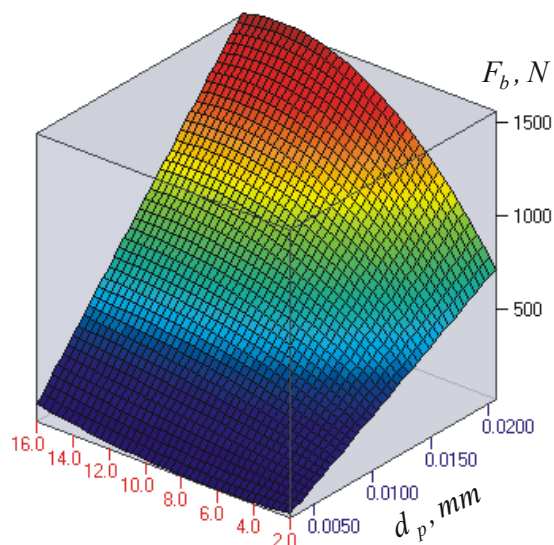
$$d_p = 0.00206233 + 0.00016711r + 0.00003218F_b - 0.00001174r^2 - 0.00000329rF_b + 0.00000013r^2F_b \quad (2)$$

$$F_b = -42.363228r + 18809.273d_p + 2.1022337r^2 + 10088.285rd_p - 385.31712r^2d_p \quad (3)$$



Фиг. 6. Тримерна графика на функцията $d_p = d_p(r, F_b)$

Графична интерпретация на получените полиномни модели във вид на тримерна графика е показана на фиг. 6 и фиг. 7.



Фиг. 7. Тримерна графика на функцията $F_b = F_b(d_p, r)$

• План на числения експеримент

Избран е оптимален композиционен план, показан в табл. 3.

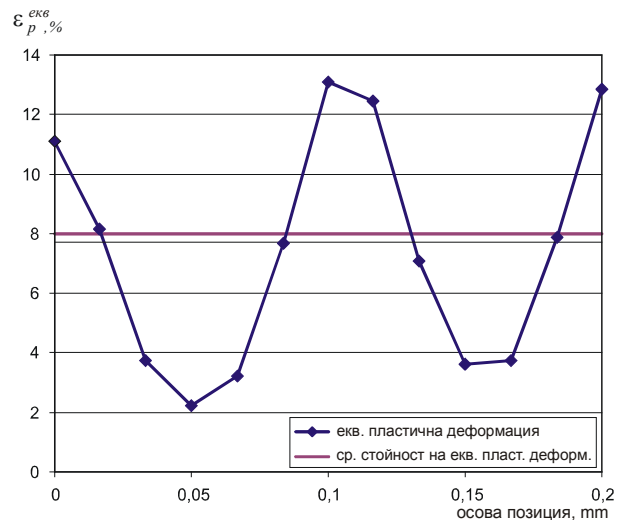
Табл. 3 Експериментален план

№	x_1	x_2	x_3	$Y_{\varepsilon_p^{екв}}, \%$	$Y_{d_{\varepsilon_p^{екв}}}, mm$
1	-1	-1	-1	7.72	0.1335
2	1	-1	-1	3.18	0.0509
3	-1	1	-1	12.7	0.96
4	1	1	-1	6.51	0.62
5	-1	-1	1	4.67	0.1163
6	1	-1	1	2.57	0.05
7	-1	1	1	15	1.23
8	1	1	1	6.4	0.65
9	-1	0	0	11.85	0.8
10	1	0	0	5.6	0.0997
11	0	-1	0	3.6	0.099
12	0	1	0	7.85	0.86
13	0	0	-1	6.95	0.348
14	0	0	1	6.6	0.34

• Числени резултати от КЕ анализ

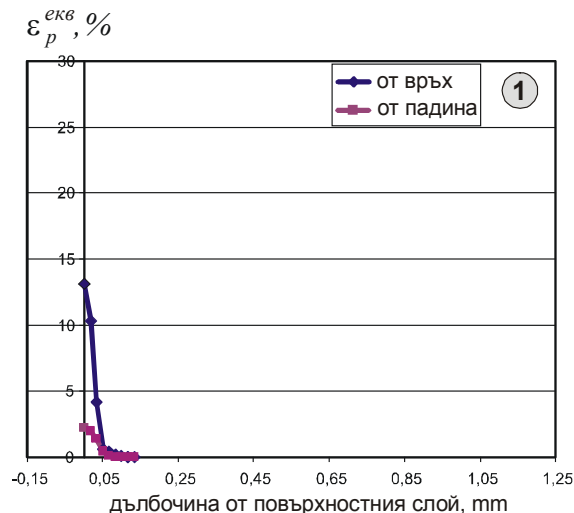
Числените резултати са взети по следния начин: разпределението на еквивалентната пластична деформация е отчетено по повърхностния слой между три съседни върха и две падина от теоретичния профил на началната грапавост от средата на повърх-

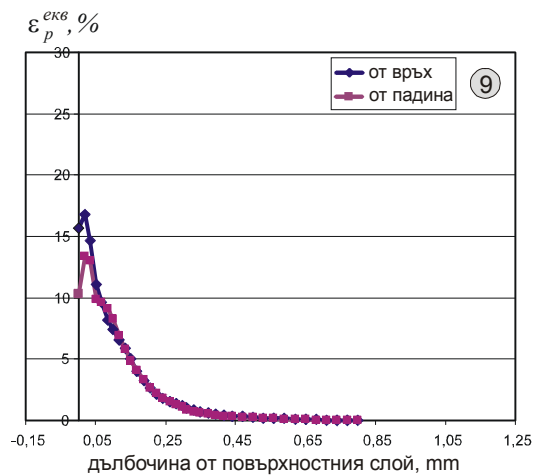
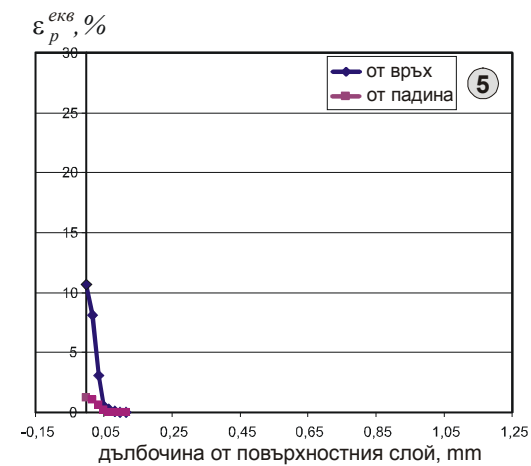
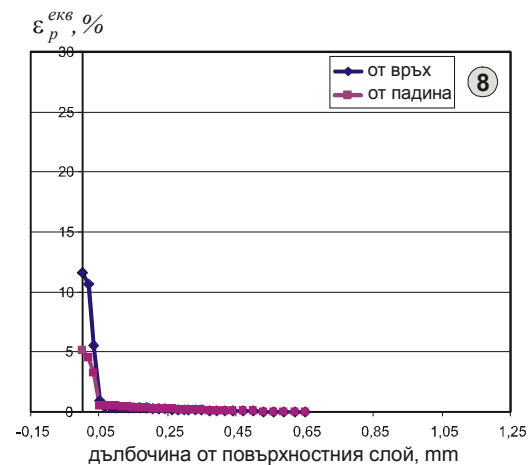
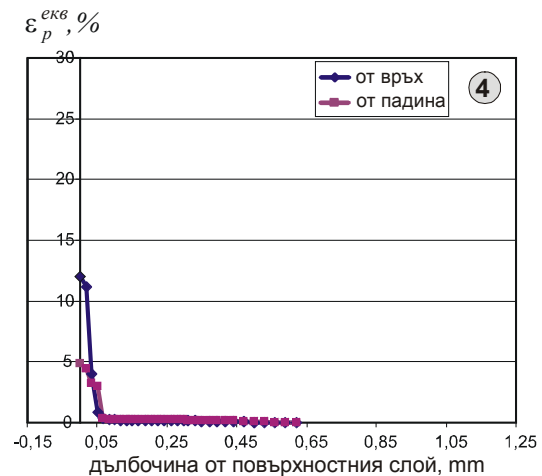
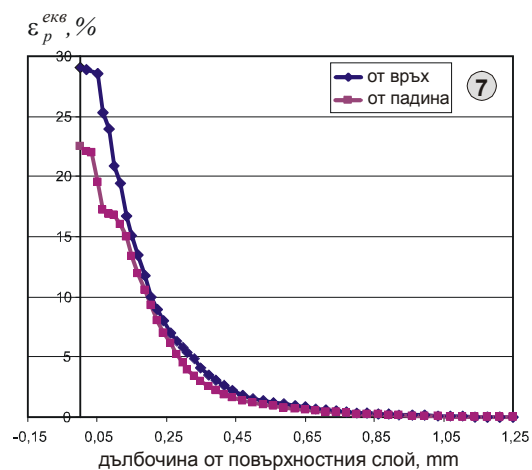
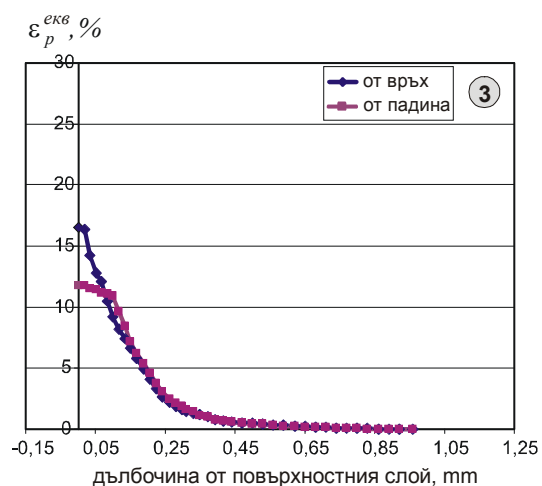
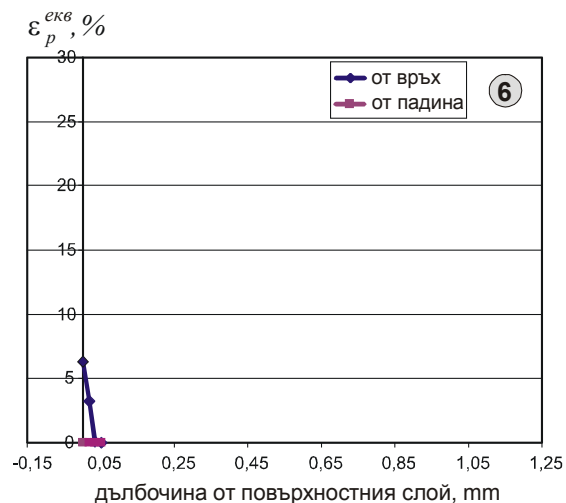
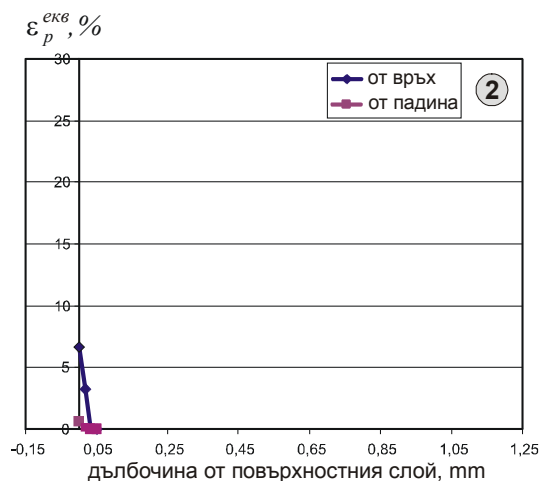
ностния слой. Примерно разпределение за първата експериментална точка е показано на фиг. 8. Като краен резултат за целевата функция $Y_{\varepsilon_p^{екв}}, \%$ е взето средното аритметично. Резултатите за $Y_{\varepsilon_p^{екв}}$ са показани в табл. 3.

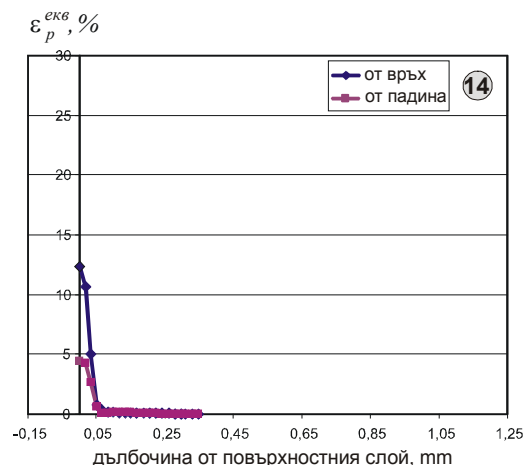
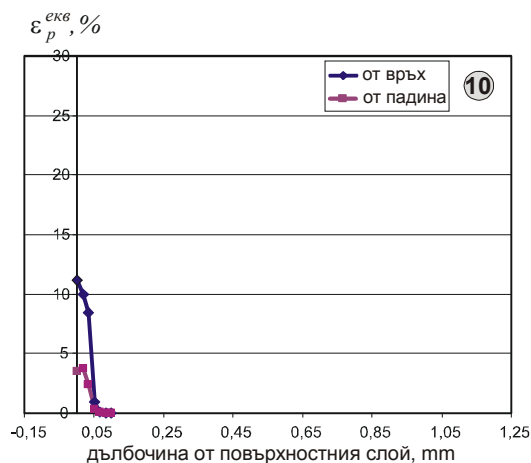


Фиг. 8. Разпределение на еквивалентната пластична деформация между три съседни върха

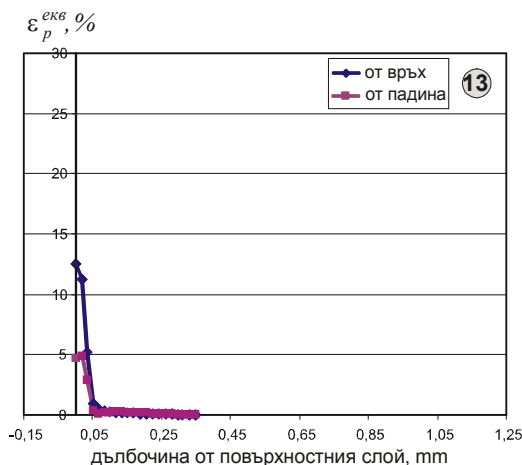
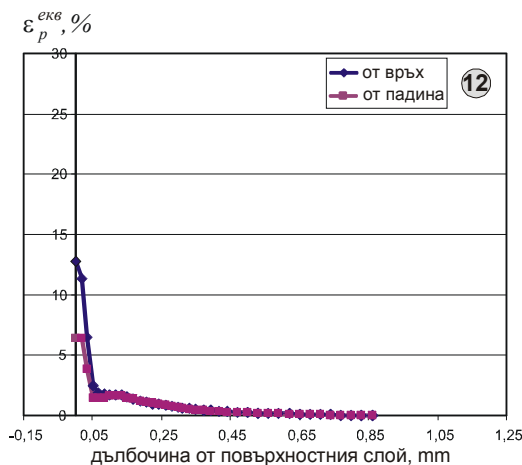
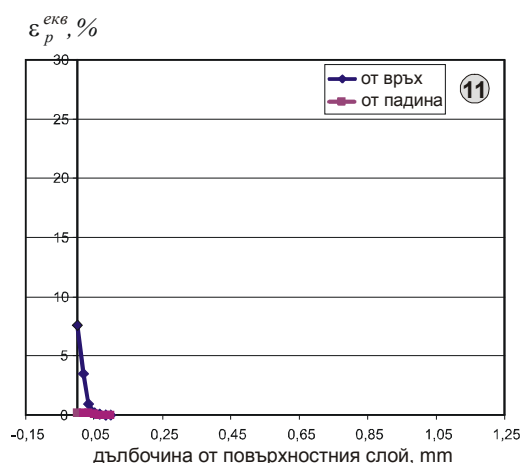
Разработеният подход за определяне на микротвърдостта позволява същата да бъде намерена в дълбочина от повърхностния слой. За 14-те комбинации от фактори от табл. 3, е показано разпределението на еквивалентната пластична деформация в дълбочина от повърхностния слой (фиг. 9). Резултатите са отчетени от връх и от съседна падина в дълбочина. В табл. 3 са показани дълбочините на уякчаване за всяка комбинация.







Фиг. 9. Разпределение на еквивалентната пластична деформация (уякчен слой) в дълбочина



• Регресионни математични модели на еквивалентната пластична деформация и дълбочината на уякчения слой

Регресионният анализ е извършен с QStatLab. Моделите са адекватни и всички коефициенти са значими. Максималната абсолютна грешка е 0.007%. Получените регресионни модели имат следния вид:

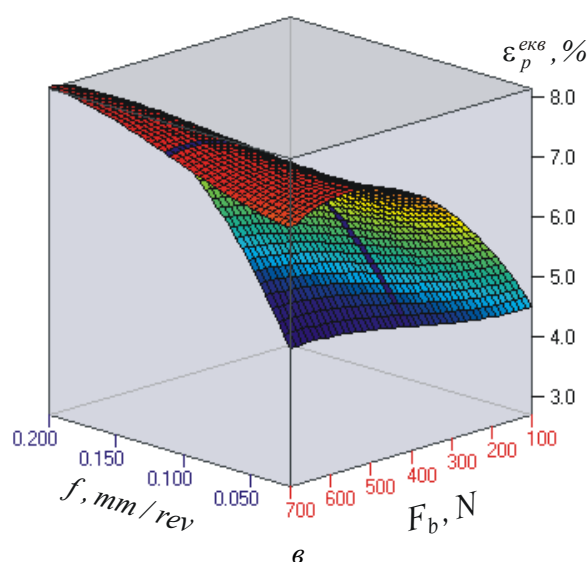
$$Y_{\varepsilon_p^{\text{екв}}} = 6.775 - 3.2x_1 + 2x_2 + 2.025x_1^2 - 1.175x_2^2 - 0.182x_3^2 - 1.019x_1x_2 + 0.731x_2x_3 + 0.809x_1^2x_2 + 0.521x_1x_2^2 - 0.606x_1x_2x_3 - 0.281x_1^2x_3^2 \quad (4)$$

$$Y_{d_{\varepsilon_p^{\text{екв}}}} = 0.454 - 0.35x_1 + 0.387x_2 - 0.096x_1x_2 + 0.04x_2^3x_3 + 0.217x_1x_2^2 \quad (5)$$

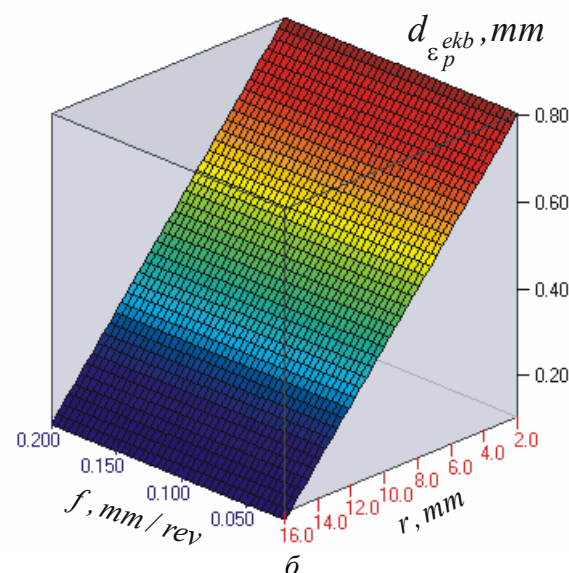
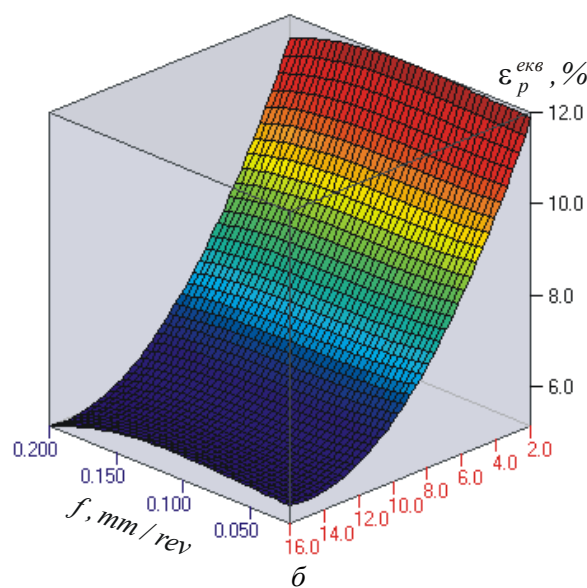
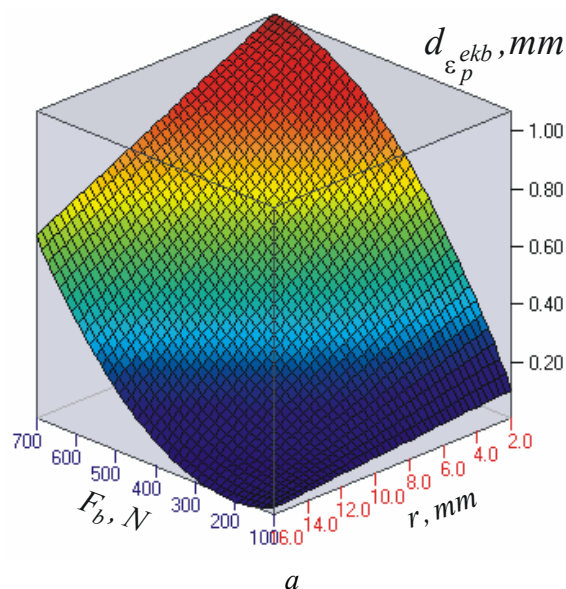
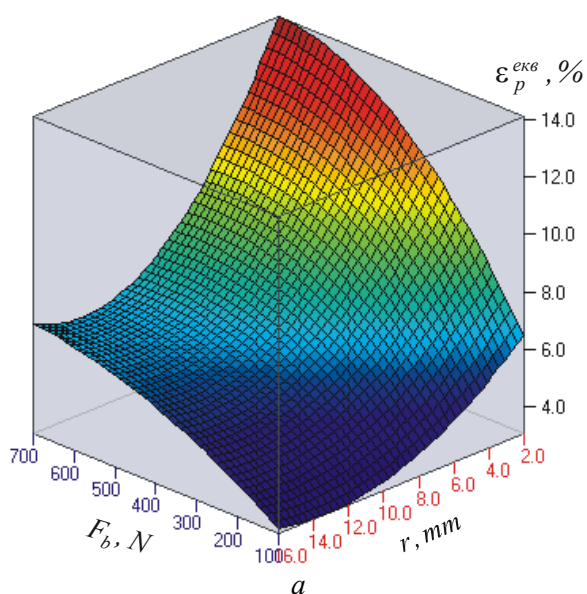
• Анализ на регресионните модели на еквивалентната пластична деформация и дълбочината на уякчения слой

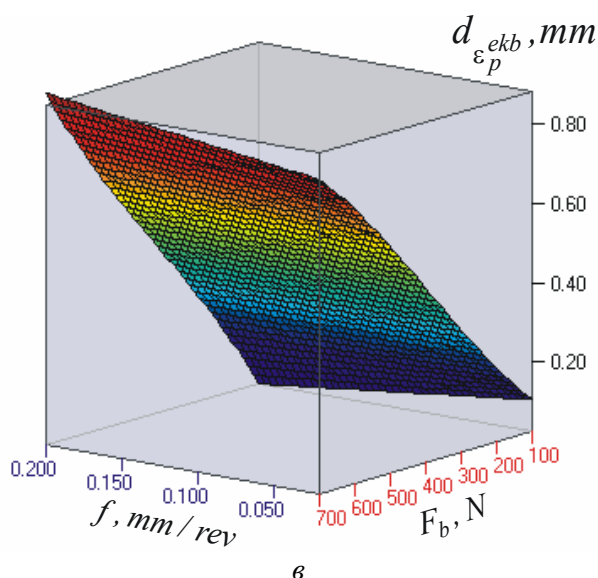
На фиг. 10 и фиг. 11 са показани примерни графики на моделите, съответно (4) и (5), на еквивалентната пластична деформация и дълбочината на уякчения слой. На всяка от графиките третият фактор е поддържан на средно ниво. От трите фактора, най-слабо е влиянието на подаването f . Другите два фактора, радиуса на закръгление r на инструмента и силата на притискане F_b , оказват силно и относително равностойно влияние върху $\varepsilon_p^{\text{екв}}$ и $d_{\varepsilon_p^{\text{екв}}}$. Последните се увеличават значително с нама-

ляване на r и увеличаване на F_b . За всички стойности на r от интервала му на вариране, с увеличаване на подаването f незначително намалява $\varepsilon_p^{екв}$, а дълбочината на уякчения слой $d_{\varepsilon_p^{екв}}$ не се променя. Корелацията между подаването f и силата на притискане F_b е по-различна. За малки стойности на F_b , с намаляването на подаването се увеличават $\varepsilon_p^{екв}$ и $d_{\varepsilon_p^{екв}}$. Обратно, за големи стойности на силата на притискане, с намаляване на подаването f се намаляват $\varepsilon_p^{екв}$ и $d_{\varepsilon_p^{екв}}$.



Фиг. 10. Примерни графики на функцията на еквивалентната пластична деформация $\varepsilon_p^{екв}$ по повърхностния слой





Фиг. 11. Тримерни графики на функцията на дълбочината на уячения слой $d_{\varepsilon_p}^{ekb}$

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Sartkulvanich P., Altan T., Jasso F., Rodriguez C. Finite element modeling of hard roller burnishing: an analysis on the effects of process parameters upon surface finish and residual stresses. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 129 (4) (2007) 705-716.
- [2] El-Axir M. H., 2000. An investigation into roller burnishing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 40(11) 1603-1617.
- [3] Jujerm, P., Altenberger, I., 2007. Fatigue performance enhancement of steel using mechanical surface treatment. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 17(1), 59-65.
- [4] Klocke F., J. Liermann, 1998. Roller burnishing of hard turned surfaces, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38 (5-6) 419-423.
- [5] Maximov J. T., Kuzmanov T. V., Duncheva G. V., Ganev N., 2009b. Spherical motion burnishing implemented on lathes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49 (11) (2009) 824-831.
- [6] Shiou F. J., Hsu C. C., 2008. Surface finishing of hardened and tempered stainless tool steel using sequential ball grinding, ball burnishing and ball polishing processes on a machining centre. *Journal of Materials Processing Technology* 205 (1-3) 249-258.
- [7] Shiou, F. J., Ciou, H. S., 2008. Ultra-precision surface finish of the hardened stainless mold steel using vibration-assisted ball polishing process. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 48 (7), 721-732.
- [8] Дунчева Г. В., Крумов К. К., Максимов Й. Т., Рашев Г. Е. Крайно-елементна симулация на остатъчните напрежения в повърхностния слой на заготовки, подложени на ППД. *Известия на ТУ Габрово* 38 (2009) 41-51.
- [9] Maximov JT. Forming of Cross-profile Holes by Adding Rotations round Coplanar Axes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42 (3) (2002) 313-320.
- [10] Максимов Й. Т. Съпротивление на МАтериалите. ЕКС-ПРЕС, Габрово, 2009.
- [11] Амуджев И. М., Крумов К. К., Кузманов Т. В. Моделиране на получаваната микротвърдост при процеса ППД чрез събиране на въртения около кръстосани оси. Трета национална конференция по машиностроене и машинознание, 8-10 септември, Варна, 2010
- [12] Maximov JT, Duncheva GV. A new 3D finite element model of the spherical mandrelling process. *Finite Elements in Analysis and Design* 44 (6-7) (2008) 372-382.
- [13] Maximov JT, Duncheva GV, Ganev N, Bakalova TN. The benefit from adequate finite element simulation of the cold hole expansion process. *Engineering Failure Analysis* 16 (1) (2009) 503-511.