

FRI-1.202-1-MR-01

---

## INVESTIGATION OF THE MICROHARDNESS OF SLIDING SURFACES FROM RESTORATIVE COATINGS FOR BEARINGS AND SHAFTS FROM AGRICULTURAL MACHINERY<sup>7</sup>

---

**Prof. Mitko Nikolov, DSc**

Department of Repair, Reliability, Mechanisms, Machines, Logistics and Chemical Technologies

University of Ruse “Angel Kanchev”, Bulgaria

Tel.: +359 82 888 458

E-mail: [mnikolov@uni-ruse.bg](mailto:mnikolov@uni-ruse.bg)

**Prof. Plamen Kangalov, PhD**

Department of Repair, Reliability, Mechanisms, Machines, Logistics and Chemical Technologies

University of Ruse “Angel Kanchev”, Bulgaria

Tel.: +359 82 888 457

E-mail: [kangalov@uni-ruse.bg](mailto:kangalov@uni-ruse.bg)

**Abstract:** *The article presents the change of microhardness of vibro-welded and electrochemical coatings for bearings and shafts under liquid friction. The change in the microhardness of the roller from the restored couples with anti-friction alloys BO-30 and EO-92 have the same character, and after a short softening of the surface of the vibration arc welded roller with DUR-500, a continuous strengthening is observed until the end of the test, which is higher with EO-92. This character of change in the microhardness of the welded roll can be explained by the greater number and higher content of alloying elements, their diffusion to the surface layers and the formation of new physicochemical structures within the boundaries of individual microscopic volumes at the surfaces subjected to friction and wear. The dynamics of the processes of strengthening and weakening of the rubbing surface of the BO-30 and EO-92 antifriction alloys have a cyclical nature, and these processes are more clearly expressed at the entrance of the sectors. This process is characteristic of pairs operating under oxidative wear, the main type of wear for parts operating under fluid friction.*

**Keywords:** *micro hardness, agricultural machinery, bearings, shafts*

### ВЪВЕДЕНИЕ

Износоустойчивостта на триещата се двоица зависи от параметрите на режима и условията на триене, фазовия и химически състав на материала, параметрите на субмикроструктурата и тяхното изменение при триенето и износването.

За износоустойчивостта на работещите при триене на плъзгане двоици голямо значение има изменението на изходната структура и физико-механическите свойства на повърхностните слоеве при преминаване от нестационарен към стационарен режим на триене Любарский е показал, че структурните изменения в стоманите, които имат хетерогенен строеж водят до образуването на особен слой, определящ износоустойчивостта на материала, образуването на задирания, уморно износване и други повреждания (Бекана 2020; Кангалов 2019; Кангалов 2012; Кангалов и др. 2012; Valov i Valova 2020).

Според Костецкий уякчаване на повърхностните слоеве при триене достига значително големи стойности в резултат на пластическото деформиране в сравнение с обемното напрегнато състояние. При това процеса на пластическа деформация при триене се разглежда като физико-химически. Този процес е съпроводен с различни структурни, физически и

---

<sup>7</sup> Докладът е представен на научната сесия на секция „Ремонт и надеждност“ на 28 октомври 2022 г. с оригинално заглавие на български език: ИЗСЛЕДВАНЕ НА МИКРОТВЪРДОСТТА НА ТРИЕЩИ СЕ ПРИ ПЛЪЗГАНЕ ПОВЪРХНОСТИ ОТ ВЪЗСТАНОВИТЕЛНИ ПОКРИТИЯ ЗА ЛАГЕРИ И ВАЛОВЕ ОТ ЗЕМЕДЕЛСКАТА ТЕХНИКА

физико-химически изменения на деформирания метал (Mari-nov end all 2019; Nikolov 2019; Димитров 2019; Деликостов 2020).

Микротвърдостта на триещите се при плъзгане повърхности е една от важните характеристики, имаща съществено значение за износоустойчивостта на триещите се двоици от новата и ремонтирана автотракторна и земеделска техника

**Целта** на настоящата работа е установяване изменението на микротвърдостта на триещи се при плъзгане повърхности от възстановителни покрития за лагери и валове от земеделската техника.

**Обект** на изследването са възстановените чрез вибродъгово наваряване и елект-ролитни сплави детайли от автотракторната и земеделска техника.

**Предмет** на изследването са процесите на уякчаване и разуякчаване на триещите се повърхности при сработване и установено износване на вибродъгово наварените и електролитни сплавни покрития за валове и лагери.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Методиката за изследване е разработена съобразно съвременните изискванията за триене и износване при течно триене, съответстващи на експлоатационните условия и възможностите на техническите средства за тези изследвания (Alipiev end all 2018; Todorov 2013; Todorov 2017).

Моделът за изследване съгласно кибернетичните принципи се изразява с основните входни фактори и изходни параметри на обекта на изследване. За входен фактор на модела за изследване процеса на сработване и износване при триене на плъзгане беше приет състава на триещата се повърхност на възстановените чрез вибродъгово наваряване и електрохимични покрития детайли от автотракторната и земеделската техника (Nikolov I Kangalov 2012; Николов и Стоянов 2014; Valov i Valova 2017).

Като критерии за оценка на процеса на сработване и износване на триещите се при плъзгане повърхности беше приета микротвърдостта на елементите на триещата се двоица. Като основен критерии за оценка микротвърдостта са приети: средната микротвърдост на триещата се повърхност на ролката и сектора. В качеството на спомагателни критерии се използваха: микротвърдостта на входа, изхода и по дължина на сектора.

За физическия модел на триещото се съединение "вал-лагер" е приета двоицата "ролка-сектор" със съответните параметри на физическо и геометрично подобие. Параметрите на образците за изпитване са избрани със структурни характеристики, определени въз основа на статистическо изследване на подлежащите на възстановяване детайли от автотракторната и земеделска техника (Бекана 2020; Кангалов 2019; Кангалов 2012; Кангалов и др. 2012; Valov i Valova 2020 Todorov 2013; Todorov 2017; Димитров 2019; Деликостов 2020).

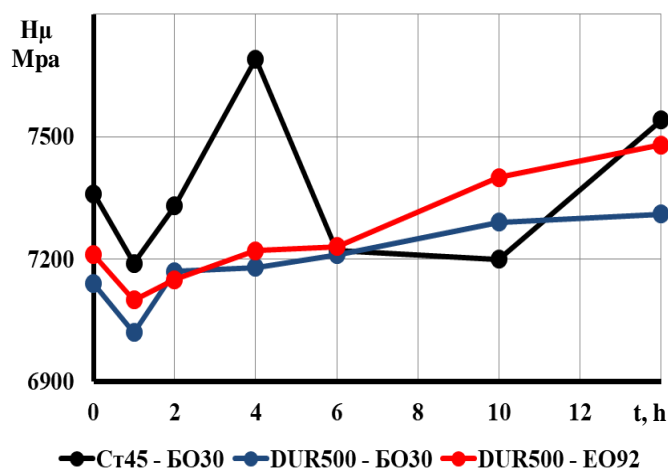
Изследването е проведено на машина за триене и износване СМЦ-2, усъвършенствана с различни системи и устройства за осигуряване на условия за триене с масло SAE-30 и износване близки до експлоатационните. За точно измерване на триботехническите характеристики към машината е разработена специална малко обемна водоохлаждаема камера за триене и износване в условията на течно смазване с обем от 150 ml и системи за охлаждане на камерата, поддържаща постоянна температура 40°C, характерна за студено сработване на ново изработени и ремонтирани двигатели на автотракторната и земеделска техника, система за непрекъснато разбъркване на смазочната среда и магнитно почистване на продуктите от износването. Изпитването се извършва по схемата "ролка-сектор" при честота на въртене 540 min<sup>-1</sup> осигуряваща относителна скорост на плъзгане 85 m/min. Натоварването на триещата се двоица се извършваше безстепенно със скорост 1 МПа/min, усилие на притискане на секторите към ролките 100 daN, което осигурява налягане 5 МПа и триботехническа характеристика PV = 425 МПа.m/min. Тези стойности са избрани в съответствие с изискванията към допустимите стойности за плъзгащи лагери.

В съответствие с приетата цел, на сравнително изследване бяха подложени три двоици от материали: Еталонна Ст-45 закалени с ТВЧ и антифрикционна сплав БО-30, като най-разпространена двоица в автотракторната и земеделска техника (Кангалов и др. 2012; Valov i

Valova 2020 Todorov 2013; Todorov 2017; Димитров 2019). Възстановена повърхност на вала с наварено покритие с DUR-500 в газова смес от 60 % Ar + 40 % CO<sub>2</sub> закалено с ТВЧ работеща с антифрикционна сплав БО 30 и антифрикционна електрохимична оловна сплав ЕО-92, нанесена върху повърхността на лагера.

Възстановените ролки са изработени от Ст-45 наварена с електроден тел DUR-500 с диаметър 1,6 mm в газова смес от аргон и въглероден двуокис при състав от 60% Ar и 40% CO<sub>2</sub> който осигурява висока твърдост и износоустойчивост на наварената повърхност (Николов 2019; Кангалов 2012). Наваряването е извършено при режим: Работно електрическо напрежение-20 V, големина на електрическия ток-150 A, скорост на наваряване 1,26 m/min, скорост на подаване на електродния тел 2,3 m/min, стъпка на наваряване 3 mm/tr, излаз на електродния тел 15 mm, разход на защитен газ 15 l/min на уредба с без инерционен осев вибратор апарат АВН 60 с честота на вибрациите 46,7 Hz.

Наварените и еталонните ролки се обработваха термично и механично, като се закаляваха с ТВЧ на твърдост 55 HRC и шлифоваха на окончателен размер. Ролките след обработване имаха диаметър на триещата се повърхност 50<sup>+0,02</sup> mm с грапавост Ra = 0,28-0,32 μm, ширина 12<sup>+0,05</sup> mm, дебелина на навареното покритие 0,5 mm по радиуса и маса от 160-170 g.



Фиг. 1. Изменение на микротвърдостта на триещата се повърхност на ролката при сработване и износване на еталонната и възстановените двоици

Секторите са биметални със стоманена основа и нанесен върху нея антифрикционен слой от БО-30 с твърдост HV<sub>5</sub> = 490<sup>±50</sup> МПа и дебелина 0,1-0,5 mm по радиуса. Върху част от секторите е нанесена електрохимична антифрикционна сплав ЕО-92 на основата на оловото от силикофлуороводороден електролит, който е със състав (Кангалов 2019; Кангалов и др. 2015):

Оловен силикофлуорид(PbSiF<sub>6</sub>) 100-150 g/l

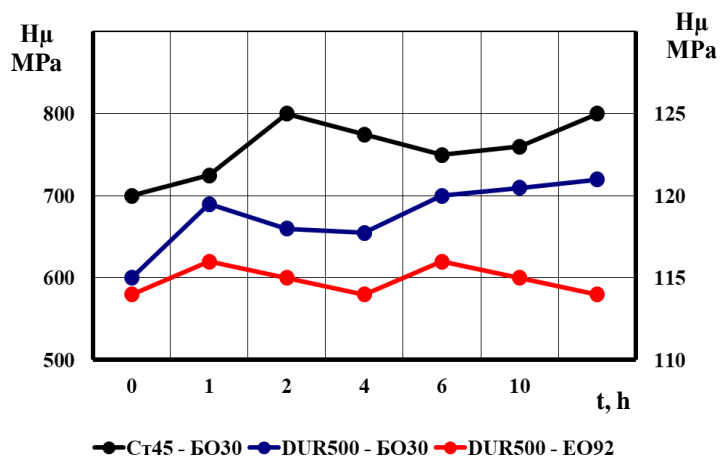
Калаен силикофлуорид(SnSiF<sub>6</sub>) 2 0-30 g/l

Меден силикофлуорид(CuSiF<sub>6</sub>) 5-15 g/l

Силикофлуороводородна киселина (H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>) до pH 0,5

Отлагането на електрохимичното покритие се извършва с плътност на постоянния ток Dk = 2A/dm<sup>2</sup> при температура 18-25°C.

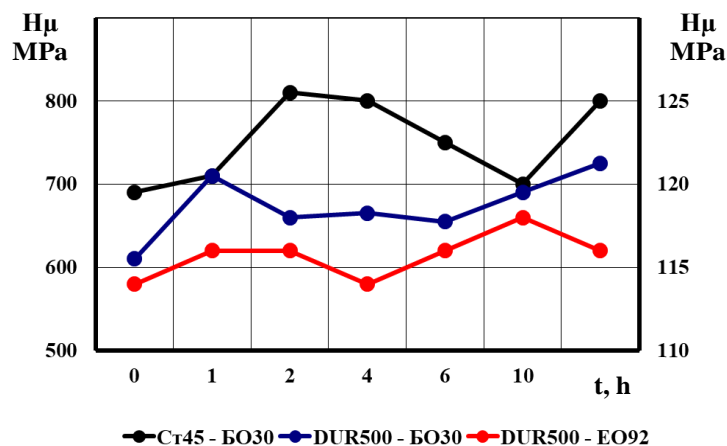
Еталонните и възстановени сектори за триене с ролките се изрязваха с централен ъгъл 46° от предварително подготвените стоманени пръстени с нанесен върху тях антифрикционен слой от БО-30 с дебелина 0,50 mm и ЕО-92 с дебелина 0,15-0,25 mm по радиуса и имаха ширина 10<sup>+0,05</sup>, дължина 20 mm с триеща се повърхност от 2 cm<sup>2</sup> и маса 18-19 g. Вътрешната повърхност на лагерните пръстени преди отрязване на секторите се престъргват под диаметър 50<sup>+0,02</sup> mm, с грапавост по Ra = 2,0-2,8 μm за секторите с БО-30 и Ra = 0,95-1,20 μm за тези с ЕО-92.



Фиг. 2. Изменение на микротвърдостта на триещата се повърхност на сектора при сработване и износване на еталонната и възстановените двоици

Макротвърдостта на триещите се повърхности се измерва преди започване на опитите по метода на Викерс с твърдомер ТП-1 при натоварване 50 N, а микротвърдостта на ролката и сектора се измерва преди и след всеки опит с прибор ПМТ-3 при определено натоварване (1 N за ролката и 0,2-0,5 N за сектора в зависимост от антифрикционната сплав). Предварителните измервания на макротвърдостта на ролките за селекция се извършва по метода на Роквел, скала “С” с твърдомер ТК-250 при натоварване 150 daN.

Въз основа на получените и статистически обработени резултати от проведеното изследване са построени графически зависимости за динамиката на изменение на микротвърдостта на вибродъговите и електрохимичните покрития на възстановените валове и лагери (фиг. 1-фиг. 5).

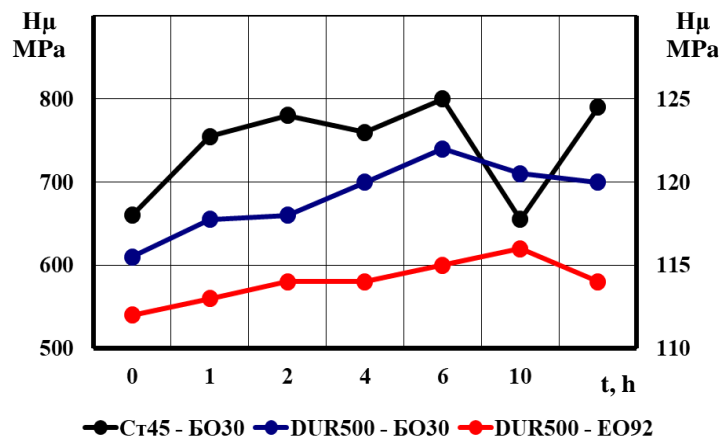


Фиг. 3. Изменение на микротвърдостта на триещата се повърхност на входа на сектора при сработване и износване на еталонната и възстановените двоици

Характерът на изменение микротвърдостта на еталонната и възстановените ролки съвпада само през първите два часа на изследването, след това се различава съществено (фиг. 1). За възстановените двоици след разукчаване в първия час от изпитването настъпва уякчаване на повърхността до края на изпитването, като този процес е по-ярко изразен при възстановената ролка работеща с оловната електрохимична сплав ЕО-92. Този характер на изменение на микротвърдостта на вибродъгово наварената ролка може да се обясни с по-големия брой и по-високото съдържание на легиращи елементи, тяхната дифузия към

повърхностните слоеве и образуващите се нови физико-химически структури в границите на отделните микроскопически обеми при повърхностите подложени на триене и износване (Димитров 2019). Уякчената ролка работеща с възстановителната антифрикционна сплав ЕО-92 има по-малко износване.

С увеличаване времето на триене в резултат на деформационните и дифузионни процеси, микротвърдостта на всяка структурна съставляваща от начало расте, а след това рязко пада тоест протича уякчаване и разуякчаване на траещата се повърхност (Николов 2019; Кангалов 2019). При еталонната двоица след уякчаването в четвъртия час настъпва разуякчаване до 10 час и отново уякчаване в края на изпитването. Този процес е характерен за двоици работещи при окислително износване, основен тип износване за детайли работещи при течно триене.

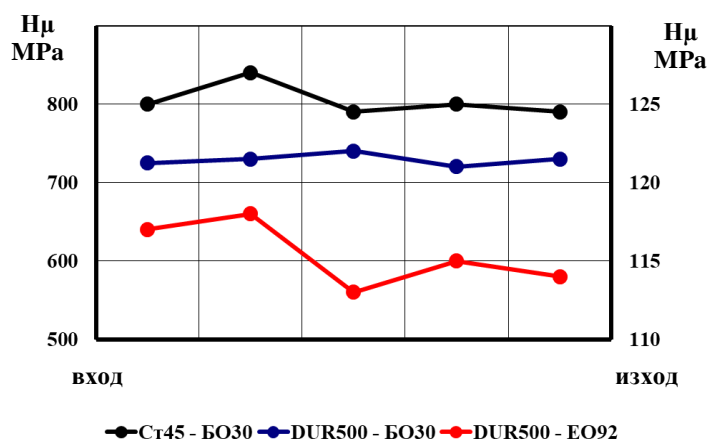


Фиг. 4. Изменение на микротвърдостта на триещата се повърхност на изхода на сектора при сработване и износване на еталонната и възстановените двоици

В първите часове на изпитването микротвърдостта на секторите на трите двоици нараства, като това уякчаване е най-ярко изразено при еталонната двоица. При нея процеса на уякчаване продължава до втория час, за възстановените двоици за секторите работещи с наварената с DUR500 ролка този процес приключва още в първия час. В първият час от изпитването микротвърдостта на антифрикционния слой на сектора при БО-30 нараства и достига стойности за 700 MPa, а за ЕО-92 116 MPa, след което намалява и отново се увеличава (фиг. 2). Значително по-голямата микротвърдост на ролката определя износването на сектора, която то за БО-30 с 10 пъти по-голяма, а за ЕО-92 64 пъти по-голяма. Независимо от значително по-голямата разлика в микротвърдостите на ролката и сектора, износването на триещата се двоица DUR 500- ЕО-92 е по-малко в сравнение с двоицата DUR 500-БО 30.

Това може да се обясни с процесите които протичат при триенето и износването в оловно-калаена сплав (Кангалов 2019; Кангалов и др. 2015), каквато е електрохимичната оловна сплав ЕО-92. Оловото при триенето на такива сплави изменя фрикционните свойства и износоустойчивостта на триещата се двоица. Поради отделянето на свободно олово и образуването на тънък слой върху повърхността на триенето. По този начин се променя характера на взаимодействието между елементите на двоицата, като съществено се подобряват фрикционните свойства и се повишава нейната износоустойчивост.

За входа на секторите от триещите се двоици, микротвърдостта достига най-големи стойности при еталонната двоица Ст45-БО30, като за възстановените двоици цикличният характер на изменение на микротвърдостта се запазва до края на изпитването, но е по-малко изразен. За еталонната двоица има едно силно изразено уякчаване до втория-четвъртия час, докато при възстановените двоици имаме по-плавно уякчаване и разуякчаване. Като цяло и тук, както и при ролката, се наблюдава вълнообразна промяна на микротвърдостта.



Фиг. 5. Изменение на микротвърдостта по дължина на триещата се повърхност на сектора при сработване и износване на еталонната и възстановените двоици

Процесът на уякчаване на триещата се повърхност на сектора от антифрикционните сплави БО-30 и ЕО-92 протича по-бързо на входа на сектора в сравнение с изхода му (фиг. 3 и фиг. 4). Микротвърдостта на входа на секторите е по-висока от тази на изхода и за трите изпитвани двоици (фиг. 5). Процесът на уякчаване и разуюкчаване на повърхността на сектора от възстановените двоици са по-слабо изразени спрямо еталонната Ст45-БО30, но запазват същия цикличен характер (фиг. 5).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Изменението на микротвърдостта на ролката от възстановените двоици с антифрикционни сплави БО30 и ЕО92 имат еднакъв характер, като след кратко разуюкчаване на повърхността на вибродъгово наварената ролка с DUR-500 се наблюдава непрекъснато уякчаване до края на изпитването, което е по-високо при ЕО-92. Този характер на изменение на микротвърдостта на наварената ролка може да се обясни с по-големия брой и по-високото съдържание на легиращи елементи, тяхната дифузия към повърхностните слоеве и образуващите се нови физико-химически структури в границите на отделните микроскопически обеми при повърхностите подложени на триене и износване;

2. Динамиката на процесите на уякчаване и разуюкчаване на триещата се повърхност на антифрикционните сплави БО-30 и ЕО-92 имат цикличен характер, като тези процеси са по-ярко изразени на входа на секторите. Този процес е характерен за двоици работещи при окислително износване, основен тип износване за детайли работещи при течно триене;

3. Микротвърдостта на входа на секторите е по-висока от тази на изхода и за трите изпитвани двоици, поради по-голямото уякчаване.

## REFERENCES

Alipiev O., S. Marinov, T. Uzunov. (2018) Optimal tooth profile design of a gear shaper cutter when meshing with internal straight splines. Mechanism and Machine Theory, Vol.129, pp. 70-79, ISSN 0094-114X.

Bekana D. (2020) Optimizing the maintenance of agro-industrial equipment, Academic Publishing House University of Ruse, p. 130, ISBN 978-954-712-800-2, (*Оригинално заглавие: Бекана Д. (2020) Оптимизиране поддържането на аграрно-индустриалната техника, Русе: Академично издателство Русенски университет, с. 150, ISBN 978-954-712-800-2*).

Dimitrov, M.S. (2019) Development of repaired engines with friction modifiers, Yambol, Faculty of Engineering and Technology - Yambol at the Thracian University - Stara Zagora, p. 160, ISBN 978-619-7340-00-6. (*Оригинално заглавие: Димитров М. (2019) Разработване на*



ремонтирани двигатели с модификатори на триенето, Ямбол, Факултет „Техника и технологии“ - Ямбол при Тракийски университет - Стара Загора с. 160, ISBN 978-619-7340-00-6).

Delikostov T., (2020) Management of fuel combustion of internal combustion engines from agricultural and tractor equipment by maintaining the food system. Scientific Monograph. Ruse, Academic Publishing House University of Ruse, p.136, ISBN 978-954-712-799-9. **(Оригинално заглавие:** Деликостов Т. (2020) Управление разгода на гориво на ДВГ от земеделската и автотракторна техника чрез поддържане на хранителната система – научна монография. Русе: Академично издателство Русенски университет, р.136, ISBN 978-954-712-799-9).

Kangalov P. (2019) Rebuilding electrolytic alloys coatings. Scientific Monograph. Academic Publishing House University of Ruse, p. 170, ISBN 978-954-712-785-2 **(Оригинално заглавие:** Кангалов П. (2019) Възстановителни покрития от електролитни сплави – научна монография. Русе: Академично издателство Русенски университет, с. 170, ISBN 978-954-712-785-2).

Kangalov P. (2012) Statistical study of the wear of the housing and the gate of the hydraulic valve P-80, IN: Scientific works of Angel Kanchev University, Ruse, Vol 51, book. 1.1, Ruse, pp. 252-256, ISBN 1311-3321. **(Оригинално заглавие:** Кангалов П. (2012), Статистическо изследване износването на корпуса и шибъра на хидроразпределител P-80. В: Научни трудове на РУ-2012, том 51, с. 1.1, Русе, стр. 252-256, ISBN 1311-3321).

Kangalov P., D. Beleva, K. Dyakova-Dimitrova, (2015), Determination of the initial structural characteristics of the pair of shaft-plain bearing by tractor engines. IN: Scientific works of Angel Kanchev University, Ruse, vol. 54, book 1.1, pp. 210-216, ISSN 1311 3321. **(Оригинално заглавие:** Кангалов П., Д. Белева, К. Дякова-Димитрова, (2015) Определяне на началните структурни характеристики на двоицата вал-плъзгащ лагер от автотракторни двигатели.// Научни трудове на Русенския университет, том 54, с.1.1, стр. 210-216, ISSN 1311-3321).

Marinov S., O. Alipiev, T. Uzunov. (2019) Interference of the profiles when meshing internal straight splines with gear shapers. MATEC Web of Conferences, No 287, 01015.

Nikolov M, (2019) Rebuilding Overlaid Coatings Obtained Through Vibrating Arc Overlaying Process in an Atmosphere of Shielding Gas and its Mixtures - Scientific Monograph, Academic Publishing House University of Ruse, p. 144. ISBN 978-954-712-756-2 **(Оригинално заглавие:** Николов М. (2019), Възстановителни вибронаварени покрития в защитни газове и техните смеси - научна монография, Русе: Академично издателство „Русенски университет, р. 144, ISBN 978-954-712-756-2).

Nikolov M., P. Kangalov. (2012) Benefits from maintenance and repair in utilization of resources. IN: Mendeltech International 2012 – International Scientific Conference, No 1, Brno, ISBN 978-80-7375-625-3.

Nikolov M., I. Todorov, V. Stoyanov, J. Valchev. (2019) Determination of the Structural Characteristics of the Parts of Agricultural Machinery Subject for Repair. В: PROCEEDINGS OF UNIVERSITY OF RUSE – 2019, No v 58, b 1.1, pp. 44-48, ISSN 1311-3321.

Nikolov, M., Stoyanov, V., (2014) Utilization of Resources in the Maintenance and Repair of Machines, Ruse, Ruse University Publishing Centre, p. 95, ISBN 978-954-712-607-7, **(Оригинално заглавие:** Николов М., Стоянов В. (2014) Оползотворяване на ресурсите при поддържането и ремонта на машините, Русе, Издателски център при Русенски университет, стр. 95, ISBN 978-954-712-607-7).

Todorov, I. (2013) Influence of the amplitude of vibrations on the technological parameters of the mode during vibroarc surfacing of details from the tractor and agricultural machinery. В: Scientific works of Angel Kanchev University, Vol 52, s 1.1, Ruse, pp. 293-296, ISSN 1311 3321, **(Оригинално заглавие:** Тодоров И., (2013) Влияние на амплитудата на вибрации върху технологическите параметри на режима при вибродъгово наваряване на детайли от автотракторната и земеделска техника. В: Научни трудове на РУ „Ангел Кънчев“ том 52, с. 1,1, Русе, с. 293-296, ISSN 1311 3321).

Todorov I. (2019) A Research about Wear Process of Details from Belt Conveyor.// Agricultural, forest and transport machinery and technologies, Vol. VI, pp. 5-10, ISSN ISSN 2367-5888.

Valov, N., Valova, I. (2017) Drying process management laboratory with remote access. International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training, ITHET 2017, doi:10.1109/ITHET.2017.8067800.

Valov, N., Valova, I. (2020) Home automation system with Raspberry Pi. International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering, EE and AE 2020 - Proceedings, doi:10.1109/EEAE49144.2020.92789988998.