



Р а з д е л 1
МАШИНОСТРОЕНИЕ

Section 1
MECHANICAL ENGINEERING

**СИНТЕЗ И АНАЛИЗ НА МЕТОДИ ЗА ДОВЪРШВАЩО ОБРАБОТВАНЕ НА ОТВОРИ
ЧРЕЗ ППД ВЪЗ ОСНОВА НА ДИФЕРЕНЦИАЛНО-МОРФОЛОГИЧНИЯ МЕТОД**

**SYNTHESIS AND ANALYSIS OF METHODS FOR FINISHING MACHINING OF HOLES BY
SURFACE PLASTIC DEFORMATION WITH APPLICATION OF DIFFERENTIAL
MORPHOLOGICAL METHOD**

Милка Г. Атанасова*

*Катедра "Машиностроителна техника и технологии"
Технически Университет - Габрово*

Статията е постъпила на 4 септември 2013 г.; приета за отпечатване на 9 октомври 2013 г.

Abstract

The differential-morphological method has been applied for analysis and synthesis of methods for finishing machining of holes by burnishing. According to the specific kinematics Spherical Mandrelling Process is selected whereby achieving complete raising of the parameters of the surface layer: roughness, dimensional accuracy and shape of the hole, microhardness and residual stresses.

Keywords: burnishing; differential-morphological method, spherical motion burnishing

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Обработването чрез повърхностно пластично деформиране (ППД) намира все по-широко разпространение от методите за довършващо обработване на метали чрез рязане (шлифване, хонинговане и др.). При него се наблюдава подобряване на релефа и намаляване грапавостта на повърхнините; постига се по-добра точност на формата и параметрите на вълнообразността; уякчаване както на повърхността, така и в дълбочина; висока производителност и т.н. Уякчаването на повърхностният слой на полученият детайл води до повишаване на неговата износ- и корозоустойчивост. Ето защо, в практиката методите за ППД често се прилагат за повишаване дълготрайността и сигурността при експлоатация на детайлите, работещи при променливо натоварване [1].

За качеството на получените отвори след обработване се съди по строежа и структурата на повърхностният слой, който се характеризира с комплекс от характеристики известен в литературата под обобщеното наименование "surface integrity" (SI).

Повишените изисквания към обработваните детайли в практиката води до създамата се необходимост от на-

миране на нови творчески решения при методите за довършващо обработване на отвори посредством ППД.

Основна цел на настоящата статия е прилагането на диференциално- морфологичният метод за синтезиране и анализ на съществуващите методи и възможност за създаване или усъвършенстване на такава, покриваща изискванията на съвременното машиностроение.

2. ОПИСАТЕЛНА МОРФОЛОГИЧНА МАТРИЦА

В съответствие с диференциално- морфологичният метод (ДММ) е необходимо създаване на описателна морфологична матрица (ОММ). Нейната обобщена структура се изгражда на база на морфологични признаци и техният избор е най- важният елемент при прилагане на метода [2].

Морфологичните признаци могат да се разделят на подпризнаци, характеризиращи особеностите на конкретният основен морфологичен признак. Така всяко йерархично ниво внася допълнителна характеристика по определен признак. При това всеки обект в изграденния масив може да се обозначи с цифров или буквено-цифров код, като по този начин се определя мястото му в йерархията. От една страна подобектите могат да се структурират в обща цялост, а от друга страна кодира-

* Тел.: (066 827 317); e-mail: mata_ata@abv.bg

нето разкрива възможности за синтез на методи след възможните комбинации от елементи в различните йерархични нива, както и допълване с нови [2].

В ОММ, се избират следните морфологични признака:

- кинематика на процеса (макродвижения) – *Kinematics*;
- характеристики на взаимодействията между деформиращия елемент (елементи) и заготовка – *Characteristics of interactions*;
- основни характеристики на работния процес – *Process*;
- вида на методите за ППД с оглед върху кои параметри на “*surface integrity*” (*SI*) се акцентира – *Properties*;
- използваното оборудване – *Equipment*.

ОММ (табл. 1) е изградена на база на вариантите на подпризнаците на горните основни морфологични признаци.

Тя дава възможност да се създадат матриците, означенията на елементите, които съответстват на означенията на вариантите в таблица 1:

- матрица на кинематиката (макродвиженията) на процеса (*Kinematics*):

$$M_{kin} = \begin{bmatrix} 1.1 & 1.2 & 1.3 & 1.4 & 1.5 & 1.6 & 1.7 & 1.8 & 1.9 & 1.10 & 1.11 & 1.12 \\ 2.1 & 2.2 & 2.3 & 2.4 & 2.5 & 2.6 & 2.7 & 2.8 & 2.9 & 2.10 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

- матрица на характеристиките на взаимодействията между деформиращия (те) елемент (и) (*Characteristics of interactions*):

$$M_{int} = \begin{bmatrix} 3.1 & 3.2 & 3.3 & 3.4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4.1 & 4.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5.1 & 5.2 & 5.3 & 5.4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6.1 & 6.2 & 6.3 & 6.4 & 6.5 & 6.6 & 6.7 & 6.8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 7.1 & 7.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 8.1 & 8.2 & 8.3 & 8.4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

- матрица на основните характеристики на работния процес (*Process*):

$$M_{pr} = \begin{bmatrix} 9.1 & 9.2 & 9.3 & 9.4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 10.1 & 10.2 & 10.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 11.1 & 11.2 & 11.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 12.1 & 12.2 & 12.3 & 12.4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

- матрица на вида на методите за ППД с оглед върху кои параметри на *SI* се акцентира (*Properties*):

$$M_{proroperties} = [13.1 \ 13.2 \ 13.3 \ 13.4 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

- матрица на оборудването (*Equipment*):

$$M_{equipment} = [14.1 \ 14.2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

Описателна морфологична матрица

Таблица. 1

Елем.	Kinematics (Макродвижения в системата деформиращ елемент- заготовка)											
1. Tool (деф. елем.)	1.1 Тран- слация по оста на отвора и напречно на него	1.2 Проста ротация	1.3 Рота- ции около усп. оси	1.4 Ротации около прес. се под ъгъл оси	1.5 Рота- ции около кръст. оси	1.6 Транс. и проста рота- ция	1.7 Транс. и ро- та-ции около усп. оси	1.8 Транс. и ротации около прес. се оси	1.9 Транс. и ротации около кръст. оси	1.10 Вибра- ционно, циклично с ултра- звук	1.11 По- слу- чаен закон	1.12 Не- под- ви- жен
2. Workpiece (заготовка)	2.1 Тран- слация	2.2 Проста ротация	2.3 Рота- ции око- ло усп. оси	2.4 Ротации около прес. се оси	2.5 Ротации около кръст. оси	2.6 Транс. и проста ротация	2.7 Транс. и ротации около усп. оси	2.8 Транс. и ротации около прес. се оси	2.9 Транс. и ротации около кръст. оси	2.10 Непо- движна		
Елем.	Characteristics of interactions (Характеристики на взаимодействията)											
3. Геометрия на кон- такта	3.1 Точка	3.2 Линия	3.3 Повър- хнина	3.4 Обемен								
4. Контакт в напречно сечение	4.1 Пре- къснат	4.2 Непре- къснат										
5. Взаимо- действие	5.1 При търкаляне	5.2 При плъзгане	5.3 При тър- каляне и плъзгане	5.4 При удар								
6. Ф-ма на деф. еле- мент	6.1 Сферична	6.2 Цилин- дрична	6.3 Конусна	6.4 Бъчво- образна	6.5 Торои- дална	6.6 Плоска Ф-ма	6.7 Дискови	6.8 Друга ф-ма				

7. Брой де- форм. еле- менти	7.1 Един деформ. елемент	7.2 Повече от един деф. елемент										
8. Форма на отвора	8.1 Цилин- дрична	8.2 Конусна	8.3 Конусно цилиндр.	8.4 Друга ф-ма								
Елем.	Process (Основни характеристики на процеса)											
9. Метод на формо- образуване	9.1 Чрез копиране	9.2 Чрез обхож- дане	9.3 Комбина- ция от копиране и обхож- да-не	9.4 По случаен закон								
10. Схема на размеро- образуване	10.1 Нераз- мерен процес	10.2 Услов- но- разме- рен процес	10.3 Разме- рен процес									
11. Начин на прилагане на деформ. сила	11.1 Чрез елас- тична система	11.2 Чрез разме- рооб- разувана прибавка	11.3 Чрез удар									
12. Вид на деформиращото въздействие	12.1 Механично	12.2 Комбини- рано механич- но с лазер	12.3 Комбини- рано механич- но с ултразвук	12.4 Комбини- рано механич- но с течна среда								
Елем.	Properties (Вид на методи за ППД с оглед върху кои параметри на SI се акцентира)											
13. Компонен- ти на SI	13.1 Повишена грапа- вост	13.2 Повишена микро- твърдост и оста- тъчни напряже- ния	13.3 Повишена точност в разме- рите и формата	13.4 Ком- плексно пови- шаване на всички показа- тели								
Елем.	Equipment (Оборудване)											
14. Използвана машина	14.1 Върху конвенци- онална машина	14.2 Със спе- циална машина										

При комбиниране на всеки ред и колона от матриците се получават различни методи за повърхностно деформиране на отвори, но не всички от тях са реално изпълними. Някои от възможните съществуващи и прилагани в практиката методи, са дадени в таблица 2.

Кинематиката на даденият метод в комбинация с формата, геометрията и броя на деформация (те) елемент (ти) пряко определят следните морфологични признаци: метод на формообразуване, схема на размерообразуване, контакт в напречно сечение и взаимодействие на инструмента и заготовката. Тези морфологични признаци имат определящо значение за харак-

теристиките на качеството на повърхностният слой при обработваните отвори в аспект на грапавост, микротвърдост, поле на остатъчните напрежения в тях и точност на размерите.

3. МЕТОДИ ЗА ОБРАБОТВАНЕ НА ОТВОРИ ЧРЕЗ ППД- СИНТЕЗ И АНАЛИЗ

В машиностроенето и по-точно при методите за ППД, се очертават три основни тенденции за развитие. Те са насочени към модернизация на производството, внедряване на високоенергийни технологии в дребно-

серииното производство и намаляване разхода на материал и енергоемкост при обработване на детайлите, които непряко оказват влияние върху тяхната икономичност и конкурентноспособност.

В инженерната практика съществуват две групи методи за обработване на отвори посредством пластично деформиране (табл. 2):

- Методи, целящи повишаване на качеството само на повърхностния слой: заглаждане със сфери (*ball burnishing*), заглаждане с ролки (*roller burnishing*) (поз.1,табл.2), дълбоко ролкуване (*deep rolling*), елмазно заглаждане (*diamond burnishing*) (поз. 6, табл. 2) и др. Същността на тези методи се състои в повърхностно механично въздействие посредством деформиращи елементи. Целта е да се постигне минимална грапавост, повишена микротвърдост и генериране на остатъчни напрежения на натиск в повърхностния слой с оглед повишаване на срока на експлоатация и сигурността на съответното изделие. За тези методи е налице локален, и следователно, прекъснат в напречно сечение контакт между обработваната повърхнина и деформиращия елемент, което рефлектира в повишено качество на обработените повърхнини само в повърхностните слоеве, но не и в дълбочина [3- 7];

- Методи, базирани върху студено пластично деформиране на материала непосредствено около отвора.

Основно предимство на тази технология е създаване на благоприятни остатъчни напрежения на натиск на относително голяма дълбочина [8-20]. По такъв начин се акцентира върху възпрепятстване възникването и развитието на пукнатини от умора. Недостатък на методите, реализиращи тази технология (*split sleeve, split mandrel, symmetric cold expansion*), е че финалната операция е райбероване на отвора, т. е. повърхността на отвора е лишена от благоприятния ефект на ППД.

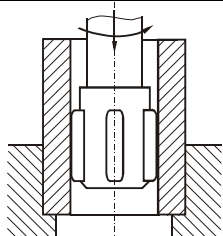
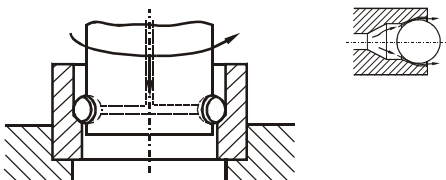
Съществуват и методи, като напр. *ултразвуково обработване (Ultrasonic machining)* (поз. 8, табл. 2) и *вибрационна ударна обработка (Shot peening)* (поз. 9, табл. 2), които използват честотни импулси или ударно въздействие с малки сфери за уякчаване на повърхностният слой и повишаване на износо- и корозоустойчивостта [21, 22].

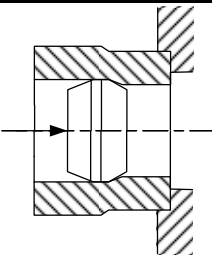
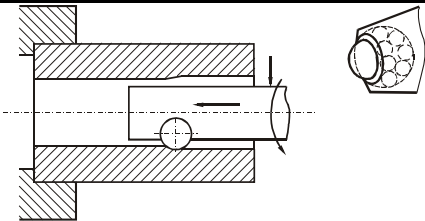
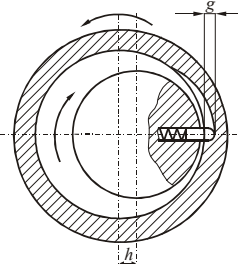
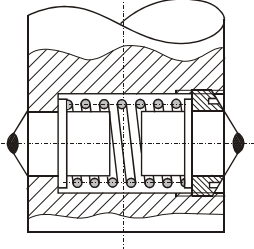
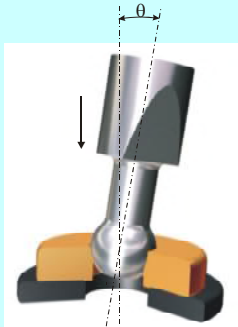
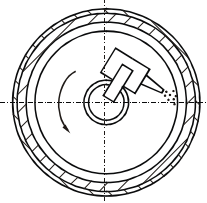
И двете групи методи са ефективни при обработване на широк клас машиностроителни материали– жилаво- пластичните материали. Такива са ниско- и средно-въглеродни стомани и цветни сплави (алуминиеви сплави, бронз, месинг), широко застъпени в сферата на точното машиностроене, металните конструкции и др.

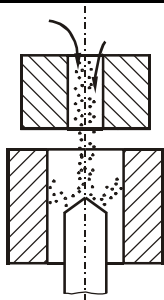
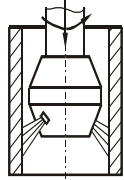
Методът “сферично дорноване” (СД) (поз. 7, табл. 2) съчетава предимствата на посочените две групи методи, като същевременно елиминира някои техни недостатъци [23-26].

Методи за получаване на отвори чрез ППД

Таблица 2

№	Наименование на метода	Комбинация на елементите на матрицата	Принципна схема
1	Обтъркаване с ролки (<i>Roller burnishing</i>), [27,28]	1.7 2.10 3.2 4.1 5.3 6.2 7.2 8.1 9.2 10.3 11.2 12.1 13.2 14.1	
		1.6 2.10 3.2 4.1 5.2 6.7 7.1 8.2 9.3 10.2 11.1 12.1 13.1 14.1	
2	Хидростатично сферично заглаждане (<i>Hydrostatic roller burnishing</i>), [27]	1.6 2.10 3.2 4.1 5.2 6.2 7.1 8.1 9.1 10.3 11.2 12.1 13.2 14.1	

3	Повърхностно дорноване, [29]	1.1 2.10 3.1 4.2 5.2 6.2 7.1 8.1 9.1 10.3 11.2 12.1 13.2 14.1	
4	Заглаждане със сфери ри (Ball burnishing), [27]	1.6 2.10 3.1 4.1 5.3 6.1 7.1 8.1 9.3 10.2 11.2 12.1 13.2 14.1	
5	(Eccentric burnishing), [7]	1.9 2.12 3.2 4.1 5.2 6.1 7.1 8.1 9.2 10.2 11.1 12.1 13.2 14.1	
6	Диамантно заглаждане (Diamond burnishing), [3]	1.1 2.2 3.1 4.1 5.2 6.1 7.2 8.1 9.1 10.1 11.1 12.1 13.2 14.1	
7	Заглаждане чрез сферично движение (Spherical motion burnishing), [23-26]	1.8 2.10 3.2 4.2 5.2 6.1 7.1 8.1 9.3 10.3 11.2 12.1 13.4 14.1	
8	ППД с ултразвук (Ultrasonic machining), [21]	1.10 2.2 3.1 4.1 5.4 6.1 7.2 8.1 9.2 10.2 11.3 12.3 13.2 14.2	

9	Вибрационна ударна обработка (<i>Shot peening</i>), [22]	1.11 2.10 3.1 4.1 5.4 6.1 7.2 8.1 9.2 10.1 11.3 12.1 13.2 14.2	
10	(<i>Water jet peening</i>), [30]	1.2 2.10 3.1 4.1 5.4 6.1 7.2 8.1 9.4 10.1 11.3 12.4 13.2 14.2	

4. СФЕРИЧНО ДОРНОВАНЕ - АЛТЕРНАТИВЕН МЕТОД ЗА ОБРАБОТВАНЕ НА ОТВОРИ ЧРЕЗ ППД

Същността на метода сферично дорноване (СД) се изразява в пластично деформиране на повърхностните слоеве на обработваният отвор. При неподвижно закрепена заготовка, инструментът извършва въртения около собствената си ос и тази на отвора, които се пресичат под ъгъл от 2° и трансляция по дължината на отвора. По този начин се осъществява непрекъснат контакт между инструмент- заготовка [23].

В следствие на тази специфична кинематика, е възможно прилагане на значително по-малка осова сила (два и повече пъти), респ. енерго-силови параметри. Това позволява да се реализира както върху конвенционални металорежещи машини, така и върху такива с ЦПУ, без да са необходими голяма първоначална инвестиция и технологично време за внедряване [4].

Анализът на основните морфологични признаци и на публикуваните до момента изследвания върху стоманени заготовки [23-26] дава основание методът СД да се определи като метод, съчетаващ предимствата на ППД технологията с тези на методите за пластично деформиране на материала непосредствено около отвора:

- Минимална грапавост, ако се използва мажещо вещество. По този начин се създават условия за възникване на естествен хидродинамичен клин, което минимизира триенето и риска от задиране.
- Създава се зона с благоприятни остатъчни напрежения на натиск, която е със значителна дълбочина (няколко милиметра).
- Получава се значително уякчаване на повърхностните слоеве на дълбочина до 1mm.

На база на метода СД, са синтезирани методи за довършващо обработване, защитени с Патенти за изобретение [31-33].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Използван е диференциално- морфологичения метод, който дава възможност да се синтезират практически реализуеми решения на методите за довършващо обработване на отвори чрез ППД.

- Отчитайки особеностите на метода СД, са постигнати повишени качествени показатели на повърхностният слой.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сучков А. Г., и др. Довършващо обработване чрез повърхностно пластично деформиране. С., Техника, 1984.
- [2] Дунчева Г., Ичкова М. Синтез и класификация на методи за създаване на натискова зона с остатъчни напрежения около скрепителни отвори с прилагане на диференциално- морфологичния метод. Международна научна конференция UNITECH' 06, Габрово, 24-25 ноември, II 146- II 152.
- [3] Korzynski, M.; Cwanek, J. Fatigue strength of chromium coated elements and possibility of its improvement with slide diamond burnishing. Surface and Coatings Technology, 203(12) (2009) 1670- 1676.
- [4] Korzynski, M.; Lubas, J.; Dubek, K. Surface layer characteristics due to slide diamond burnishing with a cylindrical- ended tool. Journal of Materials Processing Technology, 211(1) (2011) 84- 94.
- [5] Korzynski, M. Modeling and experimental validation of the force- surface roughness relation for smoothing burnishing with a spherical tool. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47(12-13) (2007) 1956- 1964.
- [6] Korzynski, M. A model of smoothing slide ball-burnishing and an analysis of the parameter interaction. J. Mater. Process. Technol. 209 (1) (2009) 625-633.
- [7] Korzynski, M. Relief making on bearing sleeve by eccentric burnishing. Journal of Materials Processing Technology. 209 (1) (2009) 131-138.
- [8] Maximov J. T., Duncheva G. V., Ganev N., Amudjev I. M. Modeling of Residual Stress Distribution around Fastener Holes in Thin Plates after Symmetric Cold Expansion. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering (DOI: 10.1007/s40430-013-0090-2).
- [9] Maximov J. T., Duncheva G. V., Amudjev I. M. A novel method and tool which enhance the Fatigue life of structural components with fastener holes. Engineering Failure Analysis, 31 (2013) 132-143.
- [10] Duncheva G. V., Maximov J. T. A new approach to enhancement of fatigue life of rail-end-bolt holes. Engineering Failure Analysis, 29 (2013) 167-179.
- [11] Maximov J. T., Duncheva G. V., Ganev N. Enhancement of fatigue life of net section in fitted bolt connections. Journal of Constructional Steel Research, 74 (2012) 37-48.
- [12] Maximov J.T., Duncheva G.V., Kuzmanov T.V. B Modeling of hardening behaviour of cold expanded holes in medium carbon steel. Journal of Constructional Steel Research, 64(3)

(2008) 261-267.

- [13] Maximov JT, Duncheva GV, Ganey N, Bakalova TN. The benefit from adequate finite element simulation of the cold hole expansion process. *Engineering Failure Analysis*, 16(1) (2009) 503-511.
- [14] Maximov J.T., Duncheva G.V., Mitev I.N. Modelling of residual stress relaxation around cold expanded holes in carbon steel. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(4) (2009) 909-917.
- [15] Gopalakrishna H. D., Murthu H. N., Krishna M., Vinod M. S., Suresh A. V. Cold expansion of holes and resulting fatigue life enhancement and residual stresses in Al 2024 T3 alloy – An experimental study. *Engineering Failure Analysis*, 17 (2010) 361-368.
- [16] Leon A. Benefits of split mandrel coldworking. *International Journal of Fatigue*, 20(1) (1998) 1-8.
- [17] Chakherlou T. N., Yaghoobi A. Numerical simulation of residual stress relaxation around a cold expanded fastener hole under longitudinal cyclic loading using different kinematic hardening models. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 33(11) (2010) 740-751.
- [18] Jang J.S., Kim D., Cho M.R. The effect of cold expansion on the fatigue life of chamfered holes. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 130(3) (2008) 031014-7.
- [19] Su M., Amrouche A., Mesmacque G., Benseddik N. Numerical study of double cold expansion of the hole at crack tip and the influence on residual stress field. *Computational Materials Science*, 41 (2008) 350-355.
- [20] Ozdemir A. T., Hermann R. Effect of expansion technique and plate thickness on near-hole residual stress and fatigue life of cold expanded holes. *Journal of Materials Science*, 34 (1999) 1243-1252.
- [21] Bozdana, A. T., Gindy, N. N. Z., Li, H. Deep cold rolling with ultrasonic vibrations– a new mechanical surface enhancement

- technique. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 45(6) (2005) 713-718.
- [22] Miao H.Y., Demers D., Larose D., Perron S., Lévesque M. Experimental study of shot peening and stress peen forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 19 (2010) 2089-2102.
- [23] Maximov J.T. Spherical Mandrelling Method Implementation on Conventional Machine Tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(12) (2002) 1315-1325.
- [24] Maximov J. T., Anchev A. P. Modelling of residual stress field in spherical mandrelling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(12) (2003) 1241-1251.
- [25] Maximov J.T., Duncheva G.V. A new 3D finite element model of the spherical Mandrelling process. *Finite Elements in Analysis and Design*, 44(6-7) (2008) 372-382.
- [26] Maximov J. T., Kalchev G. M., 2004. Modelling of spherical mandrelling manufacturing resistance. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44 (1) (2004) 95-100.
- [27] ecoroll_catalog_en_web.pdf
- [28] www.monaghanic.com
- [29] Проскуряков Ю.Г. Дорнование отверстий. М. Машгиз, 1961.
- [30] Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. (2009). Water jet peening as residual stress improvement method for alloy 600 PWSCC mitigation. *E- Journal of Advanced Maintenance*. 1(2).
- [31] Максимов Й. Т., Дунчева Г. В., Кузманов Т. В., Амуджев И. М. Метод за обработване на цилиндрични отвори. Патент за изобретение с вх. номер 110660/25.05.2010. (положително решение на Патентното ведомство от 11.09.2013)
- [32] Максимов Й. Т., Кузманов Т. В., Дунчева Г. В., Амуджев И. М. Метод и инструмент за обработване на външни цилиндрични повърхнини. Патент за изобретение BG 65819.
- [33] Maximov JT, Kuzmanov TV, Duncheva GV, Ganey N. Spherical motion burnishing implemented on lathes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49 (11) (2009) 824-83.