



ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТРИЕНЕТО ПРИ ДИАМАНТНО ЗАГЛАЖДАНЕ

EXPERIMENTAL STUDY OF THE FRICTION IN SLIDE BURNISHING

Ангел П. Анчев*

Технически Университет Габрово

Галя В. Дунчева

Технически Университет Габрово

Велизар Т. Кузманов

Технически Университет Габрово

Статията е постъпила на 14 април 2015 г.; приета за отпечатване на 30 април 2015 г.

Abstract

This article has been devoted of experimental study of the friction in the slide burnishing process when unhardened low-alloy steel is subjected to burnishing by means of synthetic diamond with spherical tip. An extended experimental design, based on an optimal composed second-order design with 24 experimental points, has been used. A regression analysis has been conducted and a model of the friction coefficient, depending on the burnishing parameters, has been obtained. The influence of the factors on the model has been studied through both analysis of variance (ANOVA) and sections of the hyper-surface of the model by hyper-planes.

Keywords: slide burnishing, slide friction, friction coefficient, experimental design.

ВЪВЕДЕНИЕ

Добре известно е, че уморната дълготрайност на металните инженерни компоненти се увеличава, когато в повърхностните им слоеве, които са най-натоварени, са въведени полезни остатъчни нормални напрежения на натиск посредством студена пластична деформация [1-3]. Един от методите, чрез които се постига ниска грапавост, повишена микротвърдост и остатъчни напрежения на натиск в повърхностните слоеве е slide diamond burnishing [4-6]. Същността на метода се заключава в еластично-пластично деформиране на повърхностния слой, следствие притискане на деформиращия елемент към заготовката под действие на нормална еластична сила, при което триенето е при плъзгане.

Увеличението на коефициента на триене при плъзгане довежда до интензивно износване и наличие на налепи по диамантния деформиращ елемент, както и до влошаване на качеството на обработената повърхнина.

Коефициентът на триене при диамантно заглаждане включва две компоненти – деформационна и адхезионна, като приносът на първата компонента съставлява $15 \div 40\%$ от пълния коефициент на триене [7]. Според [4] този коефициент при обработване на стомани е в интервала $0.02 \div 0.08$. В [8] се посочват аналогични стойности за коефициента на триене ($0.03 \div 0.08$), а според [7] интервалът на изменение е $0.03 \div 0.12$.

Съществуват емпирични зависимости за определяне на деформационната компонента при малки скорости. Според [7] тази компонента зависи от радиуса на сферичния край на деформиращия диамант и от дълбочината на проникване в заготовката, респ. от burnishing force. Адхезионната компонента не зависи от параметрите на процеса и е в интервала $0.025 \div 0.05$.

По обширни изследвания върху коефициента на триене при диамантно заглаждане са правени в Русия в

края на 20-ти век [7-9]. Обект на изследване са предимно твърди високо-легирани и високо-въглеродни стомани. Влиянието на различни параметри върху коефициента на триене е изследвано предимно по метода one-factor-at-the time.

Независимо от това, липсват регресионни модели за коефициента на триене с участието на четирите основни параметри на процеса: радиус, сила, подаване, скорост на плъзгане. Липсва също информация за коефициента на триене при обработване на релсови стомани R260 и 76.

Зависимостта на коефициента на триене от параметрите на процеса е важна в два аспекта:

- За крайно-елементни симулации на процеса диамантно заглаждане (термо-механичен проблем) с цел оптимизиране на параметрите на процеса за постигане на желано качество на обработения повърхностен слой (например остатъчни напрежения);
- За многокритериална оптимизация на процеса диамантно заглаждане, тъй като, сам по себе си, коефициентът на триене е оптимизационен критерий – с намаляване на този коефициент, качеството на обработената повърхнина се повишава. Освен това комбинацията от коефициента на триене, силата на притискане и скоростта резултира в мощност на силите на триене. Тази мощност е мярка за генерираната топлина, която (независимо от наличието на охлаждаща течност) над определена граница причинява термо-пластични деформации на обработвания повърхностен слой. Тези деформации променят разпределението на полезните остатъчни напрежения в обработения повърхностен слой в негативна посока.

В настоящата статия е направено експериментално моделиране на коефициента на триене в системата деформиращ елемент – заготовката на процеса диамантно

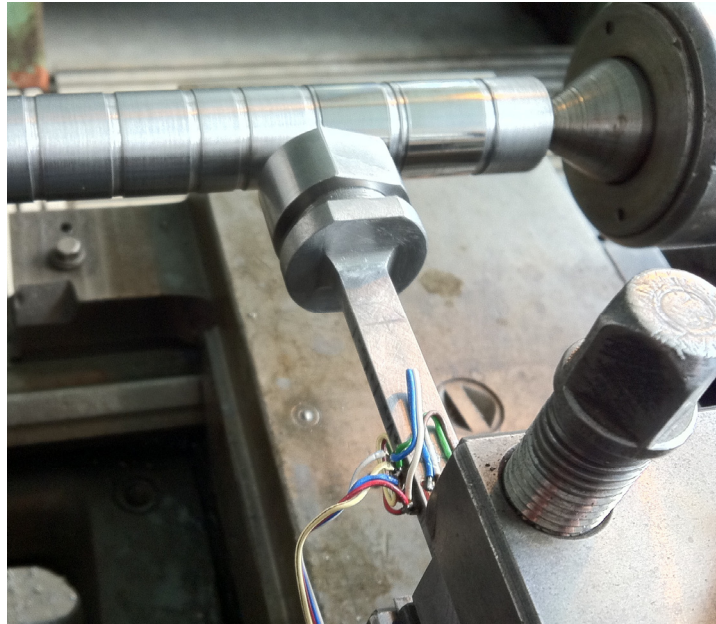
* Тел.: +35966827306; e-mail: anchev@tugab.bg

заглаждане. За целта е използвано устройството и теоретичните постановки, направени в [10]. За получаване на регресионен модел на коефициента на триене с участието на параметрите на процеса диамантно заглаждане, е синтезиран експериментален план с 55 експериментални точки. Влиянието на факторите върху коефициента на триене е установено посредством сечения на хиперповърхнината на модела на коефициента на триене с хиперравнини.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА КОЕФИЦИЕНТА НА ТРИЕНЕ

2.1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА УСТАНОВКА

Показана е на фиг. 1. Експериментът е извършен върху универсален струг С11. За измерване на провисването $w(t, \xi)$ на гредата са използвани тензодатчици



Фиг. 1. Експериментална установка за определяне на коефициента на триене при плъзгане

2.2. ПРЕДПЛАНИРАНЕ НА ЕКСПЕРИМЕНТА

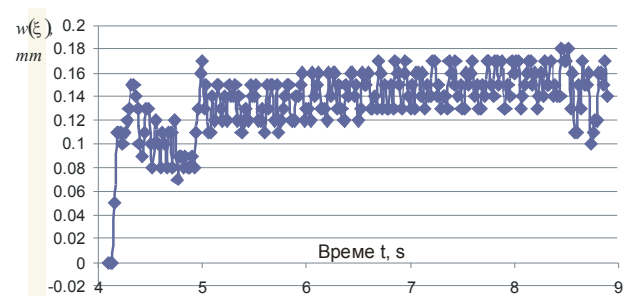
Факторите, от които зависи коефициента на триене, са:

- радиус на закръгление на сферичния диамантен връх;
- силата на притискане на диаманта към повърхнината на заготовката;
- подаване за оборот на инструмента;
- скорост на плъзгане между диаманта и заготовката.

Направено е сканиране на факторното пространство с цел получаване на предварителна информация за влиянието на факторите върху коефициента на триене. Приложен е метода one-factor-at-a-time, т.е. установено влиянието на всеки фактор поотделно, за отделни случаи, при които останалите фактори запазват постоянство – с други думи направени са някои сечения на хиперповърхнината на целевата функция (коефициентът на триене) с хиперравнини (дефинирани чрез съответните постоянни значения на останалите фактори). Тази предварителна информация е необходима за същият изследване посредством планиран експеримент.

свързани в схема пълен мост. Корелацията между измереното провисване и коефициентът на триене е получено в [10]. Схемата на свързване е избрана така, че да отчита натисковото усилие във върха на гредата и да притежава най-голяма чувствителност по отношение на приложен огъващ момент. Избрано е гъвкаво лепило, осигуряващо възможност за динамични измервания с така реализираната измервателна система. Сигналят, пропорционален на провисването, се подава на аналогов вход на USB DAQ board, откъдето постъпва в създаден виртуален инструмент, разработен чрез Labview. Основна характеристика на виртуалния инструмент е възможността да записва и визуализира в реално време измереното провисване. Честотата на семплиране (sampling frequency) на сигнала е 50 Hz, която е избрана в съответствие с теоремата Найкуист за дискретизация на сигнали.

За съответната комбинация от фактори е получен запис на провисването $w(t, \xi)$, променящо се във времето. Типичен вид на тази зависимост е показан на фиг. 2. За установената част е намерена средно-аритметичната стойност на провисването $w(\xi)$. Чрез алгоритъмът, показан в [10], е изчислен съответният коефициент на триене μ . Така определеният коефициент е сума от адхезионна и деформационна компоненти.



Фиг. 2. Типична зависимост на провисването $w(t, \xi)$ от времето

Управляващи фактори и нива

Таблица 1

Управляващи фактори		Нива на факторите		
		-1	0	+1
Радиус на закръгление на диамантения връх, r, mm	x_1	1	3	5
Сила на притискане, P_b, N	x_2	100	300	500
Подаване, $f, mm/rev$	x_3	0.075	0.15	0.225
Скорост на плъзгане, $v, m/min$	x_4	80	110	140

2.3. ПЛАНИРАН ЕКСПЕРИМЕНТ

С цел получаване на достоверен емпиричен математичен модел на коефициента на триене при плъзгане μ , е проведен планиран експеримент. Управляващите

фактори и техните нива, показани в табл. 1, са дефинирани на база на предварителната информация (виж т. 2.2).

Експериментален план

Таблица 2

№	x_1	x_2	x_3	x_4	μ
1	-1	-1	-1	-1	0.1925
2	1	-1	-1	-1	0.0661
3	-1	1	-1	-1	0.2100
4	1	1	-1	-1	0.0270
5	-1	-1	1	-1	0.1197
6	1	-1	1	-1	0.0934
7	-1	1	1	-1	0.0739
8	1	1	1	-1	0.0453
9	-1	-1	-1	1	0.2016
10	1	-1	-1	1	0.0543
11	-1	1	-1	1	0.1555
12	1	1	-1	1	0.0480
13	-1	-1	1	1	0.1442
14	1	-1	1	1	0.1023
15	-1	1	1	1	0.0632
16	1	1	1	1	0.0326
17	-1	0	0	0	0.1129
18	1	0	0	0	0.0404
19	0	-1	0	0	0.0808
20	0	1	0	0	0.0551
21	0	0	-1	0	0.0778
22	0	0	1	0	0.0721
23	0	0	0	-1	0.0631
24	0	0	0	1	0.0573
25	1	-0.5	-1	-1	0.0201
26	1	0	-1	-1	0.0232
27	1	0.5	-1	-1	0.0299
28	1	-0.5	1	-1	0.0570
29	1	0	1	-1	0.0696
30	1	0.5	1	-1	0.0451
31	1	-0.5	-1	1	0.0648
32	1	0	-1	1	0.0486
33	1	0.5	-1	1	0.0778
34	1	-0.5	1	1	0.0670
35	1	0	1	1	0.0606
36	1	0.5	1	1	0.0485
37	0	-0.5	0	0	0.0597
38	0	0	0	0	0.0410
39	0	0.5	0	0	0.0428
40	0	-1	-1	-1	0.0544
41	0	1	-1	-1	0.0507
42	0	-1	1	-1	0.0545
43	0	1	1	-1	0.0735
44	0	-1	-1	1	0.0594
45	0	1	-1	1	0.0861
46	0	-1	1	1	0.0792
47	0	1	1	1	0.0785
48	0	-1	0	-1	0.0792
49	0	1	0	-1	0.0489
50	0	-1	0	1	0.0519
51	0	1	0	1	0.0887
52	0	-1	-1	0	0.0569
53	0	1	1	0	0.0679
54	0	-1	-1	0	0.0668
55	0	1	1	0	0.0451

Материалът на образците е незакалена нисколегирани конструкционна стомана 37Cr4 с твърдост 220 НВ. Проведеният indentation test (за същността на такъв тест виж например [11]) показва, че поведението на повърхностният слой на тази стомана е аналогично на това на релсовите стомани R260 и 76. В настоящият експеримент е използвана стомана 37Cr4, тъй като е по-разпространена под формата на прокат, какъвто е необходим за изработване на ротационни образци. Последните са с диаметър 36mm. Началната грапавост на образците е в интервала $1.2 \div 2.4 \mu m$ по критерий *Ra*, според препоръките, направени в [4]. Използван е синтетичен деформиращ диамант със сферичен връх. Експериментът е проведен върху конвенционален струг

$$\mu = 0.0541 - 0.0426x_1 - 0.0087x_2 - 0.0109x_3 + 0.0041x_4 + 0.0319x_1^2 + 0.008x_2^2 + 0.0065x_4^2 + 0.0233x_1x_3 - 0.0078x_2x_3 \quad (1)$$

Дисперсионен анализ (ANOVA) е проведен посредством QstatLab за да се оцени значимостта на факторите в модела (1). Главните ефекти на факторите са показани на фиг. 3. Очевидно най-значим фактор е радиусът на върха на диаманта x_1 , а подаването x_3 е най-незначим. За да се получи минимална стойност на коефициента на триене е необходимо радиусът при върха на диаманта да е максимален, а останалите фактори да приемат стойности, около средните в интервала на вариране на съответния фактор.

Фиг. 4 показва сечения на хиперповърхнината на модела на коефициента на триене с различни хиперравнини. От четирите фактора най-голямо влияние

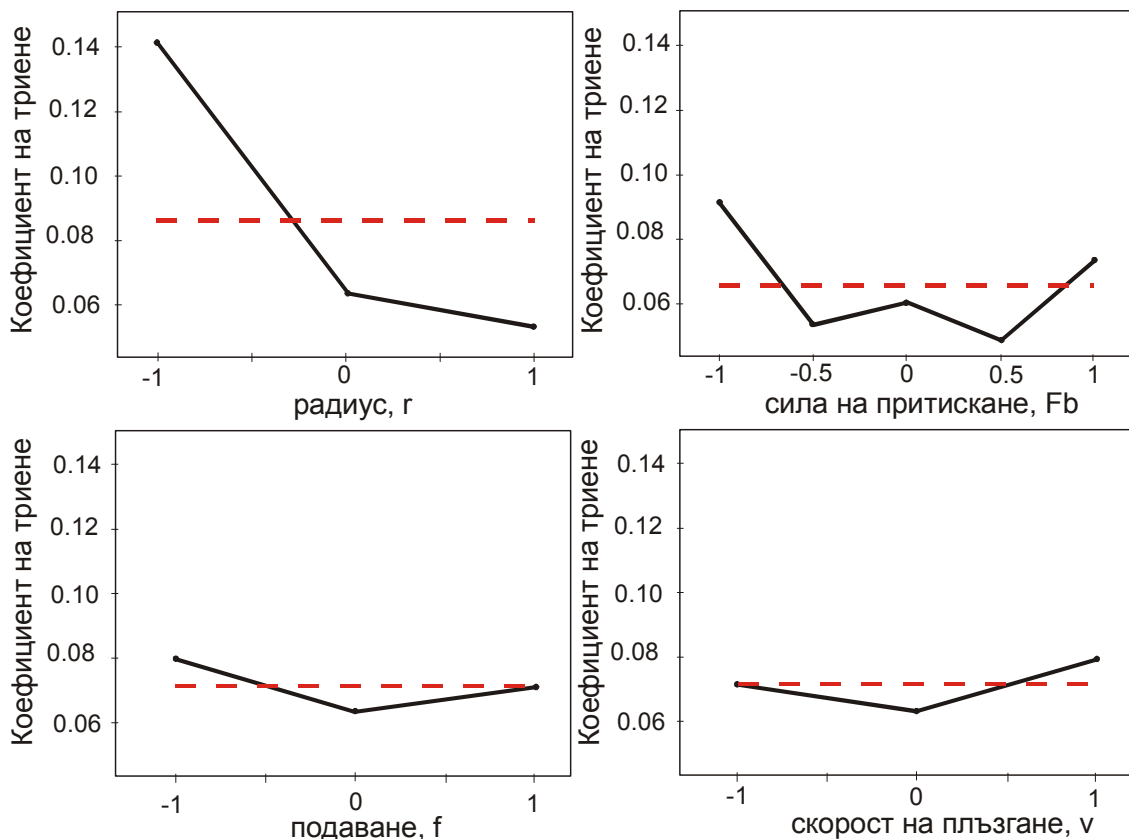
C11. Използвана е мажещо-охлаждаща течност Наку-form 70-19.

Оптимален композиционен план с 24 експериментални точки е разширен до 55 експериментални точки (табл. 2) с цел провеждане и на предварителните изследвания (виж т. 2.2), използвайки метода „one-factor-at-the-time“ с поне три експериментални точки.

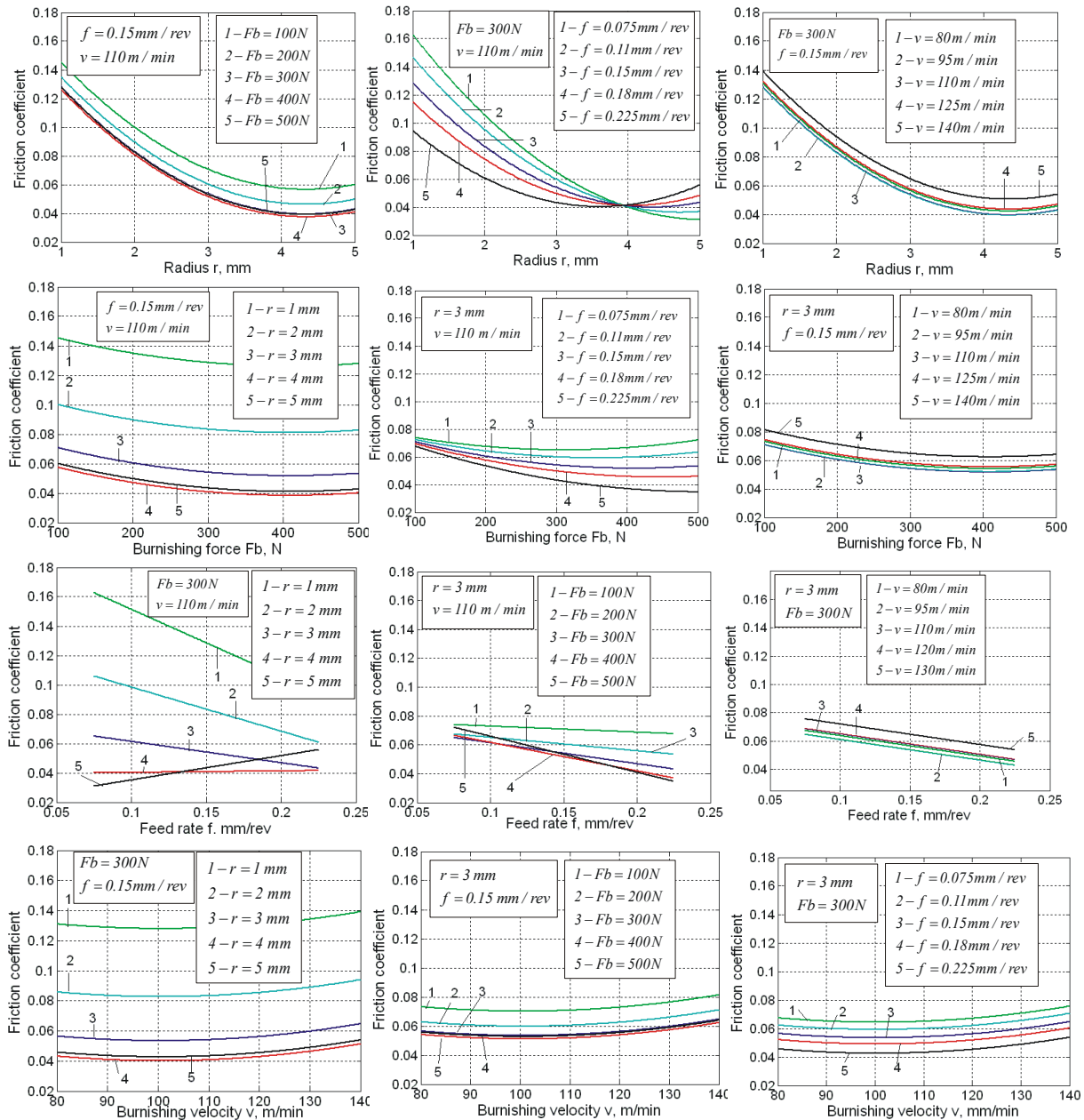
2.4. РЕЗУЛТАТИ И ИЗВОДИ

Посредством QstatLab [12] е проведен регресионен анализ на получените експериментални резултати. За целевата функция (коефициентът на триене μ) е получено:

върху коефициента на триене има радиусът на диаманта. Увеличаването на този радиус от 1 до 5 mm довежда до редуция на коефициента на триене до 4 пъти. От физична гледна точка този факт не е неочакван, тъй като с увеличаване на радиуса дълбочината на проникване на диаманта в обработвания материал намалява, което довежда до редуция и на двете компоненти на коефициента на триене – адхезионна и деформационна, а от там и на общия коефициент. Фиг. 4 потвърждава, че корелацията между радиуса и подаването е най-значима, като тенденцията е по-изразена за малки подавания.



Фиг. 3. Графика на главните ефекти на факторите



Фиг. 4. Сечения на хиперсферичната на модела на коефициента на триене с хиперравнини

ЛИТЕРАТУРА

[1] Reid L. Beneficial residual stresses at bolt holes by cold expansion, in: J. J. Kalker et al. (Eds), Rail Quality and Maintenance for Modern Railway Operation, Kluwer Academic Publishers, Printed in Netherlands, 1993, pp. 337-347.
 [2] Su M., Amrouche A., Mesmacque G., Benseddig 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.
 [3] Maximov J.T., Dunchева 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.
 [4] Korzynski, M. (2013). Slide diamond burnishing, in: Korzynski, M. (Ed), Nonconventional Finishing Technologies. Polish Scientific Publishers, Warsaw, pp. 9-33.
 [5] Korzynski M., Lubas J., Swirad S., Dudek K. (2011). Surface layer characteristics due to slide diamond burnishing with a cylindrical-ended tool. Journal of Materials Processing Technology 211 84-94.
 [6] Korzynski M., Pacana A., Cwanek J. (2009). Fatigue strength of chromium coated elements and possibility of its

improvement with slide diamond burnishing. Surface and Coatings Technology 203 1670-1676.
 [7] Яценко В. К., Г. З. Зайцев, В. Ф. Притченко, Л. И. Ивченко. Повышение несущей способности деталей машин алмазным выглаживанием. М., Машиностроение, (1985)
 [8] Торбило В. М., Евсин Е. А., Чигодаев Н. Е. О трении алмазного индентора по стали. Машиноведение 5 (1976) 103-109.
 [9] Хворостухин Л. А., Ильин Н. Н. Трение при алмазном выглаживании металлов и сплавов. Вестник машиностроения 11 (1973) 64-65.
 [10] Максимов Й. Т., Анчев А. П., Кузманов В. Т. Изследване на динамичното поведение на гредова конструкция с геометрическа нелинейност. Известия на Технически университет Габрово 48 (2014) 9-14.
 [11] Maximov J. T., Dunchева G. V. Finite Element Analysis and optimization of spherical motion burnishing of low-alloy steel. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science 226(1) (2012) 161-176.
 [12] Вучков И. Н., Вучков И. И. Програмен продукт QStatLab Professional, версия 5.4. Ръководство за потребителя. София, 2009.