



Књига апстраката
Мини-симпозијум
„Механика контакта: Теорија и примене“
Математички институт САНУ и Пројекат ОИ174001,
Београд, 14. март 2017

Booklet of Abstracts
Mini-symposium
“Contact Mechanics: Theory and Applications”
Mathematical Institute of SASA and Project OI 174001,
Belgrade, Serbia, March 14, 2017

Organizers: **dr Ivana D. Atanasovska**, Mathematical Institute of SASA, Belgrade, Serbia
Prof. Katica R. (Stevanović) Hedrih, Mathematical Institute of SASA,
Belgrade, Serbia
Co-organizer: **Prof. Radivoje M. Mitrović**, University of Belgrade-Faculty of Mechanical
Engineering, Belgrade, Serbia



Књига апстраката
Мини-симпозијум
„Механика контакта: Теорија и примене“
Математички институт САНУ и Пројекат ОИ174001,
Београд, 14. март 2017

Booklet of Abstracts
Mini-symposium
“Contact Mechanics: Theory and Applications”
Mathematical Institute of SASA and Project OI 174001,
Belgrade, Serbia, March 14, 2017

Organizers: **dr Ivana D. Atanasovska**, Mathematical Institute of SASA, Belgrade, Serbia
Prof. Katica R. (Stevanović) Hedrih, Mathematical Institute of SASA,
Belgrade, Serbia
Co-organizer: **Prof. Radivoje M. Mitrović**, University of Belgrade-Faculty of Mechanical
Engineering, Belgrade, Serbia



Mini-symposium “Contact Mechanics: Theory and Applications”

Mathematical Institute of SASA and Project OI 174001,
Belgrade, Serbia, March 14, 2017

Acknowledgment: Parts of this research were supported by the Ministry of Sciences and Technology of Republic of Serbia through Mathematical Institute SANU Belgrade Grant ON174001 Dynamics of hybrid systems with complex structures . Mechanics of materials.
Project Leader: **Katica (Stevanović) HEDRIH.**



PREFACE

All around us the things work thanks to contact. We can say with confidence that the contact phenomenon exists in every complex real mechanical system, starting with the machines, the building constructions and even in the micro and nano-electronic systems. In accordance with these facts, in the last decade, the contemporary research of research groups in wide range of disciplines is focused on the contact phenomenon investigation. The advances in computer technology have provided new methods and solutions for contact problems and open many possibilities for improvement of existing methods of contact variables solution, as well as for developing the new methods.

The one of the specific and very attractive problem is multi-body contact in real mechanical systems. Very often, elastic properties in contact areas couldn't be neglected, so the elastic deformations exist in contact area of each two bodies in contact. When there are two or more contacts at the same time and rotations and/or translations of contact bodies, these conditions cause the continuous changes of contact areas' geometry, friction, load distribution and other parameters. Therefore, the problem of mechanics of this kind of systems becomes very complex.

The real mechanical systems, which are parts of complex machines and industrial installations and plants, very often have complex characteristics with respect to geometry, kinematics, lubrications and interconnections. Therefore, the basic contact characteristics of these mechanical systems are: geometry of contact surfaces with and without irregularities, material deformability, and coefficient of friction and so on. It is obviously important to study all of contact features in contact systems and to assess their influence on their mechanics. The complexity of this problem is actually higher due to variable basic contact characteristics which exist in real systems. The contact characteristics mainly depend of time, but also very often depend on each other. These postulates are the basis and the main motivation for developing the new approaches for investigation and assessment of non-linear mechanics of contact systems which is among other things explain in the lectures which will be presented in this Mini-symposium.

We organize this Mini-symposium with the main objective to bring together the researchers focus in the area of contact mechanics. The exchanging of ideas and inspirations within wide range of researchers in the roles of lecturers and auditorium will be the main constituent of the both of working and braking parts of the Mini-symposium. The lecturers whose have been invited are the researchers from different areas in contact mechanics research, from analytical and numerical, via experimental research to applications in real systems. We hope that this Mini-symposium will bring new ideas about the applications of original theoretical results in real engineering systems and new connections between the present researchers, and finally the exceptional important international collaboration.

Editors



УВОД

Свуда око нас ствари функционишу захваљујући контакту. Можемо слободно рећи да контакт као феномен постоји у сваком сложеном реалном механичком систему, почевши од машина, преко грађевинских конструкција, па чак и код микро и нано-електронских система. У складу са овим чињеницама, у последњој деценији, савремена истраживања многих истраживачких група у најразличитијим научним дисциплинама усмерена су на истраживање контактнoг феномена. Напредак у компјутерским технологијама обезбедио је нове методе и решења за контактне проблеме и отворио многе могућности за побољшање постојећих и развијање нових метода за решавање променљивих које карактеришу контакт.

Један од специфичних и веома занимљивих проблема је и контакт више тела код реалних механичких система. Веома често, еластичне особине у контактнoј зони не могу бити занемарене и јављају се у контактним зонама свака два тела у контакту. Када постоје истовремено два или више контактна пара и ротације и/или translације контактних тела, такви услови изазивају континуирану промену карактеристика контактних области: геометрије, трења, расподеле оптерећења и др. Јасно је да је задатак решавања механике ове врсте система веома сложен.

Реални механички системи, који су део комплексних машина или индустријских инсталација и погона, веома често имају комплексне карактеристике у погледу геометрије, кинематике, подмазивања и међусобних веза. У складу са тим, основне карактеристике контакта код ових механичких система су: геометрија контактних површина са или без неправилности, деформабилност материјала, коефицијент трења и слично. Јасно је да је важно проучити све контактне карактеристике контактнoг система и проценити њихов утицај на механику система. Комплексност овог задатка је реално веома висока због променљивости основних карактеристика контакта који постоје код реалних система. Контактне карактеристике углавном зависе од времена, али веома често су и међусобно зависне. Ове поставке представљају основу и главну мотивацију за проучавања и развијања нових приступа у нелинеарној механици контактних система, што је између осталог и предмет предавања која ће бити изложена у оквиру овог Мини-симпозијума.

Основни циљ који смо поставили у организацији овог Мини-симпозијума је да окупи истраживаче посвећене истраживањима у области контактне механике. Размена идеја и инспирација у широком кругу предавача и слушаоца биће основни чинилац и радних делова Мини-симпозијума, али и предвиђених пауза. У тој намери, да одрже предавања у оквиру овог Мини-симпозијума, позвани су истраживачи који припадају различитим областима истраживања у оквиру контактне механике, од аналитичких, нумеричких, преко експерименталних истраживања и конкретних случајева примене. Надамо се да ће овај Мини-симпозијум изнедрити нове идеје о примени оригиналних теоријских резултата код реалних механичких система и да ће присутни истраживачи остварити у будућем периоду успешне контакте који ће за резултат имати међународну сарадњу.

Уредници



Mini-symposium “Contact Mechanics: Theory and Applications”
Mathematical Institute of SASA and Project OI 174001,
Belgrade, Serbia, March 14, 2017

PROGRAM OF MINI-SYMPOSIUM

“Contact Mechanics: Theory and Applications”

Mathematical Institute of SASA and Project OI174001,
Belgrade, Serbia, March 14, 2017, from 10:30-19:00h, room II, first floor, Kneza Mihaila 36

Програм Мини-симпозијума

„Механика контакта: Теорија и примене“

Математички институт САНУ и Пројекат ОИ174001,
Београд, 14. март 2017, од 10:30-19:00h, сала II, први спрат, Кнеза Михаила 36

Organizers: *dr Ivana D. Atanasovska*, Mathematical institute of SASA, Belgrade, Serbia
Prof. dr Katica R. (Stevanović) Hedrih, Mathematical Institute of SASA, Belgrade and Faculty of
Mechanical Engineering, University of Niš, Serbia
Co-organizer: *Prof. dr Radivoje M. Mitrović*, University of Belgrade-Faculty of Mechanical Engineering,
Belgrade, Serbia

* * *

Opening remarks: *Prof. dr Katica R. (Stevanović) Hedrih, Prof. dr Radivoje M. Mitrović ,
dr Ivana Atanasovska*
Уводна реч: *Проф. др Катица Р. (Стевановић) Хедрих, Проф. др Радивоје Митровић,
др Ивана Атанасовска*

* * *

I Session. Chairman: *Prof. dr Katica R. (Stevanović) Hedrih*, Mathematical Institute of SASA, Belgrade and
Faculty of Mechanical Engineering, University of Niš, Serbia
Prof. dr Gordana Kastratović, University of Belgrade, Faculty of Transport and Traffic
Engineering, Serbia

I-1. *Prof. dr Mirko Dinulović*, University of Belgrade-Faculty of Mechanical Engineering, Serbia,
mdinulovic@mas.bg.ac.rs

Contact problems in airframe structures on elastic supports

Проблеми контакта код ваздухопловних структура на еластичним ослоњцима

I-2. *Prof. dr Gordana Kastratović*, University of Belgrade, Faculty of Transport and Traffic Engineering, Serbia,
g.kastratovic@sf.bg.ac.rs

Some aspects of 3D finite element modeling of contact effects in wire rope strands

Неки аспекти 3D моделовања утицаја контакта између жица у плетеним ужадима методом
коначних елемената



- I-3. *dr Ana Pavlović*, Alma Mater Studiorum- University of Bologna, Italy, ana.pavlovic@unibo.it
dr Cristiano Fragassa, Alma Mater Studiorum- University of Bologna, Italy, cristiano.fragassa@unibo.it
dr Snežana Vulović, Faculty of Engineering, University of Kragujevac, Serbia, vsneza@kg.ac.rs

Numerical simulation for investigating the contact problems in industrial life

Нумеричке симулације у истраживањима контактних проблема у индустријском животу

- II Session. Chairman: *Prof. dr Vasilios Spitas*, National Technical University of Athens, Greece
dr Victor Roda-Casanova, Jaume I University, Castellón, Spain

- II-1. *Prof. dr Vasilios Spitas*, National Technical University of Athens, School of Mechanical Engineering ,
Athens, Greece, vspitas@central.ntua.gr

**A quaternion-based analytical solution for the generalised 3-D non-conjugate
gear contact analysis problem**

Аналитичко решење за генерализовану 3-D анализу некоњугованог контактнoг проблема код
зупчаника, базирано на кватернионима

- II-2. *dr Victor Roda-Casanova*, Jaume I University, Castellón, Spain, vroda@uji.es
Prof. dr Francisco Sanchez-Marin, Jaume I University, Castellón, Spain, ftsan@uji.es

Contact analysis applied to gear design

Анализа контакта у конструисању зупчаника

- II-3. *dr Santosh Patil*, Department of Mechanical Engineering, Manipal University Jaipur, Jaipur, Rajasthan,
India, santosh.patil@jaipur.manipal.edu
Prof. dr Saravanan Karuppanan, Department of Mechanical Engineering, Universiti Teknologi
PETRONAS, Perak, Malaysia, e-mail: saravanan_karuppanan@utp.edu.my
dr Ivana D. Atanasovska, Mathematical institute of SASA, Belgrade, Serbia, iviatanasov@yahoo.com

Effect of friction inclusion on gear contact stresses

Утицај трења на контактне напоне код зупчаника

Cocktail brake

* * *

- III Session. Chairman: *Prof. dr Radivoje M. Mitrović*, University of Belgrade-Faculty of Mechanical
Engineering, Serbia
dr Olivera Erić Cekić, Innovation center, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Belgrade, Belgrade, Serbia



III-1. *Prof. dr Tatjana Lazović, Prof. dr Radivoje M. Mitrović, Žarko Mišković,*
University of Belgrade-Faculty of Mechanical Engineering, Serbia
tlazovic@mas.bg.ac.rs, rmitrovic@mas.bg.ac.rs, zmiskovic@mas.bg.ac.rs

Contact between abrasive particles and worn surfaces within rolling bearing

Контакт између абразивних честица и похабаних површина код котрљајних лежаја

III-2. *dr Olivera Erić Cekić*, Innovation center, Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade, Belgrade, Serbia, olivera66eric@gmail.com
dr Dragan Rajnović, Prof. dr Lepasava Sidjanin, dr Sebastian Baloš
Department of Production Engineering, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, Serbia,
draganr@uns.ac.rs, lepas@uns.ac.rs, sebab@uns.ac.rs

A review of as-cast and austempered ductile iron behaviour under cavitation conditions

Преглед понашања ливеног гвожђа и аустемперованог нодуларног лива у условима кавитације

III-3. *dr Dragan Milković*, University of Belgrade-Faculty of Mechanical Engineering, Serbia,
dmilkovic@mas.bg.ac.rs
Prof. dr Goran Simić, University of Belgrade-Faculty of Mechanical Engineering, Serbia,
gsimic@mas.bg.ac.rs

Wheel-rail contact forces – experimental and computational approach

Силе у додиру точак–шина – експериментални и прорачунски приступ

III-4. *mr sci. Marija Vukšić Popović*, College of Professional Railway Studies, Belgrade, Serbia
vuksicpopovic@bvcom.net
mr sci. Saša Radulović, University of Belgrade-Faculty of Mechanical Engineering, Serbia,
sasa.radulovic76@gmail.com

Contact mechanics of wheel/brake block on railway vehicles

Контактна механика склопа точак/кочница код железничких возила

* * *

IV Session. The Round Table Discussion:

International Project Proposals - New trends in contact mechanics -

* * *



Mini-symposium “Contact Mechanics: Theory and Applications”

Mathematical Institute of SASA and Project OI 174001,
Belgrade, Serbia, March 14, 2017



CONTACT PROBLEMS IN AIRFRAME STRUCTURES ON ELASTIC SUPPORTS

Mirko Dinulović¹

¹Faculty of Mechanical Engineering, Department of Aerospace engineering
University of Belgrade
Belgrade, Serbia

E-mail: mdinulovic@mas.bg.ac.rs

web page: www.mas.bg.ac.rs

ABSTRACT

In the present work the stress and displacement fields of the airplane wing to fuselage connection area, and rod structure helicopter airframe residing on elastic supports, are analyzed using a finite element analysis (FEA) approach.

External loading on the airframe components is obtained by performing CFD analysis for given flight conditions for the analyzed structure. To obtain the accurate results doublet lattice method is used. Aerodynamic pressures obtained were directly transferred to the structural model using method of splines. In order to obtain accurate values of stresses, strains and displacements in the high stressed areas of the airframe. Each component of the assembly was modeled separately and the 3D stress field is assumed.

It was found that in order to accurately predict structure aeroelastic parameters, such as divergence speed, reversal speed and flutter speed contact effects between parts in airframe components have to be taken into account.

Keywords: Contact Stress Analysis, Computational Mechanics, Airframe, Finite Element Analysis.

REFERENCES

- [1] Bog, T., Zander, N., Kollmannsberger, K., Rank, E., (2015) “Normal contact with high order finite elements and a fictitious contact material”, *Computers & Mathematics with Applications* Volume 70, Issue 7 pp. 1370–1390.
- [2] Galin., L.A., (2008), *Solid Mechanics and Its Applications –Contact problems, Volume 15*, Springer
- [3] Mottershead, J.E., Pascoe, S.K., English, R.G., “A general finite element approach for contact stress analysis”, *International Journal for numerical methods in engineering*, Vol. 33, Issue 4, pp. 765- 769
- [4] Gallego, F.J., Anza, J.J., “A mixed finite element model for the elastic contact problem”, *International Journal for numerical methods in engineering*, Vol. 28, Issue 6, pp. 1249–1264
- [5] Purushothaman, P., Thankachan, P. (2014), “Hertz Contact Stress Analysis and validation using finite element analysis”, *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, Vol. 2, Issue 9, pp. 531- 538



ПРОБЛЕМИ КОНТАКТА КОД ВАЗДУХОПЛОВНИХ СТРУКТУРА НА ЕЛАСТИЧНИМ ОСЛОНЦИМА

Мирко Динуловић¹

¹Машински факултет, Катедра за ваздухопловство

Универзитет у Београду

Београд, Србија

E-mail: mdinulovic@mas.bg.ac.rs

web page: www.mas.bg.ac.rs

АПСТРАКТ

У овом раду анализирано је напонско стање као и поље померања авионског крила у зони везе крило-труп као и хеликоптерске решеткасте структуре које се ослањају на еластичне ослонце методом коначних елемената.

Спољашње оптерећење структуре добијено је методом CFD анализе за задате услове лета. У овој методи кориштен је “doublet lattice method”. Аеродинамички притисци су пренети на структуру “spline” методом. У циљу добијања што тачније расподеле напона у високо оптерећеним зонама склопова структуре, посебно су моделирани сви елементи склопова и претпостављено је тро-димензионално напонско стање.

Закључено је да је у циљу одређивања тачних аероеластичних параметара структуре, као што су брзина дивергенције, брзина реверса командних површина и брзина флатера потребно узети у обзир ефекте контакта између компоненти које сачињавају склоп ваздухопловне структуре.

Кључне речи: Контактна напонска анализа, Нумеричка Механика, Ваздухопловна структура, Метод коначних елемената.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Bog, T., Zander, N., Kollmannsberger, K., Rank, E., (2015) “Normal contact with high order finite elements and a fictitious contact material”, *Computers & Mathematics with Applications* Volume 70, Issue 7 pp. 1370–1390.
- [2] Galin., L.A., (2008), *Solid Mechanics and Its Applications –Contact problems, Volume 15*, Springer
- [3] Mottershead, J.E., Pascoe, S.K., English, R.G., “A general finite element approach for contact stress analysis”, *International Journal for numerical methods in engineering*, Vol. 33, Issue 4, pp. 765- 769
- [4] Gallego, F.J., Anza, J.J., “A mixed finite element model for the elastic contact problem”, *International Journal for numerical methods in engineering*, Vol. 28, Issue 6, pp. 1249–1264
- [5] Purushothaman, P., Thankachan, P. (2014), “Hertz Contact Stress Analysis and validation using finite element analysis”, *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, Vol. 2, Issue 9, pp. 531- 538



SOME ASPECTS OF 3D FINITE ELEMENT MODELING OF CONTACT EFFECTS IN WIRE ROPE STRANDS

Gordana M. Kastratović¹

¹Department of Technical Sciences
University of Belgrade, Faculty of Transport and Traffic Engineering
Belgrade, Serbia
E-mail: g.kastratovic@sf.bg.ac.rs

ABSTRACT

Knowing that experimental work on wire rope requires specific and expensive testing devices, because of which the experimental results reported in the literature are very limited, numerical analysis such as finite element analysis (FEA), was the logical step in the wire rope behavior studies. However, because of its complex geometry, it is still very difficult to model and analyze wire ropes, using finite element method. Another important issue, which increases the difficulty of FEA, for this particular problem, represents the modeling of contacts between wires, which exist and must be taken into consideration. They determine how the wires can move relative to one another and the distribution of load between them, even when the friction is neglected.

As an effort to resolve mentioned issues, this research explores some aspects of 3D modeling of contact effects in wire rope strands with Independent Wire Strand core (IWS), since there are not many papers in which mentioned topic was analyzed. Using advanced 3D modeling techniques, FEA of wire rope strands was considered, with special emphasis on diverse types of contacts between wires. Several different meshed 3D models were made, and numerical analysis, using finite element method based commercial software was carried out under two different load conditions.

First the 6x7 Independent Wire Rope Core (IWRC) was investigated, and afterwards the 1x19 wire rope, which is a stainless steel core of a 7x19 wire rope. These analyses were employed for verification purposes, since it was possible to compare the obtained results with the solutions from the available literature. This comparison showed excellent agreements. Then, the 7x19 IWS itself was investigated, with the finite element model based on previously mentioned analyses. This analysis provided results, which can be found useful in practical engineering. All this emphasizes the significance of creating the suitable finite element model of the wire rope contacts, in order to provide a better understanding and prediction of the mechanical behavior of the wire ropes.

Keywords: Wire rope, strand, contact, finite element method.

REFERENCES

- [1] Costello, G. A. (1990), *Theory of wire rope*, first ed., Springer, Berlin.
- [2] Jiang, W. G., Henshall, J. L., Walton, J. M. (2000), “A concise finite element model for three layered straight wire rope strand,” *Int. J. Mech. Sci.* 42, pp. 63-86.
- [3] Erdonmez, C., Imrak, C. E. (2010), “Advances in 3D wire rope modeling and numerical analysis,” *In the XVI International Conference, Investigation, Production and Use of Steel Ropes, Conveyors and Hoisting Machines* Podbanske, Slovakia.
- [4] Kastratović, G., Vidanović, N. (2010), “The analysis of frictionless contact effects in wire rope strand using the finite element method,” *Transport&Logistics* 19, pp. 33-40.
- [5] Kastratović, G., Vidanović, N. (2011), “Some aspects of 3D finite element modeling of independent wire rope core,” *FME-Transactions* 39(1), pp. 37-40.
- [6] Stanova, E., Fedorko, G., Fabian, M., Kmet, S. (2010) “Computer modeling of wire strands and ropes Part I: Theory and computer implementation,” *Adv. Eng. Softw.* 42(6), pp. 305-315.



НЕКИ АСПЕКТИ 3D МОДЕЛОВАЊА УТИЦАЈА КОНТАКАТА ИЗМЕЋУ ЖИЦА У ПЛЕТЕНИМ УЖАДИМА МЕТОДОМ КОНАЧНИХ ЕЛЕМЕНАТА

Гордана М. Кастратовић¹

¹Катедра за Општетехничке науке
Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет
Београд, Србија
E-mail: g.kastratovic@sf.bg.ac.rs

АПСТРАКТ

Експериментална испитивања плетених челичних ужади захтевају специфичну и скупу опрему и мерне инструменте, што експерименталне резултате у литератури чини веома ретким и тешко доступним. Због тога су нумеричке методе, и то у првом реду метода коначних елемената (МКЕ), логичан корак у испитивању и анализи понашања плетених челичних ужади. Међутим, њихово моделовање и анализа применом МКЕ су и даље компликовани, у првом реду због изузетно комплексне геометрије, али и због постојања контакта између жичаних влакана, који се морају узети у обзир. Ови контакти одређују како се жичана влакна крећу релативно једно у односу на друго, али исто тако и расподелу оптерећења међу њима, чак и када је треће занемарено.

У циљу решавања ових проблема, овим истраживањем се анализирају поједини аспекти 3D моделовања утицаја kontakata између жица у плетеним ужадима методом коначних елемената, а с обзиром на то да нема много истраживања у којима је ова тема разматрана. Користећи напредне технике 3D моделовања, ова анализа је разматрана са посебним нагласком на различите типове kontakata између жичаних влакана. Креирано је неколико различитих модела, са различитим мрежама, који су анализирани помоћу комерцијалног софтвера базираног на методи коначних елемената, и то за два различита услова оптерећења.

Прво је анализирано 6х7 плетено челично уже, а затим и плетено челично уже 1х19, које представља језгро од нерђајућег челика плетеног ужета 7х19. Ове анализе су урађене у циљу верификације, с обзиром на чињеницу да је у овим случајевима било могуће извршити поређење добијених резултата са резултатима доступним у литератури. Ово поређење је дало одлично поклапање резултата. Коначно је анализирано и челично плетено уже 7х19, при чему је модел коначних елемената заснован на претходно поменутих анализама. Ова анализа је дала резултате који могу бити корисни у реалној експлоатацији конкретног ужета, али и комплексних ужади уопште. Овим истраживањима истакнут је значај адекватног 3D моделовања kontakata плетених челичних ужади, а у циљу што бољег разумевања и предвиђања понашања истих.

Кључне речи: Плетено челично уже, Струк, Контакт, Метода коначних елемената.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Costello, G. A. (1990), *Theory of wire rope*, first ed., Springer, Berlin.
- [2] Jiang, W. G., Henshall, J. L., Walton, J. M. (2000), "A concise finite element model for three layered straight wire rope strand," *Int. J. Mech. Sci.* 42, pp. 63-86.
- [3] Erdonmez, C., Imrak, C. E. (2010), "Advances in 3D wire rope modeling and numerical analysis," *In the XVI International Conference, Investigation, Production and Use of Steel Ropes, Conveyors and Hoisting Machines* Podbanske, Slovakia.
- [4] Kastratović, G., Vidanović, N. (2010), "The analysis of frictionless contact effects in wire rope strand using the finite element method," *Transport&Logistics* 19, pp. 33-40.
- [5] Kastratović, G., Vidanović, N. (2011), "Some aspects of 3D finite element modeling of independent wire rope core," *FME-Transactions* 39(1), pp. 37-40.



NUMERICAL SIMULATION FOR INVESTIGATING THE CONTACT PROBLEMS IN INDUSTRIAL LIFE

A. Pavlovic¹, C. Fragassa² and S.Vulovic³

^{1,2}Department of Industrial Engineering
Alma Mater Studiorum, University of Bologna, Bologna, Italy
E-mail: ana.pavlovic@unibo.it ; cristiano.fragassa@unibo.it

³Faculty of Engineering Science
University of Kragujevac, Kragujevac, Serbia
E-mail: vsneza@kg.ac.rs

ABSTRACT

The investigation of contact phenomena uses to represent a hard task in numerical modelling. It involves steps as formulation of geometry, statement of interface laws, variational formulation, algorithms development and so on. This article provides a short overview on this topic with special regards to industrial applications. The discretization of a contact problem in time and space has to be realized deeply considering the inner nature of this contact. Thus, the procedures conventionally used for discretization of contacts are here discussed as well as advanced techniques for their better modelling. Furthermore, it is noteworthy that different variational formulations can be applied to treat the variational inequalities due to contact.

The current requirements in optimization of the structures and components of industrial reality bring a latest investment in research project regarding engineering systems which are already in use or under development. Several methods will be presented and discussed as contact problems: *Resistance of composite curtains under ballistic impact*; *Winding of the automotive throttle body spring*; *Viscoelastic banding of porcelain*; *Crash test of electric and solar vehicle*; *Ballistic Impact on concrete and ceramic barrier*; *Hydro elasticity in water-entry problems etc.* These examples will give an overview of the non-linear dynamics application that is very important in the area of real engineering approach.

Keywords: Contact problems, Composite material, Ceramic, Concrete

REFERENCES

- [1] Pavlovic, A., and Fragassa, C. (2017), “Numerical modelling of ballistic impacts on flexible protection curtains used as safety protection in woodworking”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science 231(1), pp. 44-58.
- [2] Živković, Irena, et al. (2017), "Influence of moisture absorption on the impact properties of flax, basalt and hybrid flax/basalt fiber reinforced green composites", Composites Part B: Engineering 111, pp. 148-164.
- [3] Pavlovic, A., Fragassa, C. and Disic, A. (2017), “Comparative numerical and experimental study of projectile impact on reinforced concrete”, Composites Part B: Engineering 108, pp. 122-130.
- [4] Pavlovic, A., and Zivkovic, M. (2016), “ Roll Cage Design and Validation for a Rally Vehicle", FME Transactions 44 (4), pp. 398-404.
- [5] Pavlovic, A. and Fragassa, C. (2016), "Modelling the viscoelasticity of ceramic tiles by finite element", AIP Conference Proceedings, Vol. 1736. No. 1.
- [6] Pavlovic, A., and Fragassa, C. (2016), "Analysis of flexible barriers used as safety protection in woodworking," Int J Qual Res 10 (1), pp. 71-88.
- [7] Kostić, S. Ćirić, et al. (2012), “Low velocity impact on a complex composite structure," DAS-29, 29th Danubia Adria Symposium, University of Belgrade, Serbia, pp.270-273.



НУМЕРИЧКЕ СИМУЛАЦИЈЕ У ИСТРАЖИВАЊИМА КОНТАКТНИХ ПРОБЛЕМА У ИНДУСТРИЈСКОМ ЖИВОТУ

А. Павловић¹, С. Fragassa² и С. Вуловић³

^{1,2}Департман за индустријски инжењеринг
Универзитет у Болоњи, Болоња, Италија

E-mail: ana.pavlovic@unibo.it ; cristiano.fragassa@unibo.it

³Факултет инжењерских наука
Универзитет у Крагујевцу, Крагујевац, Србија
E-mail: vsneza@kg.ac.rs

АПСТРАКТ

Истраживање контактних феномена представља тежак задатак у нумеричком моделирању. То укључује кораке, као што су: креирање геометрије, дефинисање закона, дефинисање променљивих формулација, развој алгоритама и тако даље. Овај рад даје кратак осврт на ову тему са посебном пажњом на индустријску примену. Дискретизација контактних проблема у времену и простору мора да се реализује дубоко обзиром на унутрашњу природу овог контакта. Стога, процедуре које се конвенционално користе за дискретизацију контаката овде су изложене као напредне технике за њихово брже моделирање. Осим тога, важно је напоменути да се различите променљиве формулације могу применити за третирање променљивих неједнакости при контакту. Садашњи захтеви у оптимизацији структура и компонената индустријске реалности, доноси најновија улагања у истраживачке пројекте у вези са инжењерским системима који су већ у употреби или у фази израде. Неколико метода биће представљено и размотрено као контактни проблеми: Отпорност композитних баријера на балистички удар; Намотавање аутомобилске опруге; Вискоеластично савијање керамике; Судар електричног и соларног возила; Балистички удар на бетонску и керамичку баријеру; Хидро-еластичност у проблемима удара у воду итд. Ови примери ће дати преглед нелинеарне динамичке примене која је веома важна у области реалног инжењерског приступа.

Кључне речи: Проблеми контакта, композитни материјали, керамика, бетон

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Pavlovic, A., and Fragassa, C. (2017), "Numerical modelling of ballistic impacts on flexible protection curtains used as safety protection in woodworking", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science 231(1), pp. 44-58.
- [2] Živković, Irena, et al. (2017), "Influence of moisture absorption on the impact properties of flax, basalt and hybrid flax/basalt fiber reinforced green composites", Composites Part B: Engineering 111, pp. 148-164.
- [3] Pavlovic, A., Fragassa, C. and Disic, A. (2017), "Comparative numerical and experimental study of projectile impact on reinforced concrete", Composites Part B: Engineering 108, pp. 122-130.
- [4] Pavlovic, A., and Zivkovic, M. (2016), "Roll Cage Design and Validation for a Rally Vehicle", FME Transactions 44 (4), pp. 398-404.
- [5] Pavlovic, A. and Fragassa, C. (2016), "Modelling the viscoelasticity of ceramic tiles by finite element", AIP Conference Proceedings, Vol. 1736. No. 1.
- [6] Pavlovic, A., and Fragassa, C. (2016), "Analysis of flexible barriers used as safety protection in woodworking," Int J Qual Res 10 (1), pp. 71-88.
- [7] Kostić, S. Ćirić, et al. (2012), "Low velocity impact on a complex composite structure," DAS-29, 29th Danubia Adria Symposium, University of Belgrade, Serbia, pp.270-273.



A QUATERNION-BASED ANALYTICAL SOLUTION FOR THE GENERALISED 3-D NON-CONJUGATE GEAR CONTACT ANALYSIS PROBLEM

Vasilios Spitas¹

¹ School of Mechanical Engineering
National Technical University of Athens
Athens, Greece

E-mail: vspitas@central.ntua.gr

ABSTRACT

The current technological state-of-the-art uses modified gear tooth profiles, which are in part non-conjugate and therefore cannot be analyzed using standard conjugate contact theory. Existing non-conjugate mathematical models require the solution of a system of implicit equations, typically with significant computational effort and need for careful monitoring of solution stability, convergence and selection of initial values.

This paper derives a modified form for the fundamental gear meshing equations in three dimensions, which are solved in an analytical way using quaternions. Two-dimensional solutions are presented demonstrating the improved solution speed and stability of the proposed approach. The solution is validated in benchmark tests using real gear geometries.



**АНАЛИТИЧКО РЕШЕЊЕ ЗА ГЕНЕРАЛИЗОВАНУ 3-D АНАЛИЗУ
НЕКОЊУГОВАНОГ КОНТАКТНОГ ПРОБЛЕМА КОД ЗУПЧАНИКА,
БАЗИРАНО НА КВАТЕРНИОНИМА**

Vasilios Spitas¹

¹Машински факултет
Национални технички универзитет у Атини
Атина, Грчка
E-mail: vspitas@central.ntua.gr

АПСТРАКТ

Савремене технологије користе модификоване профиле зубаца зупчаника, који су делимично некоњуговани (неспрегнути) и због тога се не могу анализирати стандардном контактном теоријом. Постојећи некоњуговани (неспрегнути) математички модели захтевају решавање система имплицитних једначина, обично са значајним рачунарским временом и потребом за пажљивим праћењем стабилности решења, конвергенције и избора почетних вредности.

Овај рад изводи модификовани облик за основне једначине спрезања зупчаника у три димензије, које су решене аналитички коришћењем кватерниона. Дводимензионална решења су представљена да прикажу побољшану брзину решавања и стабилност предложеног приступа. Решење је потврђено у реперним тестовима коришћењем реалних геометрија зупчаника.



CONTACT ANALYSIS APPLIED TO GEAR DESIGN

V. Roda-Casanova¹, F. Sanchez-Marin²

Department of Mechanical Engineering and Construction
Jaume I University
Castellón, Spain

E-mail: ¹vroda@uji.es, ²ftsan@uji.es, web page: <http://gite.uji.es/>

ABSTRACT

The determination of the maximum contact stress and the maximum bending stress at the root of the tooth is an important stage in the design process of a gear transmission, since they directly define the load carrying capacity of the gears. If these stresses become higher than the allowable values according the properties of the material, the expected life of the transmission will decrease.

Several approaches have been developed through years to determine the maximum contact stress. Some of them are numerical methods based on the discretization of the domain, while other approaches use analytical solutions, generally based on Hertz contact theory. Compared to the numerical approaches, the analytical solutions are more efficient in terms of the computational cost, but they have severe applicability limitations, imposed by the hypotheses of the underlying theory. On the other hand, the numerical approaches can overcome these limitations, but at much higher computational cost. Semi-analytical approaches can be considered as an intermediate step, since they are potentially more efficient than the numerical approaches and they allow overcoming some of the limitations of the analytical approaches.

For any of these approaches, the priority is realism (accuracy of results). This means that contact analysis must be performed in conditions as realistic as possible considering all phenomena that may affect the contact. Among these phenomena, the mesh misalignment has special importance. When two gears are misaligned, a defective contact pattern is produced, originating uneven distributions of contact pressure, which tend to increase the maximum contact and bending stresses. And mesh misalignment may be produced by several causes, such as manufacturing and assembly errors, elastic deflections, thermal deformations, etc.

In this work, new models have been proposed and some existing models have been improved, to take into account the mesh misalignment produced by the elastic deflections of the elements of the transmission when performing analytical [1], semi-analytical [2] and numerical [3] contact analyses.

Keywords: Contact analysis, Gear drives, Mesh misalignment.

REFERENCES

- [1] Roda-Casanova, V., Sanchez-Marin, F., Gonzalez-Perez, I., Iserte, J.L., Fuentes, A. (2013), “Determination of the ISO face load factor in spur gear drives by the finite element modeling of gears and shafts,” *Mechanism and Machine Theory* 65, pp. 1-13.
- [2] Roda-Casanova, V., Sanchez-Marin, F., Iserte, J.L. (2015), “An approach for solving the contact problem in spur gear transmissions considering gear misalignments,” *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, Boston, United States, 2– 5 August, Vol. 10.
- [3] Gonzalez-Perez, I., Roda-Casanova, V., Fuentes, A., Sanchez-Marin, F., Iserte, J.L., (2012), “A finite element model for consideration of the torsional effect on the bearing contact of gear drives,” *Journal of Mechanical Design*, Transactions of the ASME 134.



АНАЛИЗА КОНТАКТА У КОНСТРУИСАЊУ ЗУПЧАНИКА

V. Roda-Casanova¹, F. Sanchez-Marin²

Одељење за машинство и конструисање

Универзитет „Jaume I“

Кастељон, Шпанија

E-mail: ¹vroda@uji.es, ²ftsan@uji.es, web page: <http://gite.uji.es/>

АПСТРАКТ

Одређивање максималних контактних напона и максималних напона у подножју зубаца веома је важан корак у процесу конструисања зупчастих преносника снаге, с обзиром да ова напонска стања директно одређују носивост зупчаника. Када су ови напони виши од дозвољених вредности с обзиром на карактеристике материјала, очекивани радни век преносника се смањује.

Неколико приступа је развијено у претходном периоду у циљу одређивања максималних контактних напона. Неки од њих су нумеричке методе базиране на дискретизацији објекта, док други приступи користе аналитичка решења, углавном базирана на Hertz-овој контактної теорији. У поређењу са нумеричким приступима, аналитичка решења су ефикаснија у погледу рачунског времена и цене, али имају неколико ограничења у примени, која произилазе од хипотеза основне теорије. Са друге стране, нумерички приступ може превазићи та ограничења, али уз много већу рачунску цену. Полу-аналитички приступи могу бити разматрани као међукорак, с обзиром да су потенцијално ефикаснији од нумеричких приступа и омогућавају превазилажење неких од ограничења аналитичких приступа.

За сваки од ових приступа, приоритет је реалност (тачност резултата). Ово значи да контактна анализа мора бити спроведена у што реалнијим условима узимајући у обзир све феномене који могу имати утицај на контактна напрезања. Међу овим феноменима, одступања профила заузимају специјално место. Када између два зупчаника постоје одступања, јавља се неправилна контактна област, производећи неравномерну расподелу контактнoг притиска, који има тенденцију да повећа максималне контактне напоне и напоне у подножју зупца. Одступања профила могу се јавити услед неколико узрока, као што су грешке у изради и монтажи, еластичне и термичке деформације и др.

У овом раду, предложени су нови модели, а неки постојећи су побољшани, тако да узимају у обзир одступања у спрезању која су резултат еластичних деформација од елемената преносника за случај аналитичке [1], полу-аналитичке [2] и нумеричке [3] контактне анализе.

Кључне речи: Контактна анализа, зупчаници, одступања у спрезању.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Roda-Casanova, V., Sanchez-Marin, F., Gonzalez-Perez, I., Iserte, J.L., Fuentes, A. (2013), “Determination of the ISO face load factor in spur gear drives by the finite element modeling of gears and shafts,” *Mechanism and Machine Theory* 65, pp. 1-13.
- [2] Roda-Casanova, V., Sanchez-Marin, F., Iserte, J.L. (2015), “An approach for solving the contact problem in spur gear transmissions considering gear misalignments,” *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, Boston, United States, 2–5 August, Vol. 10.
- [3] Gonzalez-Perez, I., Roda-Casanova, V., Fuentes, A., Sanchez-Marin, F., Iserte, J.L., (2012), “A finite element model for consideration of the torsional effect on the bearing contact of gear drives,” *Journal of Mechanical Design*, Transactions of the ASME 134.



EFFECT OF FRICTION INCLUSION ON GEAR CONTACT STRESSES

Santosh Patil^{1,2}, Saravanan Karuppanan² and Ivana Atanasovska³

¹Department of Mechanical Engineering
Manipal University Jaipur, Jaipur, Rajasthan, India
E-mail: santosh045@gmail.com/santosh.patil@jaipur.manipal.edu

²Department of Mechanical Engineering
Universiti Teknologi PETRONAS
Bandar Seri Iskandar, Perak, Malaysia
E-mail: saravanan_karuppanan@utp.edu.my

³Mathematical Institute of the Serbian Academy of Sciences and Arts
Kneza Mihaila 36, Belgrade, Serbia
E-mail: iatanasovska@mi.sanu.ac.rs

ABSTRACT

Stress analysis of gears has become a popular area of research in order to reduce the failures and to optimize the design of gears. Theoretical analysis with friction in geared system becomes quite complicated because of the presence of several factors contributing to the frictional variations [1]. Friction between gears causes detrimental effects on gear surface contacts, but there is no effective method to determine the frictional effects on these contacts. Inclusion of friction in the study of gear contact is sparse [2–4]. In addition, friction depends on various other parameters, which are in turn ambiguous to evaluate. Due to this frictional unpredictability in gear contact stresses, many gear systems have experienced premature failures. Hence, a quantitative study of frictional effects on gear contact problem is therefore essential. Thus, to solve the present problem, a dimensionless friction factor has been developed based on the finite element analysis and it would account for the friction on gear contact stress calculations. The friction factor function which estimates the significant frictional rise in gears has been proposed based on the parametric studies carried out on various sets of parallel axis involute gears. It has shown that there is a 15% to 22% rise in contact stresses with increasing frictional coefficient from 0 to 0.3, for different parallel axis gear sets (spur and helical gears) [3]. The mathematically correlated K_f function was verified and its inclusion provided better frictional contact stress evaluation in gears, providing a simplified frictional measure in gear contact stress calculations [5].

Keywords: Gear Contact Stress, Finite Element Analysis, Friction Factor

REFERENCES

1. Wei, Jing, Aiqiang Zhang, and Pan Gao. 2016. A study of spur gear pitting under EHL conditions : Theoretical analysis and experiments. *Tribology International* 94, pp. 146–154.
2. Atanasovska, Ivana. (2009), "Finite Element Model for Stress Analysis and Nonlinear Contact Analysis of Helical Gears". *Scientific Technical Review* 64, pp. 61–69.
3. Patil, Santosh S., Saravanan Karuppanan, Ivana Atanasovska, and Azmi Abdul Wahab. (2014), "Contact Stress Analysis of Helical Gear Pairs, Including Frictional Coefficients". *International Journal of Mechanical Sciences* 85, pp. 205–211.
4. Björling, M. (2014), "Friction in Elastohydrodynamic Lubrication", Doctoral Thesis, Luleå University of Technology.
5. Patil, Santosh S., Saravanan Karuppanan, and Ivana Atanasovska. (2015), "Contact Stress Evaluation of Involute Gear Pairs, Including the Effects of Friction and Helix Angle". *Journal of Tribology* 137, 044501.



УТИЦАЈ ТРЕЊА НА КОНТАКТНЕ НАПОНЕ КОД ЗУПЧАНИКА

Santosh Patil^{1,2}, Saravanan Karuppanan² и Ивана Атанасовска³

¹Департман за машинство

Универзитет „Manipal Jaipur“, Jaipur, Rajasthan, India

E-mail: santosh045@gmail.com/santosh.patil@jaipur.manipal.edu

²Департман за машинство

Универзитет „Teknologi PETRONAS“

Bandar Seri Iskandar, Perak, Malaysia

E-mail: saravanan_karuppanan@utp.edu.my

³Математички институт Српске академије наука и уметности

Кнеза Михаила 36, Београд, Србија

E-mail: iatanasovska@mi.sanu.ac.rs

АПСТРАКТ

Анализа напонског стања код зупчаника постаје веома актуелна област истраживања у циљу смањења отказа и оптимизације конструкције зупчаника. Теоријске анализе када се узме у обзир трење у озупченим системима постају прилично компликоване због постојања неколико фактора који утичу на променљивост трења [1]. Трење у контакту зубаца зупчаника изазива штетне ефекте на контактне површине, при чему не постоји ефикасан метод одређивања ефеката трења на те контакте. Узимање у обзир трења у истраживањима контакта код зупчаника је веома ретко [2–4]. Опет, трење зависи од многих других параметара, који су опет често неодређеног утицаја. Услед овакве непредвидљивости трења и његовог утицаја на контактне напоне код зупчаника, многи зупчасти преносници предмет су превременог отказа. У складу са тим, квантитативне студије утицаја трења на контактни проблем код зупчаника од суштинског су значаја. Да би се решио овај проблем, бездимензиони фактор трења је уведен на основу анализа извршених методом коначних елемената. Он описује утицај трења у прорачунима контактних напон код зупчаника. Функције којима је представљен фактор трења дају оцену утицаја трења код зупчаника и могу се добити на основу параметријских истраживања извршених на различитим паровима еволвентних цилиндричних зупчаника. Ова истраживања показују да постоји повећање од 15% до 22% у контактним напонима при повећању коефицијента трења од 0 до 0.3, за различите случајеве цилиндричних зупчастих парова (са правим и косим зупцима) [3]. Математичка зависност за фактор трења - K_f , верификована је, и њено узимање у обзир обезбеђује бољу процену напона у контакту са трењем за зупчанике. Ово нам даје поједностављену меру утицаја трења у прорачунима контактних напон код зупчаника [5].

Кључне речи: Контактни напони код зупчаника, Метода коначних елемената, Фактор трења

ЛИТЕРАТУРА

1. Wei, Jing, Aiqiang Zhang, and Pan Gao. 2016. A study of spur gear pitting under EHL conditions : Theoretical analysis and experiments. *Tribology International* 94, pp. 146–154.
2. Atanasovska, Ivana. (2009), "Finite Element Model for Stress Analysis and Nonlinear Contact Analysis of Helical Gears". *Scientific Technical Review* 64, pp. 61–69.
3. Patil, Santosh S., Saravanan Karuppanan, Ivana Atanasovska, and Azmi Abdul Wahab. (2014), "Contact Stress Analysis of Helical Gear Pairs, Including Frictional Coefficients". *International Journal of Mechanical Sciences* 85, pp. 205–211.
4. Björling, M. (2014), "Friction in Elastohydrodynamic Lubrication", Doctoral Thesis, Luleå University of Technology.
5. Patil, Santosh S., Saravanan Karuppanan, and Ivana Atanasovska. (2015), "Contact Stress Evaluation of Involute Gear Pairs, Including the Effects of Friction and Helix Angle". *Journal of Tribology* 137, 044501.



CONTACT BETWEEN ABRASIVE PARTICLES AND WORN SURFACES WITHIN ROLLING BEARING

Tatjana M. Lazović, Radivoje M. Mitrović and Žarko Z. Mišković

Department of Machine Design
Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade
Belgrade, Serbia
E-mail: tlazovic@mas.bg.ac.rs

ABSTRACT

The rolling bearing, operating in a contaminated environment, may be exposed to intensive abrasive wear. When contaminant particles enter into the bearing and into the contact zone between rolling elements and ring raceways it leads to their interaction with bearing parts contact surfaces in relative motion. The interaction is based on the plastic deformation (microploughing) or microcutting or a combination thereof. The stress-strain state of contact between the particles and the surfaces of bearing parts depends on particle geometry (shape and size), as well as the relations between particle and surfaces material properties (strength and hardness) [1, 2]. In mathematical modeling of abrasive wear, different authors have used different models of abrasive particles: sphere [3, 4], cube [5] or cone [6]. Geometry and mechanical properties of abrasive particles depend on their origin (metals, non-metals, non-metals of mineral origin) [2]. The assessment of dominant form of abrasive wear, based on the particles geometry and material properties in combination with the material properties of bearing parts is carried out in this paper. Within this, the abrasive particles of mineral origin (quartz and corundum) modelled by shapes of spheres, cubes and cones are considered. The material of the bearing parts is steel of appropriate hardness, according to the technical properties of rolling bearings. Obtained results can be used in the mathematical and numerical modelling of rolling bearings abrasive wear.

Keywords: Rolling bearing, Abrasive wear, Abrasive particles.

REFERENCES

- [1] Lazović, T., Mitrović, R., Ristivojević, M. (2003), “Influence of abrasive particle geometry and material on the abrasive wear mode”, *Proceedings of the 8th International Tribology Conference – ITC’03*, Belgrade, Serbia
- [2] Lazović, T. (2014), *Abrasive wear of rolling bearing* (in Serbian), Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade, Belgrade.
- [3] Morales Espejel, E.G., Gabelli, A. (2016), “Particle entrapment and indentation process in rolling bearings”, *J. Engineering Tribology* 230 (12), pp. 1572-1587.
- [4] Karamis Baki, M. (1996), “A model on wear behaviour of metallic materials working in free abrasive media”, *Proceedings of the 2nd International Conference on Tribology*, Thessaloniki, Greece
- [5] Dwyer-Joyce, R. S., Sayles, R. S., Ioannides, E. (1994), “An investigation into the mechanism of closed three-body abrasive wear”, *Wear* 175, pp. 133-142.
- [6] Hisakado, T., Tanaka, T., Suda, H. (1999), “Effect of abrasive particle size on fraction of debris removed from ploughing volume in abrasive wear”, *Wear* 236, pp. 24-33.



КОНТАКТ АБРАЗИВНИХ ЧЕСТИЦА И ХАБАНИХ ПОВРШИНА У КОТРЉАЈНОМ ЛЕЖАЈУ

Татјана М. Лазовић, Радивоје М. Митровић и Жарко З. Мишковић

Катедра за опште машинске конструкције
Машински факултет, Универзитет у Београду
Београд, Србија

E-mail: tlazovic@mas.bg.ac.rs

АПСТРАКТ

Котрљајни лежај, који ради у контаминираној средини, може бити изложен интензивном абразивном хабању. Када честице нечистоћа доспеју у унутрашњост лежаја и у зону контакта између котрљајних тела и стаза котрљања, долази до њихове интеракције са контактним површинама делова лежаја у релативном кретању. Интеракција је заснована на пластичним деформацијама (микробраздање) или микрорезању или њиховој комбинацији. Напонско деформационо стање контакта између честица и површина делова лежаја зависи од геометрије честица (облик и величина), као и од односа особина материјала честица и контактних површина (чврстоћа и тврдоћа) [1, 2]. У математичком моделирању абразивног хабања, различити аутори користе различите моделе абразивних честица: сферу [3, 4], коцку [5] или конус [6]. Геометрија и механичке особине абразивних честица зависе од њиховог порекла (метали, неметали, неметали минералног порекла) [2]. У овом раду је извршена оцена доминантних облика абразивног хабања, заснована на геометрији и особинама материјала абразивних честица у комбинацији са материјалом делова лежаја. При томе, разматране су абразивне честице минералног порекла (кварц и корунд), моделиране облицима сфере, коцке и конуса. Материјал делова лежаја је челик, одговарајуће тврдоће, сагласно техничким карактеристикама котрљајних лежаја. Добијени резултати се могу користити у математичком и нумеричком моделирању абразивног хабања котрљајних лежаја.

Кључне речи: Котрљајни лежај, абразивно хабање, абразивне честице.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Lazović, T., Mitrović, R., Ristivojević, M. (2003), “Influence of abrasive particle geometry and material on the abrasive wear mode”, *Proceedings of the 8th International Tribology Conference – ITC’03*, Belgrade, Serbia
- [2] Лазовић, Т. (2014), *Абразивно хабање котрљајних лежаја*, Машински факултет Универзитета у Београду, Београд.
- [3] Morales Espejel, E.G., Gabelli, A. (2016), “Particle entrapment and indentation process in rolling bearings”, *J. Engineering Tribology* 230 (12), pp. 1572-1587.
- [4] Karamis Baki, M. (1996), “A model on wear behaviour of metallic materials working in free abrasive media”, *Proceedings of the 2nd International Conference on Tribology*, Thessaloniki, Greece
- [5] Dwyer-Joyce, R. S., Sayles, R. S., Ioannides, E. (1994), “An investigation into the mechanism of closed three-body abrasive wear”, *Wear* 175, pp. 133-142.
- [6] Hisakado, T., Tanaka, T., Suda, H. (1999), “Effect of abrasive particle size on fraction of debris removed from ploughing volume in abrasive wear”, *Wear* 236, pp. 24-33.



A REVIEW OF AS-CAST AND AUSTEMPERED DUCTILE IRON BEHAVIOUR UNDER CAVITATION CONDITIONS

Olivera Erić Cekić¹, Dragan Rajnović², Leposava Sidjanin², Sebastian Baloš²

¹Inovation center, Faculty of Mechanical Engineering,
University of Belgrade, Belgrade, Serbia
E-mail olivera66eric@gmail.com

²Department of Production Engineering, Faculty of Technical Sciences,
University of Novi Sad, Novi Sad, Serbia
E-mail: draganr@uns.ac.rs , lepas@uns.ac.rs , sebab@uns.ac.rs

ABSTRACT

The primary focus of this work concerns the surface damage of a cast iron and austempered ductile iron (ADI) exhibited during different time interval of cavitation testing. The conclusions were based on our own results and compared with literature data.

The ADI is produced by austempering of a ductile iron, and can be successfully used for pump bodies (of various sizes), as a replacement for low-alloy manganese steel castings, due to its high strength, ductility and resistance to wear. However, it is known that in pumps, cavitation damage occurs on the working surface. This represents a limiting factor in the choice of materials.

For that reason, in this paper the results of cavitation resistance of unalloyed ductile iron and ADI material during the cavitation testing by the ultrasonic vibration method with stationary pattern are presented. Comprehensive morphological examinations of cavitation surface damage were made on all specimens (unalloyed ductile iron and ADI material) by means of light microscopy (LM) and scanning electron microscopy (SEM).

In previous studies, the cavitation resistance of cast irons (grey cast iron, malleable cast iron and ductile iron) was found to be affected by factors such as grain size, shape and distribution of graphite, as well as the strength of the matrix [1-3]. It was found that ductile iron, which is the starting material for the ADI, possesses better erosion resistance than a grey cast iron [4]. With increasing the time of testing the attacked area of the specimen became larger with more pits, micropits and surface deformation. The cavitation rate of the ferritic ductile cast iron is 1.85 times higher compared with that of carbon steel of the similar hardness [5, 6].

Based on the results of cavitation tests, investigations confirmed that the cavitation resistance of ADI materials mostly depends on the size, shape and distribution of graphite as well as the strength of the matrix, as in the case of cast irons, also. However, in the case of the ADI, the additional resistance to cavitation can be achieved through phase transformation of the base metal during cavitation damage, the “SATRAM” phenomenon (stress assisted transformation into martensite) [7, 8]. It was found that unalloyed ADI material possesses improved resistance to cavitation in the water environment, with increased ductility and resistance to impact loads, compared to standard ADI materials that are widely used in the industrial practice [9]. Enhanced characteristics of the ADI materials are achieved due to the presence of metastable retained austenite which through “SATRAM” mechanism transforms into martensite on the surface. Martensite presence increases resistance to cavitation, while the retained austenite enables high ductility and impact resistance [10, 11, 12].

Keywords: Cavitation, ductile cast iron, austempered ductile iron, SATRAM phenomenon



REFERENCES

- [1] Tanaka Y, Kage H. Development and application of austempered spheroidal graphite cast iron. *Mater Trans JIM* 1992; 33:543–557.
- [2] Hattori S, Kitagawa T. Analysis of cavitation erosion resistance of cast iron and nonferrous metals based on database and comparison with carbon steel data. *Wear* 2010;269:pp. 443–448.
- [3] M. Dojcinovic, O. Eric, D. Rajnovic, L. Sidjanin, S. Balos: The morphology of ductile cast iron surface damaged by cavitation, *Metallurgical and Materials Engineering (Metalurgija)*, ISSN 2217-8961, 18/3, pp.165-176, 2012.
- [4] Bayati, H., Elliott, R.: Role of austenite in promoting ductility in an austempered ductile iron, *Materials Science and Technology*, 13/4, (1997), pp.319-326..
- [5] O. Eric Cekic, M. Dojcinovic, S. Balos, D. Rajnovic, L. Sidjanin: The SEM study of cavitation damage of as-cast ductile iron, *Proceedings of Microscopy Conference - MC2013*, Part 1, Regensburg, Germany, August 25 - 30, 2013, pp.666-667.
- [6] Marina Dojčinović, O. Erić Cekić, Dragan Rajnović, Leposava Šidjanin, Sebastian Balos: The morphology of austempered ductile iron surface damaged by cavitation, *45th International October Conference on Mining and Metallurgy*, Bor, Serbia, October 16-19, 2013, pp. 357-360, ISBN 978-68-6305-012-9, October, 2013.
- [7] M. Dojčinović, O. Erić, D. Rajnović, L. Šidjanin, S. Baloš: Effect of austempering temperature on cavitation behavior of unalloyed ADI material, *Materials Characterization*, Vol. 82, pp. 66-72, ISSN 1044-5803, 2013.
- [8] Wu CZ, Chen YJ, Shih TS. Phase transformation in austempered ductile iron by microjet impact, *Materials Characterization* (2002), 48, pp.43-54.
- [9] Rajnovic, D., Balos, S., Sidjanin, L., Eric Cekic, O., Grbovic Novakovic, J.: Tensile properties of ADI material in water and gaseous environments, *Materials Characterization*, Vol.101, pp.26-33, *Materials Science*, ISSN 1044-5803, 2015.
- [10] Modified ASTM G 32 Ultrasonically Induced Cavitation Test Method, ASTM G 32-92 (1992).
- [11] O. Eric Cekic, D. Rajnovic, L. Sidjanin, S. Balos: The morphology of austempered ductile iron surface damaged by cavitation, *45th International October Conference on Mining and Metallurgy*, Bor, Serbia, October 16-19, 2013, pp.357-360 (ISBN 978-68-6305-012-9)
- [12] Balos, M. Dramicanin, M. Dojcinovic, D. Rajnovic, L. Sidjanin, O. Eric Cekic, D. Labus: Cavitation of unalloyed ADI material in water, *45th International October Conference on Mining and Metallurgy*, Bor, Serbia, October 16-19, 2013, 499-502 (ISBN 978-68-6305-012-9).



ПРЕГЛЕД ПОНАШАЊА ЛИВЕНОГ ГВОЖЂА И АУСТЕМПЕРОВАНОГ НОДУЛАРНОГ ЛИВА У УСЛОВИМА КАВИТАЦИЈЕ

Оливера Ерић Цекић¹, Драган Рајновић², Лепосава Шиђанин², Себастиан Балаш²

¹Иновациони центар Машинског факултета у Београду, Машински факултет у Београду,
Универзитет у Београду, Београд, Србија
E-mail: olivera66eric@gmail.com

²Департман за производно машинство, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду,
Нови Сад, Србија
E-mail: draganr@uns.ac.rs, lepas@uns.ac.rs, sebab@uns.ac.rs

АПСТРАКТ

Главни акценат рада је приказ промене морфологије површине са променом времена испитивања ливеног гвожђа и аустемперованог нодуларног лива (АДИ) изложених дејству кавитације. Произашли закључци су добијени на основу сопствених резултата и у поређењу са литературним схватањима.

АДИ материјал, који се добија термичком обрадом нодуларног лива (аустемперовањем) може се успешно користити и за тела пумпи (различитих димензија), као замена за ниско легиране манганске челичне ливове, због своје високе чврстоће, дуктилности и отпорности на хабање. Међутим, познато је да се код пумпи јављају кавитациона оштећења радних површина што представља ограничавајући фактор код избора материјала.

Из тог разлога, у овом раду су приказани резултати кавитационе отпорности нелегираних нодуларног лива и АДИ материјала добијени при испитивању ултразвучно-вибрационом методом са стационарним узорком. Морфологија оштећења насталог дејством кавитационе површине ливеног гвожђа и АДИ материјала праћена је светлосним микроскопом и скенинг електронским микроскопом (СЕМ).

Ранија истраживања показала су да кавитациона отпорност ливеног гвожђа (сиви лив, темпер лив и нодуларни лив) зависи од величине, облика и распореда графита као и од чврстоће металне основе [1-3]. Нодуларни лив који је полазни материјал за АДИ материјал има бољу отпорност према кавитационој ерозији у поређењу са сивим ливом [4]. Повећање времена излагања дејству кавитације условљава повећан степен оштећења металне основе са већим бројем јамица и већим степеном деформације површине. Брзина кавитације феритног нодуларног лива у односу на угљенични челик одговарајуће тврдоће је и до 1.85 пута већа [5, 6].

На основу резултата испитивања кавитације потврђено је да отпор према кавитацији код АДИ материјала, такође, као и код ливених гвожђа зависи од величине, облика и дистрибуције графита, као и чврстоће металне основе. Међутим, код АДИ материјала, додатна отпорност на кавитацију може се остварити и фазном трансформацијом металне основе при кавитацији, механизмом „SATRAM“ [7, 8]. Утврђено је да нелегирани АДИ материјал поседује побољшану отпорност на кавитацију у воденој средини, уз повећану дуктилност и отпорност на ударна оптерећења, у односу на стандардне АДИ материјале који се широко користе у индустријској пракси [9]. Побољшане карактеристике код АДИ материјала постигнуте су захваљујући присуству метастабилног задржаног аустенита који се механизмом „SATRAM“ трансформише у мартензит на површини, чиме се повећава отпорност на кавитацију, док у запремини задржани аустенит омогућава високу дуктилност и отпорност на ударе [10, 11, 12].

Кључне речи: Кавитација, нодуларни лив, аустемперовани нодуларни лив, SATRAM феномен



ЛИТЕРАТУРА

- [1] Tanaka Y, Kage H. “Development and application of austempered spheroidal graphite cast iron”, *Mater Trans JIM* 1992; 33:pp.543–557.
- [2] Hattori S, Kitagawa T. “Analysis of cavitation erosion resistance of cast iron and nonferrous metals based on database and comparison with carbon steel data”, *Wear* 2010;269:pp. 443–448.
- [3] M. Dojcinovic, O. Eric, D. Rajnovic, L. Sidjanin, S. Balos: “The morphology of ductile cast iron surface damaged by cavitation”, *Metallurgical and Materials Engineering (Metalurgija)*, ISSN 2217-8961, 18/3, pp.165-176, 2012.
- [4] Bayati, H., Elliott, R.: “Role of austenite in promoting ductility in an austempered ductile iron”, *Materials Science and Technology*, 13/4, (1997), pp.319-326..
- [5] O. Eric Cekic, M. Dojcinovic, S. Balos, D. Rajnovic, L. Sidjanin: “The SEM study of cavitation damage of as-cast ductile iron”, *Proceedings of Microscopy Conference - MC2013*, Part 1, Regensburg, Germany, August 25 - 30, 2013, pp.666-667.
- [6] Marina Dojčinović, O. Erić Cekić, Dragan Rajnović, Leposava Šidjanin, Sebastian Balos: “The morphology of austempered ductile iron surface damaged by cavitation”, *45th International October Conference on Mining and Metallurgy*, Bor, Serbia, October 16-19, 2013, pp. 357-360, ISBN 978-68-6305-012-9, October, 2013.
- [7] M. Dojčinović, O. Erić, D. Rajnović, L. Šidjanin, S. Baloš: “Effect of austempering temperature on cavitation behavior of unalloyed ADI material”, *Materials Characterization*, Vol. 82, pp. 66-72, ISSN 1044-5803, 2013.
- [8] Wu CZ, Chen YJ, Shih TS. “Phase transformation in austempered ductile iron by microjet impact”, *Materials Characterization* (2002), 48, pp.43-54.
- [9] Rajnovic, D., Balos, S., Sidjanin, L., Eric Cekic, O., Grbovic Novakovic, J.: “Tensile properties of ADI material in water and gaseous environments”, *Materials Characterization*, Vol.101, pp.26-33, *Materials Science*, ISSN 1044-5803, 2015.
- [10] Modified ASTM G 32 Ultrasonically Induced Cavitation Test Method, ASTM G 32-92 (1992).
- [11] O. Eric Cekic, D. Rajnovic, L. Sidjanin, S. Balos: “The morphology of austempered ductile iron surface damaged by cavitation”, *45th International October Conference on Mining and Metallurgy*, Bor, Serbia, October 16-19, 2013, pp.357-360 (ISBN 978-68-6305-012-9)
- [12] Balos, M. Dramicanin, M. Dojcinovic, D. Rajnovic, L. Sidjanin, O. Eric Cekic, D. Labus: “Cavitation of unalloyed ADI material in water”, *45th International October Conference on Mining and Metallurgy*, Bor, Serbia, October 16-19, 2013, 499-502 (ISBN 978-68-6305-012-9).



WHEEL–RAIL CONTACT FORCES – EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL APPROACH

Dragan D. Milković and Goran Ž. Simić

Department of Rail Vehicles
University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering
Belgrade, Serbia

E-mail: dmilkovic@mas.bg.ac.rs, gsimic@mas.bg.ac.rs, web page: www.mas.bg.ac.rs

ABSTRACT

Wheel–rail contact presents the most complex problem to be solved within the railway vehicle dynamics. The main task in this research area is determining the wheel–rail contact forces, where the pure mechanical aspect of the problem is closely connected with geometrical one. Considering that wheel and rail are deformable, real contact is realized over a small area in the region of contact point determined as in the case of contact between two rigid bodies.

Wheel–rail rolling contact is the base principle for realization of the train motion along the tracks. Historically, revolution in the railway vehicle dynamics started when in 1926 Carter introduced creepage in the analysis of this phenomenon. One of the important contributions to development of contact theories was given by Kalker in 1967, who studied rolling contact between two elastic bodies and depending on required level of accuracy, available computational resource and level of simplification, he defined several contact theories. Kalker’s work along with development of numerical methods provided broad possibilities for development of railway vehicle dynamics through computer modelling and also initiated further development in this area.

For railway vehicles, application of the multibody system simulation (MBS) has significant importance, due to possibilities of detailed modelling vehicle–track interaction, including complex wheel–rail geometry, non-conservative contact forces, as well as large number of nonlinearities in the suspension system.

Geometrical aspect of wheel–rail contact depends on: wheel and rail profiles, track gauge, outer lateral distance between wheel flanges, rail lateral cant, etc. In addition to these parameters, railway vehicle dynamics and contact forces depend on vehicle parameters, track parameters and service conditions.

Considering that contact between the wheel and rail is moving along tracks, it is very difficult to establish system which would provide accurate and reliable measurement of contact forces. This paper presents own research, numerical and experimental, on determination of the wheel rail contact forces. Experimental measurements were performed with several types of railway vehicles using own developed wayside system for contact forces measurement and laser based system for wheel to rail angle of attack measurements, significant for estimation of the wear rate and safety against derailment.

Obtained experimental results were compared with numerical simulations using specialized software package VAMPIRE. Conclusion about possibilities and adequacy of the use of both approaches is presented.

Keywords: Wheel–rail contact, Forces, Measurements.

REFERENCES

- [1] Iwnicki, S. (2006), A Handbook of Railway Vehicle Dynamics, CRC Press: Boca Raton, FL.
- [2] Milković, D., Simić, G., Jakovljević, Ž., Tanasković, J., Lučanin, V. (2013), “Wayside System for Wheel–Rail Contact Forces Measurements,” *Measurement* 46, pp. 3308-3318.
- [3] Milković, D., Simić, G., Tanasković, J., Lučanin, V., Radulović, S. (2017), “Uncertainty of the Wheel–Rail angle of attack measurements using laser based wayside system,” *FME Transactions* 45(1), pp. 69-76.



СИЛЕ У ДОДИРУ ТОЧАК–ШИНА – ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ И ПРОРАЧУНСКИ ПРИСТУП

Драган Д. Милковић и Горан Ж. Симић

Катедра за шинска возила
Универзитет у Београду, Машински факултет
Београд, Србија

E-mail: dmilkovic@mas.bg.ac.rs, gsimic@mas.bg.ac.rs, web page: www.mas.bg.ac.rs

АПСТРАКТ

Додир точак–шина представља најкомплекснији сегмент динамике шинских возила. У оквиру истраживања у тој области, главни задатак је одређивање сила у додиру точак–шина, при чему је чисто механички аспект проблема битно везан са геометријским. С обзиром да су точак и шина деформабилни, стварни додир се обавља по малој површини у околини тачке додира, која би одговарала додиру крутих тела.

Додир представља основу за остваривање кретања шинског возила по колосеку и у принципу се остварује котрљањем. Историјски гледано револуција у анализи динамике шинских возила је почела када је Картер (Carter) 1926. године у анализу овог феномена први пут увео појам клизања. Један од значајнијих доприноса развоју теорија додира дао је Калкер (Kalker 1967), који је проучавао додир при котрљању између два еластична тела и у зависности од потребног степена тачности, расположивог рачунарског ресурса и степена упрошћења дефинисао више контактних теорија. Калкеров рад и развој нумеричких метода су широко отворили могућности анализе динамике возила кроз компјутерско моделирање и иницирале велики број истраживања у овој области.

За железничка возила посебан значај има примена анализе система више тела (Multibody system simulation) којом се комплексни однос између возила и колосека може веома детаљно моделирати, узимајући у обзир комплексну геометрију точка и шине, неконзервативне силе које настају у њиховом додиру, као и многе нелинеарности у елементима система ослањања.

Имајући у виду да се додир између точка и шине при кретању премешта дуж колосека, веома је тешко успоставити систем који ће обезбедити тачно и поуздано мерење сила које у том додиру настају. У овом раду су представљена сопствена истраживања, нумеричка и експериментална, на одређивању сила у додиру точак–шина. Експериментална мерења са више возила су реализована применом сопствених система за мерење сила у додиру точак–шина посредством шине и ласерског система за мерење угла налетања точка на шину, значајних за анализу феномена хабања и проверу сигурности од исклизнућа.

Добијени експериментални резултати су упоређени са резултатима симулационих прорачуна, применом специјализованог софтверског пакета VAMPIRE. Дата је критичка анализа резултата и могућности примене оба приступа.

Кључне речи: Додир точак–шина, Силе, Мерење.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Iwnicki, S. (2006), A Handbook of Railway Vehicle Dynamics, CRC Press: Boca Raton, FL.
- [2] Milković, D., Simić, G., Jakovljević, Ž., Tanasković, J., Lučanin, V. (2013), “Wayside System for Wheel–Rail Contact Forces Measurements,” Measurement 46, pp. 3308–3318.
- [3] Milković, D., Simić, G., Tanasković, J., Lučanin, V., Radulović, S. (2017), “Uncertainty of the Wheel–Rail angle of attack measurements using laser based wayside system,” FME Transactions 45(1), pp. 69–76.



CONTACT MECHANICS OF WHEEL/BRAKE BLOCK ON RAILWAY VEHICLES

Marija Vukšić Popović¹, Saša Radulović²

¹ College of Professional Railway Studies
Belgrade, Serbia
E-mail: vuksicpopovic@bvcom.net

² University of Belgrade-Faculty of Mechanical Engineering,
Belgrade, Serbia
E-mail: sasa.radulovic76@gmail.com

ABSTRACT

Running and braking of railway vehicles is possible by the wheel/rail contact friction and the wheel/brake block contact friction. The forces in wheel/brake block contact vary on numerous parameters. Due to increased requirements for railway vehicles regarding environmental protection and the reduction of noise levels in recent years, replacement of brake block materials was proposed.

The aim is to analyze the forces in wheel/brake block contact and parameters that affect the friction coefficient, regardless of the brake blocks type or materials. Stick-slip phenomena were considered in wheel/brake block contact. Causes of vibration and their intensity are analyzed. The lecture shows the consequences of contact forces which observed in service, such as wear and defects, on wheels and brake block of real railway vehicles.

Keywords: Contact Mechanics, Wheel, Rail, Brake Block, Railway Vehicles, friction coefficient.

REFERENCES

- [1] Wojewoda J., Stefanski A., Wiercigroch, M., Kapitaniak, T. (2008), „Hysteretic effects of dry friction: modelling and experimental studies“, Philosophical Transactions of the Royal Society A (2008) 366, 747–765, doi:10.1098/rsta.2007.2125.
- [2] Simić G., Milković D. (2009), „Failure analysis of block brake unit support of EMU“, DA26th Danubia-Adria Symposium S26, Austria
- [3] Ikeuchi K., Handa K., Lundén R., Vernersson T. (2016), „Wheel tread profile evolution for combined block braking and wheel–rail contact: Results from dynamometer experiments“, Wear 366-367 (2016) 310–315
- [4] Kim M. (2011), „Vibration Analysis of Tread Brake Block in the Brake Dynamometer for the High Speed Train“, International Journal of Systems applications, Engineering & Development, Issue 1, Vol. 5, 2011
- [5] UIC 541-4 Brakes – Brakes with composite brake blocks – General conditions for certification of composite brake blocks, 4th edition, 2010, International Union of Railways
- [6] Zusammenstellung der Versuchsergebnisse zur Verifikationsuntersuchung der Verbundstoffbremsklotzsohle LP-BK L320LL BK175 (TYP LL), (2012), Bremskerl Reibbelagwerke Emmerling GMBH & co. KG, Leersingen.
- [7] Елаборат о испитивању кочних перформанси теретног вагона опремљеног композитним умесима типа ЛЛ, производње ливница „Пожега“ (2013), Институт „Кирило Савић“, Београд
- [8] Извештај о експлоатационом праћењу композитних уметака типа ЛЛ, производње „Јединство“ - Ливница „Пожега“ (2015), Институт „Кирило Савић“, Београд.



МЕХАНИКА КОНТАКТА ТОЧАК/ПАПУЧА ЖЕЛЕЗНИЧКИХ ВОЗИЛА

Марија Н. Вукшић Поповић¹, Саша З. Радуловић²

¹Висока железничка школа струковних студија

Београд, Србија

E-mail: vuksicpopovic@bvcom.net

²Катедра за шинска возила

Универзитет у Београду - Машински факултет

Београд, Србија

E-mail: sasa.radulovic76@gmail.com

АПСТРАКТ

Кретање и заустављање железничких возила омогућено је силама трења у контакту точак/шина и точак/папуча. Силе које се јављају у контакту точак/папуча зависе од бројних параметара. Због повећаних и строжијих захтева који се последњих година постављају пред железничка возила, са становишта заштите околине и смањења нивоа буке, предложена је замена папуча од сивог лива папучама од композитних материјала.

Циљ рада је анализа сила у контакту точак/папуча и параметара који утичу на коефицијент трења, независно од типа и материјала папуча. Разматране су фаза пријањања и клизања које се јављају у контакту точак/папуча. Анализирани су узроци појаве вибрација и њихов интезитет. У раду су приказане последице сила у контакту, као што су хабање и оштећења, на точковима и папучама реалних железничких возила, која су регистрована у експлоатацији.

Кључне речи: Контактна механика, точак, шина, папуча, железничка возила, коефицијент трења.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Wojewoda J., Stefanski A., Wiercigroch, M., Kapitaniak, T. (2008), „Hysteretic effects of dry friction: modelling and experimental studies“, *Philosophical Transactions of the Royal Society A* (2008) 366, 747–765, doi:10.1098/rsta.2007.2125.
- [2] Simić G., Milković D. (2009), „Failure analysis of block brake unit support of EMU“, *DA26th Danubia-Adria Symposium S26*, Austria
- [3] Ikeuchi K., Handa K., Lundén R., Vernersson T. (2016), „Wheel tread profile evolution for combined block braking and wheel–rail contact: Results from dynamometer experiments“, *Wear* 366-367 (2016) 310–315
- [4] Kim M. (2011), „Vibration Analysis of Tread Brake Block in the Brake Dynamometer for the High Speed Train“, *International Journal of Systems applications, Engineering & Development*, Issue 1, Vol. 5, 2011
- [5] UIC 541-4 Brakes – Brakes with composite brake blocks – General conditions for certification of composite brake blocks, 4th edition, 2010, International Union of Railways
- [6] Zusammenstellung der Versuchsergebnisse zur Verifikationsuntersuchung der Verbundstoffbremsklotzsohle LP-BK L320LL BK175 (TYP LL), (2012), Bremskerl Reibbelagwerke Emmerling GMBH & co. KG, Leerseringen.
- [7] Елаборат о испитивању кочних перформанси теретног вагона опремљеног композитним умецима типа ЛЛ, производње ливница „Пожега“ (2013), Институт „Кирило Савић“, Београд
- [8] Извештај о експлоатационом праћењу композитних уметака типа ЛЛ, производње „Јединство“ - Ливница „Пожега“ (2015), Институт „Кирило Савић“, Београд



*Dynamics of hybrid systems
with complex structures.
Mechanics of materials
(Project 174001)*

Project Leader: **Professor Katica
(Stevanović) Hedrih**



Home page of the Project activities:

http://www.mi.sanu.ac.rs/novi_sajt/research/projects/174001a.php

The project has produced original scientific results in the following themes:

1. Elements of mathematical phenomenology and applications (in Mechanics, in nonlinear dynamics in general, in integration of scientific knowledge in reduction of number of models of dynamical systems).
2. Analytical mechanics of discrete fractional order systems; Derived a series of theorems.
3. Nonlinear and rare phenomena in dynamics of hybrid systems with coupled structures of rigid and deformable bodies; Transfer of energy through a system and subsystems; Synchronization of subsystems.
4. Models of biodynamical oscillators; Phenomenon of transfer of signals, information and energy through their complex structures; Oscillations of DNA helix chains and discrete continuum models of Zone Pelucida.
5. Mechanics of discrete continuum models. Dynamics of coupled structures of deformable bodies and discrete continuum layers with different constitutive relations: Linear elastic, nonlinear elastic, visco-elastic, hereditary and fractional order properties.
6. Phenomenon of dynamics of systems with friction and vibro-impact system; Theory of collision of rolling bodies; Dynamics of billiards.
7. Mechanics of damage and fracture.

8. Control of systems with delay and theorems of stability.
9. Continuation of doctoral research in accordance with scientific based themes by younger PhD students. 13 PhD students, younger than 30 years of age, are included in the project team and its scientific research. All of them were participants of the two year seminar. So far, 12 PhD students completed all courses at doctoral study programs; 6 candidates defender their doctoral dissertations.

Other topics considered in the framework of the project are: nonlinear transformation, rheonomic system, nonholonomic constraints, mass moment vectors, gyro-rotor dynamics, approximation, amplitude-frequency characteristic, stability, synchronization, theory of collision, vibro-impact system, dynamics of billiards, energy analysis, non-local theory and applications, biomechanical oscillators, control motion. The project collaborators participated in the conferences ENOC 2011 and 2014, IUTAM ICTAM 2012, ESMC 2012, Mini-symposium Nonlinear Dynamics 2012, 2014, 2015, etc. A member of the project was awarded EuroMech Young scientific prize Roma 2011.



Mini-symposium “Contact Mechanics: Theory and Applications”

Mathematical Institute of SASA and Project OI 174001,
Belgrade, Serbia, March 14, 2017



dr Ivana D. Atanasovska, Mech. Eng..

Address: Mathematical Institute of SASA,
Kneza Mihaila 36, 11001 Belgrade, Serbia

Tel: +381 69 2221 317 (mobile) ; +381 11 6128824 (home)

E-mails: iatanasovska@mi.sanu.ac.rs; iviatanasov@yahoo.com

Born on 10 June 1971 in Kumanovo.

Married and has two sons, Aleksandar and Nenad.

Ivana Atanasovska takes a part as a researcher in the research projects which are coordinated by the Mathematical Institute of the Serbian Academy of Sciences and Arts (SASA) from 2006. She is a member of Serbian Society of Mechanics and Society for Structural Integrity and Life, Belgrade. She was the member of research teams in two international research projects started in 2013. One of them is innovation project funding in FP7 framework program and the other is funding by the University Teknologi PETRONAS, Malaysia. She has a successful collaboration with “School of Aerospace, Mechanical and Manufacturing Engineering RMIT University, Melbourne, Australia” and with Faculty of Mechanical engineering, University of Maribor, Slovenia.

She was studying on the Department for Process Engineering and graduated in 1994 with graduate thesis in Machine elements with the best marks. She received the M.Sc. degree in 1999 from the Faculty of Mechanical Engineering, University of Kragujevac, from the Department of mechanical construction and mechanization. The Ph.D. degree received in 2004 from the Faculty of Mechanical Engineering, University of Kragujevac under the supervision of Prof. Vera Nikolic Stanojevic. The title of her Ph.D. thesis was: “Influence of load distribution on the load capacity of involute cylindrical gears”.

She worked at the Faculty of Mechanical Engineering, University of Kragujevac at the position of Graduate Research Assistant in the Department of mechanical construction and mechanization from 1995 to 1997. In this period she worked in the scientific research projects funding from The Ministry of science, technology and development of Republic of Serbia, and gave the contribution in the preparation and carrying out the practice in teaching courses: Machine elements, Calculations of mechanical constructions and Design methods.

From December 1997 to 2005 she worked at different professional positions in mechanical engineering and through different practical tasks developed the competence for carrier of scientist and researcher who successfully connected the research tasks and practical implementation. She worked in this period in the Agency for Recycling of Ministry of life environment protection of Republic of Serbia, as well as in Unit for publishing in PE POST “Serbia”.

Ivana Atanasovska received her Ph.D in June 2004 and then appointment for Assistant Professor in Department for information technologies in Faculty of Management in industry, Krusevac. From 2006 to 2014 worked at the position of Assistant Research Professor in Institute for material testing, Belgrade and Institute “Kirilo Savic”, Belgrade. From September 2014 to May 2016 worked in the Innovation center of the Faculty of Mechanical engineering, University of Belgrade. In December 2014 she received scientific title Associate Research Professor and from May 2016 works in the Mathematical Institute of the Serbian Academy of Sciences and Arts. She is dedicated to the science and research activities and to the application of numerical methods and applied mechanics in real engineering problems. Last years she focuses the research activities on nonlinear phenomena and nonlinear dynamics of real mechanical systems. Also, significantly motivates young researchers and professional staff in the current and past professional positions in their research.

Ivana Atanasovska published more than 100 papers as author or co-author, among them: more of 15 papers in international journals and significant number in national journals, with citations in international and national journals indexed in reference bases. She is the reviewer in leading international journal in the area of machine elements and mechanisms *Scientific Journal Mechanism and Machine Theory*, published by Elsevier, as well as the member of the international editorial board of the *International Journal for traffic and transport engineering (IJTTE)*. Also, she was a member of the organization committees of few national and international scientific conferences. Ivana Atanasovska is president in Commission for machine safety and permanent member in Commission for technical drawing in Institute for standardization in Republic of Serbia.



Проф. др Радивоје Митровић рођен је 11.03.1957. (у Лопарама, Република Српска - БиХ). На Машинском факултету Универзитета у Београду дипломирао је 1981, магистрирао 1988. и докторирао 1992. године.

Током студија обављао је дужност председника Студентске конференције ССОЈ (1978. године), а у периоду 1979-1980. – дужност студента продекана Машинског факултета. Професионалну каријеру започео је као конструктор-технолог у фабрици ИКЛ - Индустрија котрљајних лежаја, а од 1983. године стално је запослен на Машинском факултету. Поред обавеза асистента-приправника, асистента, доцента, ванредног и редовног професора, обављао је више руководећих дужности: члан Савета Факултета, шеф Катедре за опште машинске конструкције и др. Његово ангажовање је препознато и признато, па је 2015. године изабран за декана Машинског факултета.

Сем ангажовања у просвети и образовању, Радивоје Митровић обављао је велики број јавних функција: заменик министра за науку и технологију (1998-2000), министра за науку и технологију Владе Републике Србије (2000-2001.), државног секретара у Министарству просвете, науке и технолошког развоја Владе Републике Србије (2008. до 2013.) и др.

Више пута се стручно усавршавао у иностранству, у Савезном научноистраживачком институту за котрљајне лежаје ВНИИПП, Москва, Русија (1987.) и у Брну, Чешка (од 1990. до 1991.) – као стипендиста Чешке владе и Владе Републике Србије.

Као ментор и члан, учествовао је у више комисија за одбрану магистарских теза и докторских дисертација, на матичном и другим факултетима. Руководилац је лабораторије ЛИМЕС (Лабораторије за испитивање машинских елемената и система) – акредитоване од 2008. године.

Као сарадник и руководиоц учествовао је у реализацији бројних научноистраживачких и стручних пројеката из области прорачуна машинских елемената и система, испитивања котрљајних лежаја, техничког законодавства, управљања инжењерским пројектима, директива ЕУ, конструисања машина, поузданости машинских елемената и система.

Био је члан Научно-техничког савета комитета за стандардизацију OSPP при SEV (Организација произвођача и потрошача котрљајних лежаја) и националне UNESCO комисије.

Члан је Асоцијације за Дизајн, Елементе и Конструкције – АДЕКО (од децембра 2014. године је председник), Друштва за Интегритет и Век Конструкција – ДИВК, Српског друштва за трибологију, Српског друштва за механику итд. Од 2005. до 2008. године је био председник управног одбора Института за Технологију Нуклеарних и Минералних Сировина – ИТНМС. У ИКЛ-у (Индустрија котрљајућих лежаја) је од 1995-2000. године био председник управног одбора, а од 2003-2006. – његов пуноправни члан.

Аутор је и коаутор више од двадесет уџбеника, збирки задатака и приручника, две монографије и шест техничких решења. Аутор је два реализована и призната патента. Објавио је преко 150 радова у међународним и домаћим часописима и зборницима са научних и стручних скупова.

Добитник је Награде Привредне коморе Београда за магистарски рад и докторску дисертацију (1988. и 1992. године) и Златне медаље Никола Тесла, Савеза проналазача и техничких унапређења Београда (2016. године).

Од 1995. године је председник Скупштине кошаркашког клуба ОКК Београд.

Ожењен је, отац два сина.

Biography and References:

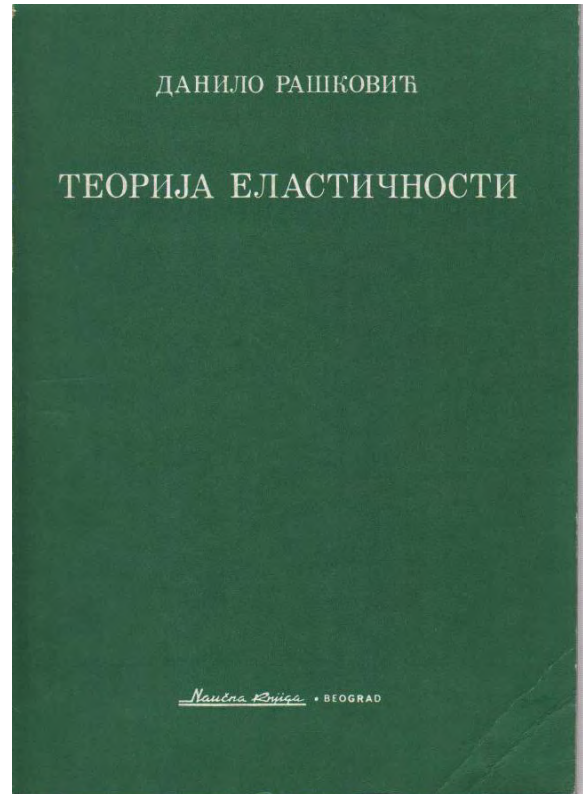
<http://omk.mas.bg.ac.rs/index.php/zaposleni/4-prof-dr-radivoje-mitrovic-redovni-profesor>



**Prof. dr ing. Danilo Rašković about contact phenomenon,
From the book „Theory of Elasticity“ (in Serbian), 1985**



Prof. dr dipl. Math. Danilo P. Raskovic (1910-1985)



182 ТЕОРИЈА ЕЛАСТИЧНОСТИ

Датум издања: 1985. године. Број издања: 1. Број примерака: 1000. Цена: 100,00 динара. Место издања: Београд. Издавач: НУК, Београд.

Овај труд представља један од најважнијих радова проф. др. инж. Данила Раškovićа у области теорије еластичности. У њему су детаљно обрађени проблеми контактног напрезања, који су од велике пракси.

У раду су изложени резултати добијени применом метода конформних картица, који омогућавају добијање тачних решења за разне облике контактирајућих тела. Особито су важни резултати добијени за случај контакта две еластичне кугле, који су широко коришћени у литератури.

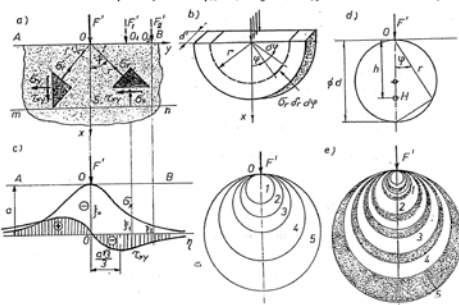
Овај труд је неопходан за све који се баве теоријом еластичности и контактног напрезања.

8. КОНТАКТНА НАПРЕЗАЊА

Када се два еластична тела при одсуству узајамног притиска додирују у тачки или по линији, а затим се под дејством сила приближују једно другом, тада се услед еластичних деформација појављују додирне (контактне) поврине на којима дејствују напони који се називају контактним напонима. Ово напрезање је локалног карактера, и напони брзо опадају удаљавањем од контактне поврине. Како су ови проблеми важни у техничкој пракси, проучићемо претходно неке специјалне случајеве оптерећења полуравни и еластичног полупростора.

8.1. Еластична полураван (Flamant-ов проблем). — На праволинијски хоризонтални крај AB бескојичне танке плоче дебљине δ , која се, простирајући се бескојично напред и назад, дејствује у тачки O концентрисана сила F која је равномерно распоређена по дебљини танке плоче, па је $F' = F/\delta$ оптерећење по јединици дебљине (слика 8.1. а). Проблем Flamant-а је специјални случај оптерећења клина аксијалном силом (чл. 7.11), па се за $\beta=0$; $\alpha=\pi/2$, из (7.125), добија израз за компонентне напоне:

$$\sigma_r = -(2F' \cos \varphi) / \pi r; \quad \sigma_\varphi = 0; \quad \tau_{r\varphi} = 0. \quad (8.1. а)$$



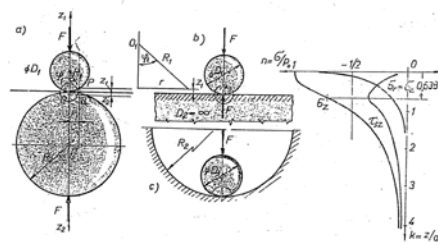
Слика 8.1. — Flamant-ов проблем

264

Теорија еластичности

ром на важност ових резултата у пракси**, детаљније ћемо проучити сва три случаја.

8.10.1. Узајамни притисак двеју еластичних кугли. — Две еластичне кугле полупречника R_1 и R_2 , од различитог материјала, модула еластичности E_1 и E_2 , Poisson-ових коефицијената μ_1 и μ_2 , додирују се у тачки O и имају заједничку тангентцијалну раван ($z=0$) која је контурна раван. (слика 8.17.а). Обе кугле имају заједничку осу Oz — осу. Нека права пара-



Слика 8.17. — Узајамни притисак двеју еластичних кугли

лелна Oz — оси на малом одстојању r од ње продире кугле у тачкама P и Q . Растојање тачке P од тангентцијалне равни ($z=0$) је

$$z_1 = R_1 (1 - \cos \varphi_1) = R_1 [1 - \sqrt{1 - \sin^2 \varphi_1}] = R_1 \left[1 - \sqrt{1 - \frac{r^2}{R_1^2}} \right] = R_1 \left[1 - \left(1 - \frac{r^2}{2 R_1^2} \right) \right] = \frac{r^2}{2 R_1}.$$

јер је $r \gg R_1$. Аналогно томе добија се и растојање z_2 тачке Q од равни, па су

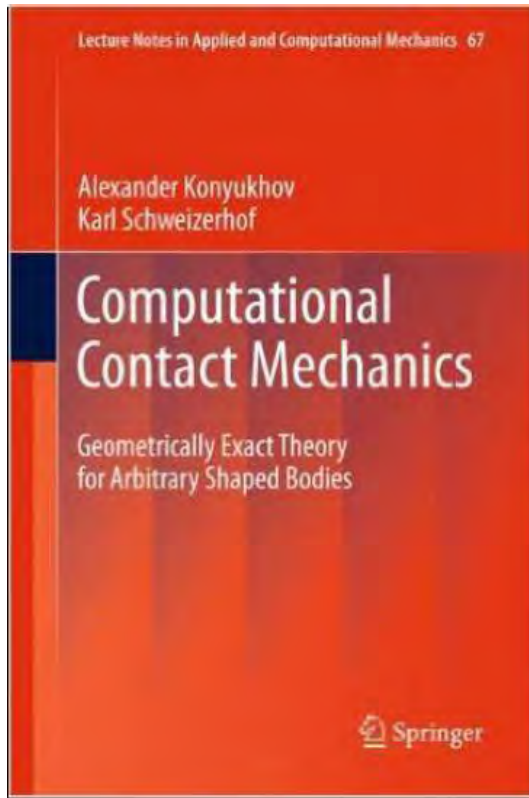
$$z_1 = r^2 / 2 R_1; \quad z_2 = r^2 / 2 R_2; \quad z_1 + z_2 = r^2 [(R_1 + R_2) / 2 R_1 R_2]. \quad (8.32.а)$$

Када се обе кугле притисну дуж Oz — осе силама F , околина додирне тачке O се деформише, па се међусобни додир проширује на малу површ — додирну (контактну) површ. Пошто су деформације симетричне у односу на Oz — осу, то је пројекција додирне површине на ту осу круг, малог полупречника a . Две тачке на Oz — осе обе кугле (на пример, средината O_1 и O_2) које су изван домаћаја локалних деформација услед узајамног притиска зближиће се за малу дужину $\delta_0 = \Delta w_0$. Тачке P и Q кугли које су у околини зоне локалних деформација зближиће се за мању дужину, јер имају и померања (угибе) који су супротног знака, па је $\delta_1 = \delta - (w_1 + w_2)$.

** Отпорност материјала, члан 13.9.



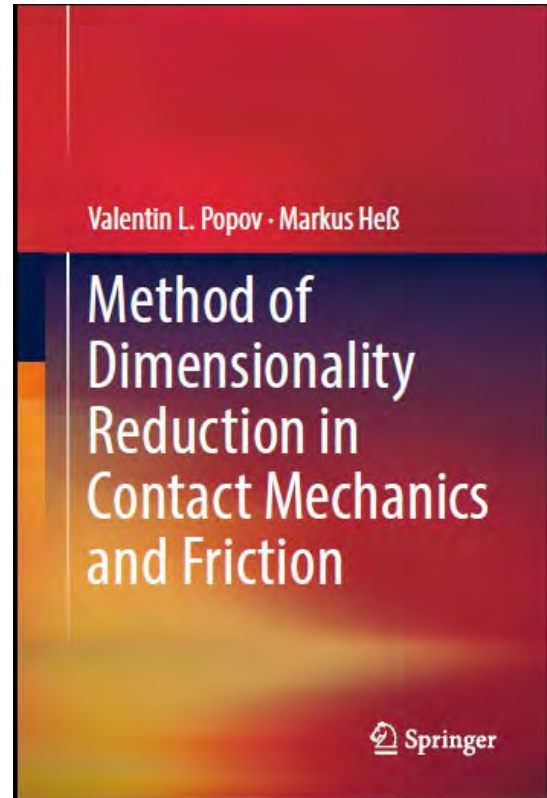
The recent books about Contact Mechanics



ISBN-13: 978-3642315305

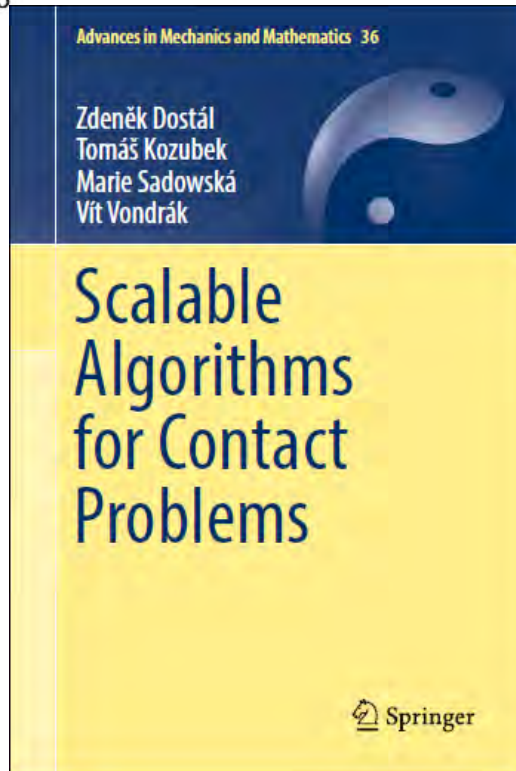
ISBN-10: 3642315305

ISBN-10: 3642315305



ISBN-15: 978-3-642-53875-9

DOI: 10.1007/978-3-642-53876-6



ISSN-16: 1571-8689

ISBN:978-1-4939-6834-3



The Founders of the Institute



Dr. Bilimović Anton

Anton Bilimović



Dr. Kašanin Radivoj

Radivoj Kašanin



Dr. Gavrilović Bogdan

Bogdan Gavrilović



Dr. Milanković Milutin

Milutin Milanković



Dr. Mišković Vojislav

Vojislav Mišković



Dr. Saltikov Nikola

Nikola Saltikov



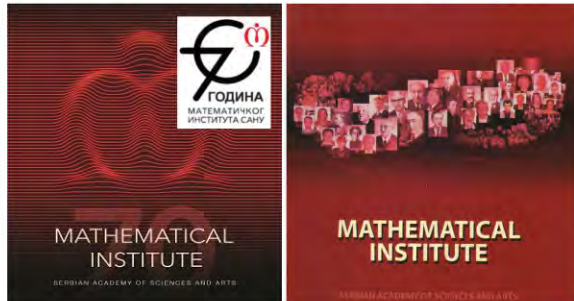
Dr. Karamata Jovan

Jovan Karamata





The Colloquium of Mechanics



The Colloquium of Mechanics is one of the two historic colloquiums of MISANU, together with the Colloquium of Mathematics. Its formal and essential role in the organization of the Institute evolved and changed during the past seven decades, along with the changes of the Institute itself.

One of its most distinguished permanent benchmarks and the most important public activity has been the organization of the Mechanics Colloquium. The Mechanics Colloquium has earned reputation of one of the most prestigious regular scientific tribunes in the broad area of Mechanics, with the longest continuous tradition nationwide.

From the founding of MISANU in 1946, there has always been an important group of researchers in the field of Mechanics, whose first leader was the founder and the first director of MISANU, Academician Anton Bilimović.

Up to 1961, the seminar talks in the field of the Mechanics, including Theoretical Mechanics, Dynamics of Fluids, Stability of Motion, Astronomy, were part of the Mathematics Colloquium. According to Academician Konstantin Voronjec, the Head of the Colloquium of Mechanics in 1971, the time of 25th anniversary of the Institute, more than one hundred such talks were held.

The Colloquium of Mechanics was founded in 1961. Until March 2016, there were 1283 meetings of its Mechanics Colloquium. On average, 24 meetings, with about 4-5 foreign speakers are organized annually.

The principal tasks of the Colloquium of Mechanics include:

- organization of weekly lectures, the Mechanics Colloquium, which range from expository lectures in pure and applied mechanics to original research reports;
- organization of public presentation and evaluation of scientific projects supported by the Ministry of Science;



Академик Татомир П. Анђелић
(1903-1993)

- supporting and organizing visits of foreign scientists;
- organization and support of workshops, mini conferences, presentations of books, software, video lectures etc;
- monitoring the seminars and other research activities in the field of mechanics within the Institute.

The Mechanics Colloquium meets weekly, keeping the tradition from the very early days of its establishment, on Wednesday at 6 pm. Currently, The Head of the Colloquium of Mechanics is Professor Vladimir Dragović, with Dr. Božidar Jovanović as the Deputy, and Dr. Katarina Kukić as the Secretary.

In the period from 1961 to 1965 the Colloquium of Mechanics Colloquium was headed by academician Tatomir P. Anđelić (1903-1993) and Prof. Danilo Rašković (1910-1985). The Head of the Colloquium of Mechanics from 1965 to 1973 was Academician Konstantin Voronjec (1902-1974); from 1973 to 1984, Prof. Vlatko Brčić (1919-2000); from 1984 to 2000, Prof. Veljko Vujičić; from 2000 to 2006, Academician Vladan Đorđević; from 2006 to 2010, Academician Teodor Atanacković; from 2010 to 2012, Prof. Katica Stevanović Hedrih, and from 2012 Prof. Vladimir Dragović.

In the period from 1975 to 1994, the Secretary of the Colloquium of Mechanics was Dr. Dragi Radojević (1947-2015). From 1994 until 2010, the Secretaries were Dr. Borislav Gajić, Dr. Božidar Jovanović, and Dr. Milena Radnović; from 2010 to 2012, Dr. Srđan Jović, and from 2012 Dr. Katarina Kukić.



Mini-symposium “Contact Mechanics: Theory and Applications”
Mathematical Institute of SASA and Project OI 174001,
Belgrade, Serbia, March 14, 2017

Mechanics Colloquium - Mathematical Institute SASA

Chairman



[academician Tatomir P. Andjelic \(1903-1993\)](#) [Prof. dr dipl. Math. Danilo P. Raskovic \(1910-1985\)](#)

Chairman:



Chairman:



[academician Konstantin Voroniec \(1902-1974\)](#)

Chairman:



[Prof. Dr. Vlatko Brcic \(1919-2000\)](#)

1984-2000 Head:



Dr. Veljko Vujicić

2000-2006 Chairman



academician Vladan Đorđević

2006-2010 Chairman



academician Teodor Atanacković

2010-2012 Chair



Prof. dr Katica R. (Stevanović) Hedrih

2012-2016 Chairman

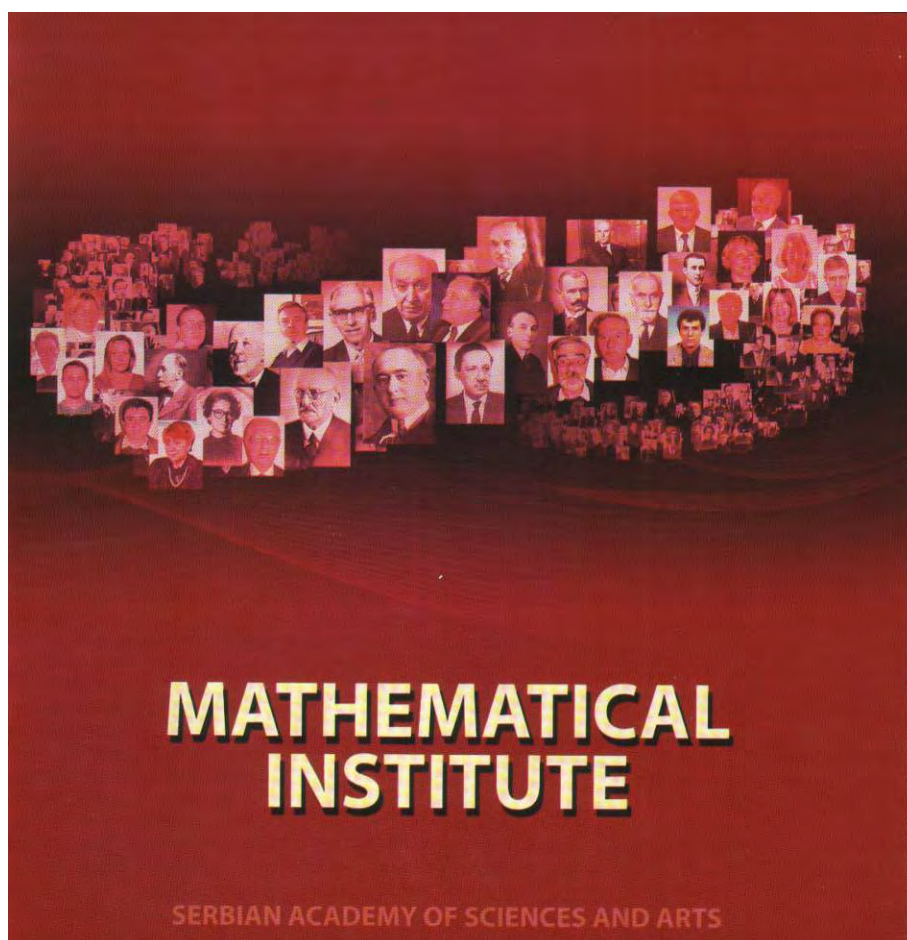


Dr. Vladimir Dragović



Mini-symposium “Contact Mechanics: Theory and Applications”

Mathematical Institute of SASA and Project OI 174001,
Belgrade, Serbia, March 14, 2017





Mini-symposium "Contact Mechanics: Theory and Applications"
Mathematical Institute of SASA and Project OI 174001,
Belgrade, Serbia, March 14, 2017

Издавачи:
Пројекат ОН174001 у Математичком институту САНУ
СВЕН – Ниш

Уредници: Катица (Стевановић) Хедрих
Ивана Атанасовска

Главни и одговорни уредник серије: Катица (Стевановић) Хедрих,
РУКОВОДИЛАЦ Пројекта ОН174001

Година издања 2017
Тираж 100

ISBN 978-86-7746-646-6

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

531.8(048)

МИНИ-симпозијум "Механика контакта: Теорија и примене" (2017 ;
Београд)

Књига апстраката = Booklet of Abstracts / Мини-симпозијум "Механика
контакта: Теорија и примене", Београд, 14. март 2017. = Mini-symposium
"Contact Mechanics: Theory and Applications", Belgrade, March 14, 2017 ;
[организатори] Математички институт САНУ и Пројекат ОИ 174001 =
[organizers] Mathematical Institute of SASA and Project OI 174001 ;
уредници Катица (Стевановић) Хедрих, Ивана Атанасовска. - Београд :
Математички институт САНУ, Пројекат ОИ 174001 ; Ниш : Свен, 2017
(Ниш :
Свен). - 40 стр. : илустр. ; 24 cm

Упоредо срп. текст и енгл. превод. - Тираж 100. - Библиографија уз сваки
апстракт.

ISBN 978-86-7746-646-6 (Свен)

а) Механика контактних система - Апстракти
COBISS.SR-ID 230127884

