



TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA  
ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - СОФИЯ



FACULTY OF MACHINE TECHNOLOGY  
МАШИННО-ТЕХНОЛОГИЧЕН ФАКУЛТЕТ

**XXVI INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE**

**65 YEARS**

**FACULTY OF MACHINE TECHNOLOGY**

**100 BIRTH ANNIVERSARY OF  
ACAD. ANGEL BALEVSKI**

**PROCEEDINGS  
VOLUME II**

**XXVI МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ**

**65 ГОДИНИ**

**МАШИННО-ТЕХНОЛОГИЧЕН ФАКУЛТЕТ**

**100 ГОДИНИ ОТ РОЖДЕНИЕТО НА  
АКАД. АНГЕЛ БАЛЕВСКИ**

**СБОРНИК ДОКЛАДИ  
ТОМ II**

13-16 SEPTEMBER, 2010  
SOZOPOL, BULGARIA

13-16 СЕПТЕМВРИ, 2010  
СОЗОПОЛ, БЪЛГАРИЯ

<http://mtf65.tu-sofia.bg>

*XXVI INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE*

**65 YEARS**

**FACULTY OF MACHINE TECHNOLOGY**

**100 BIRTH ANNIVERSARY OF  
ACAD. ANGEL BALEVSKI**

**PROCEEDINGS  
VOLUME II**

**СБОРНИК ДОКЛАДИ  
ТОМ II**

*XXVI МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ*

**65 ГОДИНИ**

**МАШИННО-ТЕХНОЛОГИЧЕН ФАКУЛТЕТ**

**100 ГОДИНИ ОТ РОЖДЕНИЕТО НА  
АКАД. АНГЕЛ БАЛЕВСКИ**

Sozopol, Bulgaria  
September, 2010

Созопол, България  
Септември, 2010

Отпечатването на настоящия сборник е по договор за частично финансиране на научни форуми №101дн244-5/2010 г. между НИС при ТУ-София и МТФ.

Сборникът, включващ докладите от XXVI МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ „65 ГОДИНИ МАШИННО-ТЕХНОЛОГИЧЕН ФАКУЛТЕТ, е обработен и подготвен от гл. ас. д-р, д-р инж. Яна СТОЯНОВА с активното съдействие на доц. д-р инж. мат. Николай НИКОЛОВ, доц. д-р инж. Мара КАНДЕВА, доц. д-р инж. Йорданка ПЕТРОВА, доц. д-р инж. Валентин КАМБУРОВ и доц. д-р инж. Манахил ТОНГОВ. Докладите са рецензирани по секции от членовете на организационния комитет.

МТФ при ТУ-София  
1000 София  
бул. „Кл. Охридски” №8, бл.3  
тел./факс: (+359) 2 965 25 36  
e-mail: mtf-k@tu-sofia.bg

ISBN: 978-954-438-854-6

Тираж 100 бр.  
Печат Издателство на ТУ-София



# SPARKY

## PROFESSIONAL



**ПРОФЕСИОНАЛНИ ЕЛЕКТРОИНСТРУМЕНТИ**

Силата във вашите ръце



## КАК ДА ПРЕВЪРНЕМ ИДЕИТЕ В РАБОТЕЩ ОФИС?

- цялостно оборудване и обзавеждане на офиса
- изграждане на сградна и междусградна инфраструктура
- специфични решения за различните сегменти от икономиката
- системи за управление на бизнеса (ERP)
- софтуер за бизнес анализ
- технически консултации и сервизна поддръжка
- и всичко стандартно и специализирано за офиса

КОНТРАКС предлага специални условия за членовете на M-Tel BUSINESS CLUB за сервизно обслужване на всякаква техника и офис оборудване:

**ПЛАТИНЕНА КАРТА 10% ОТСТЪПКА**

**ЗЛАТНА КАРТА 8% ОТСТЪПКА**

**СРЕБЪРНА КАРТА 5% ОТСТЪПКА**

ул. Тинтява 13, тел.: (02) 960 977, e-mail: [sales@kontrax.bg](mailto:sales@kontrax.bg)  
[www.kontrax.bg](http://www.kontrax.bg)

# КОНТРАКС

Представителства: Благоевград 0886843129, Бургас 056 919997, Варна 052 603604, Добрич 058 602682, Карлово 0335 96548, Кърджали 0361 66666, Кюстендил 078 525252, Плевен 064 800 421, Пловдив 032 623723, Разград 084 690425, Русе 0889428608, Търговище 0601 63800, Хасково 038 664621,

Велико Търново 062 600449, Видин 094 604060, Враца 092 666687, Габрово 066 803212, Монтана 096 301414, Пазарджик 034 440922, Перник 076 640350, Петрич 0745 63050, Силистра 086 822717, Сливен 044 625374, Смолян 0301 63603, Стара Загора 042 603517, Шумен 054 892070, Ямбол 046 662094



# Medical

-----  
Медицинските продукти и технологии се превръщат все повече в незаменим фактор за здравето. На металообработващите машини DMG се изготвят понастоящем над 1000 медицински компоненти, прецизно и икономично – нещо, което преди няколко години се смяташе дори за немислимо.



[Колена става] [Ковашка форма за тазобедрена става] [Костна пластина] [Зъбен мост от титан]

ПОЛИМЕТА С ООД  
София 1528, ул. Илия Бешков 3  
тел.: 02/ 973 28 87; факс: 02/ 973 27 66  
e-mail: office@polymeta.bg  
www.polymeta.bg

# DMG

DMG - TECHNOLOGIES FOR TOMORROW

Всички новини за DMG можете да намерите на адрес: [www.dmg.com](http://www.dmg.com)



## ОСНОВНИ ФАКТИ ЗА СЕРИЯ HSC

- Термосиметрична портална конструкция за абсолютна дълговременна стабилност
- 5-осна прецизна машина с интегрирана шарнирна/въртяща ос
- Линейна технология по ос X/Y/Z с > 2g
- Високомоментни двигатели с водно охлаждане във въртящите оси
- Високопроизводителни шпиндели HSC с водно охлаждане, макс. 42 000 мин<sup>-1</sup>
- Управление DMG ERGOline® с екран 19" и 3D софтуер
- Стандарт при управленията: HSC можете да закупите със Siemens 840D Solution line или с Heidenhain iTNC530
- Може да се закупи и като машинна версия ULTRASONIC



# супермаркет Лемаз®

# gourmet







- Проектиране и изграждане на инсталации за производство на цветни метали
- Газификация на металургични пещи, работили преди това с газьол, мазут и други горива
- Проектиране и изграждане на инсталации за неутрализиране на технологични газове
- Проектиране и изграждане на инсталации за преработка на металургични отпадъци
- Топлоизолация на тръбопроводи и газопроводи със свръхлеки химически устойчиви материали (от -70°C до +130°C)
- Антикорозионни и киселиннорустоустойчиви покрития
- Система за управление на качеството ISO 9001:2000








София 1407, бул. „Черни Врџ“ 67  
 Тел.: (02) 962 5366, 868 7203, Факс: (02) 868 7196  
 e-mail: info@ecotech-eng.com, tassev@ecotech-eng.com  
 www.ecotech-eng.com








## CENTRE OF EXCELLENCE

funded by MEYS of Republic of Bulgaria, contract № D00-106-5/12.2008

### Fields of Activities

[www.ce-tus.eu](http://www.ce-tus.eu)



Where used?











## **ПРОГРАМЕН КОМИТЕТ**

### **Членове от БЪЛГАРИЯ**

**Чл. кор. проф. д-р Димитър БУЧКОВ, ТУ-София**

**Чл. кор. проф. д.т.н. Венелин ЖИВКОВ, ТУ-София**

**Чл. кор. д.т.н. Стефан ВОДЕНИЧАРОВ, БАН**

**Проф. д.т.н. Александър ЖЕЛЕВ, ТУ-София**

**Проф. д.т.н. Венцислав ТОШКОВ, ТУ-София**

**Проф. д.т.н. Виктор АНЧЕВ, ТУ-София**

**Проф. д.т.н. Витан ГЪЛЪБОВ, ТУ-София**

**Проф. д.т.н. Владимир ВИТЛИЕМОВ, РУ „Ангел Кънчев”**

**Проф. д.т.н. Георги ПОПОВ, ТУ-София**

**Проф. д.т.н. Димитър ГЕОРГИЕВ, ТУ-Варна**

**Проф. д.т.н. Михаил МИЛКОВ, ТУ-София**

**Проф. д.т.н. Николай ЛОЛОВ, ТУ-София**

**Проф. д.т.н. Николай МИНЧЕВ, ТУ-Варна**

**Проф. д.т.н. Сашо ГЕРГОВ, ТУ-София**

**Проф. д.т.н. Светослав СИМЕОНОВ, ТУ-Габрово**

**Проф. д-р Ангел ДИКОВ, ТУ-София**

**Проф. д-р Васил ГЕОРГИЕВ, ТУ-Пловдив**

**Доц. д-р Петър ДОБРЕВ, ТУ-София**

**Доц. д.т.н. Георги МИШЕВ, ТУ-Пловдив**

**Доц. д.т.н. Николай АНГЕЛОВ, ТУ-София**

**Ст. н.с. II ст. д-р Емил МАНОАХ, БАН**

**Ст. н.с. II ст. д-р Костадин КОСТАДИНОВ, БАН**

**Маг. икон. Николай КЪЛБОВ, Фирма СПАРКИ ЕЛТОС, Ловеч**

**Маг. инж. Яко ПИЛОСОФ, Фирма КОНТРАКС, София**

**Д-р инж. Венцислав СЛАВКОВ, Фирма СПЕСИМА ООД, София**

**Боряна КАДМОНОВА, Фондация ЕВРИКА, София**

### **Членове от ЧУЖБИНА**

**Проф. д-р Живка ОВЧАРОВА, ЛЕСК, Карлсруе, Германия**

**Проф. д-р Стефан ДИМОВ, МЕК, Кардиф, Уелс**

**Проф. д-р Йозеф БРИЧТА, Острава, Чехия**

**Проф. д-р Леон КУКИЕЛКА, Козжалин, Полша**

**Проф. д-р Александър ДИМИТРОВ, Скопие, Република Македония**

**Проф. д-р Ле ИНАН, Харбин, Китай**

**Проф. д-р Ненад ПАВЛОВИЧ, Ниш, Сърбия**

**Проф. д-р Миодраг ЗЛОКОЛИЦА, Нови Сад, Сърбия**



## **PROGRAMME COMMITTEE**

### **Local Members:**

**Corr. mem. Prof. Ph. D. Dimitar BUCHKOV, TU-Sofia**  
**Corr. mem. Prof. D Sc Venelin JIVKOV, TU-Sofia**  
**Corr. mem. Prof. D Sc Stefan VODENICHAROV, BAS**  
**Prof. D Sc Aleksandar JELEV, TU-Sofia**  
**Prof. D Sc Vencislav TOSHKOV, TU-Sofia**  
**Prof. D Sc Viktor ANCHEV, TU-Sofia**  
**Prof. D Sc Vitan GALABOV, TU-Sofia**  
**Prof. D Sc Vladimir VITLIEMOV, RU „Angel Kanchev” - Ruse**  
**Prof. D Sc Georgi POPOV, TU-Sofia**  
**Prof. D Sc Dimitar GEORGIEV, TU-Varna**  
**Prof. D Sc Mihail MILKOV, TU-Sofia**  
**Prof. D Sc Nikolay LOLOV, TU-Sofia**  
**Prof. D Sc Nikolay MINCHEV, TU-Varna**  
**Prof. D Sc Sasho GERGOV, TU-Sofia**  
**Prof. D Sc Svetoslav SIMEONOV, TU-Gabrovo**  
**Prof. Ph. D. Angel DIKOV, TU-Sofia**  
**Prof. Ph. D. Vassil GEORGIEV, TU-Plovdiv**  
**Assoc. Prof. Ph. D. Peter DOBREV, TU-Sofia**  
**Assoc. Prof. D Sc Georgi MISHEV, TU-Plovdiv**  
**Assoc. Prof. D Sc Nikolay ANGELOV, TU-Sofia**  
**Assoc. Prof. Ph. D. Emil MANOACH, BAS**  
**Assoc. Prof. Ph. D. Kostadin KOSTADINOV, BAS**  
**Dipl. Eng. Nikolay KALBOV, “Sparki Eltos” Plc**  
**Eng. Jacko PILLOSSOF, KONTRAX, Sofia**  
**Ph. D. Eng. Vencislav SLAVKOV, SPESIMA GmbH, Sofia**  
**Boriana KADMONOVA, EVRIKA Foundation, Sofia**

### **International Members:**

**Prof. Ph. D. Jivka OVTCHAROVA, LESK, Karlsruhe, Germany**  
**Prof. Ph. D. Stefan DIMOV, MEC, Cardiff, Wales**  
**Prof. Ph. D. Josef BRICHTA, Ostrava, Czech Republic**  
**Prof. Ph. D. Leon KUKIELKA, Koszalin, Poland**  
**Prof. Ph. D. Aleksandar DIMITROV, Skopje, Macedonia**  
**Prof. Ph. D. Lai YINAN, HUST/Harbin University of Science and Technology**  
**Prof. Ph. D. Nenad D. PAVLOVIC, Nis, Serbia**  
**Prof. Ph. D. Miodrag ZLOKOLICA, Novi Sad, Serbia**

**ТЕМАТИЧНИ НАПРАВЛЕНИЯ:**

- **Материалознание и технология на металите**
- **Виртуално инженерство, CAD/CAM/CAE, Rapid Prototyping & Tooling, MEMS**
- **Нанотехнологии и наноматериали**
- **Екология и инженеринг на околната среда**
- **Синтез и анализ на механизми и машини**
- **Мехатроника и мехатронни системи**
- **Технология на машиностроенето и производствена техника**
- **Роботизирани системи и автоматизация на производството**
- **Трибология и триботехнологии**

**ОРГАНИЗАЦИОНЕН КОМИТЕТ:**

*Председател:* Проф. д.т.н. Йордан ГЕНОВ

*Почетен съпредседател:* Проф. д-р Камен ВЕСЕЛИНОВ, Ректор на ТУ-София

*Почетен съпредседател:* Проф. д-р Никола КАЛОЯНОВ, Зам. Ректор по НПД на ТУ-София

*Зам. председател:* Доц. д-р Георги ТОДОРОВ, Декан на МТФ

**НАУЧНИ СЕКРЕТАРИ:**

Доц. д-р Йорданка ПЕТРОВА, МТФ, ТУ-София

Доц. д-р Николай НИКОЛОВ, МТФ, ТУ-София

**СЕКРЕТАРИАТ:**

Доц. д-р Панчо ДАНАИЛОВ, Зам. Декан на МТФ

Доц. д-р Вътко ДРАГАНОВ, Зам. Декан на МТФ

Доц. д-р Валентин КАМБУРОВ, ръководител кат. МТМ

Доц. д-р Георги САЕВ, кат. МТМ

Доц. д-р Иларио АСТИНОВ, кат. ТМММ, МТФ

Н.с. инж. Любен ЦАНКОВ, МТФ

Маг. инж. Божидар ПЕТРАКИЕВ, Елемаг, София

**КООРДИНАТОР:**

Доц. д-р Николай НИКОЛОВ, ТУ-София, МТФ

E-mail: nickn@tu-sofia.bg

Tel.: 0895 590 383

**MAIN TOPICS:**

- **Materials Science and Technology**
- **Virtual engineering, CAD/CAM/CAE, Rapid Prototyping & Tooling, MEMS**
- **Nanotechnology and Nanomaterials**
- **Environmental Engineering and Ecology**
- **Synthesis and Analysis of Mechanisms and Machines**
- **Mechatronics and Mechatronics Systems**
- **Technology of Mechanical Design and Manufacturing**
- **Manufacturing Automation and Robotics**
- **Tribology and Tribotechnologies**

**ORGANIZING COMMITTEE:**

***Chairman:*** Prof. D Sc Jordan GENOV

***Honorary Chairman:*** Prof. Ph. D. Kamen VESSELINOV, Rector of TU-Sofia

***Honorary Chairman:*** Prof. Ph. D. Nikola KALOYANOV, Vice Rector – Research and Development Activities – TU-Sofia

***Vice Chairmen:*** Assoc. Prof. Ph. D. Georgi TODOROV, Dean of MTF

**SCIENTIFIC SECRETARY:**

**Assoc. Prof. Ph. D. Jordanka PETROVA, MTF, TU-Sofia**

**Assoc. Prof. Ph. D. Nikolay NIKOLOV, MTF, TU-Sofia**

**SECRETARIAT:**

**Assoc. Prof. Ph. D. Pancho DANAILOV, Vice Dean of MTF**

**Assoc. Prof. Ph. D. Vutko DRAGANOV, Vice Dean of MTF**

**Assoc. Prof. Ph. D. Valentin KAMBUROV, Department MST, MTF**

**Assoc. Prof. Ph. D. Georgi SAEV, Department MST, MTF**

**Assoc. Prof. Ph. D. Ilario ASTINOV, Department TMMM, MTF**

**Eng. Lyuben TZANKOV, M Sc, MTF**

**Eng. Bojidar PETRAKIEV, M Sc, ELEMAG, Sofia**

**COORDINATOR:**

**Assoc. Prof. Ph. D. Nikolay NIKOLOV, TU-Sofia, MTF**

**E-mail: [nickn@tu-sofia.bg](mailto:nickn@tu-sofia.bg)**

**Tel.: 0895 590 383**

## **65 ГОДИНИ МАШИННО-ТЕХНОЛОГИЧЕН ФАКУЛТЕТ**

**Уважаеми Дами и Господа,**

**Уважаеми Колеги,**

МТФ – с традициите и опита, и със самочувствието на основоположник на техническото образование в България, вече 65 години подготвя специалисти в областта на машиностроенето и технологиите. От далечната 1945 г., когато е обнародван указа (ДВ, бр.248/ 24.10.1945 г.) за създаване на Държавна политехника и откриване на Машинен факултет до сега са подготвени хиляди инженерни кадри, създали през годините съвременната българска индустрия и намерили професионална реализация както във всички сфери на дейност в България, така и в много страни по света.

МТФ е бил винаги и водещ национален център в областта на научно-изследователската и приложна дейност. Натрупаният опит и традициите, съчетани с развитието на най-високи проектантски и производствени технологии, икономическата среда в България и процесите на глобализация, позволяват обединяване на усилията на специалисти от различни области и страни за постигане на синергиен ефект в обучението и изследователската дейност. В последните години, чрез средствата на виртуалното инженерство и микро технологиите, създадената изследователска инфраструктура и партньорството с водещи университети и компании се постига бързо развитие на иновативна среда както за фундаментални изследвания, така и за модерно обучение и подпомагане на предприятията за тяхната конкурентоспособност в икономиката на знанието.

Днес с гордост и удовлетворение провеждаме 26-та научна конференция, посветена на 65 годишнината на МТФ при ТУ – София и 100 годишнината от рождението на акад. Ангел Балеви, стъпили здраво на традициите и гледайки уверено към предизвикателствата на бъдещето.

Предоставените доклади са само част от научните изследвания, резултатите и търсенията на преподавателите, научните сътрудници и докторантите от катедрите и лабораториите на МТФ и са отражение на стремежите, динамиката и нивото на обучението и изследванията на Факултета.

За нас е чест да посрещнем и представим и нашите колеги от Университети и научни организации от Германия, Великобритания, Русия, Румъния, Гърция, Сърбия, Украйна, Турция и други страни, с които ние партнираме и принадлежим към глобалния професионален и академичен свят.

Благодарим на фирмите и спонсорите, които спомогнаха за организирането и провеждането на този научен форум.

Искрено се надяваме, че тази конференция ще бъде интересна и полезна за всички нас.

Да си пожелаем на добър час и ползотворна работа на XXVI международна научна конференция.

Организационен комитет на конференцията

България, Созопол

Септември, 2010 г.

## **65 YEARS FACULTY OF MACHINE TECHNOLOGY**

**Dear Ladies and Gentlemen,**

**Dear Colleagues,**

The Faculty of Machine Technology has the traditions and experience, as a founder of Bulgarian technical education, almost for 65 years to teach specialists in mechanical engineering and production technologies. From the distant year 1945, when the decree was promulgated (SG No.248 / 24.10.1945) for establishing the State Polytechnic and the Faculty of Machine Technology, opening till now thousands of engineers are educated, that have built during the years the contemporary Bulgarian industry and have found their professional realization in all fields of activities in Bulgaria as well as in many other countries around the world.

The Faculty have been always a leading national centre in the field of research and applied sciences. The accumulated experience and traditions, coupled with the development of the highest development and production technologies, the economic environment in Bulgaria and the processes of globalization, allow bringing together the efforts of specialists from different fields and countries to achieve a synergy effect in education and research. A rapid development of innovative environment for both R&D and modern training have been achieved in the recent years, by means of virtual engineering and micro technologies, good developed technical infrastructure and created partnerships with leading universities and companies. This also supports enterprises for their competitiveness in the economy knowledge.

Today we are proud and pleased to organize the 26th scientific conference devoted to 65 years of the Faculty of Machine Technology at Technical University of Sofia and 100 Anniversary of Academician Angel Balevski, treading firmly on the traditions and looking confidently to the challenges of the future.

The presented reports are only part of the research activities and results of all professors, researchers and PhD students from departments and laboratories of the Faculty and reflect its aspirations, the dynamics and level of training and research.

It is our honor to introduce and welcome our colleagues from Universities and scientific research institutes in Germany, Britain, Russia, Romania, Greece, Serbia, Ukraine, Turkey and other countries with which we has a good partnership and belong to the global academic and professional world.

We are thankful to the companies and sponsors who helped the organization of this scientific forum.

We sincerely hope that this conference will be interesting and useful for all of us.

Let me wish you a fruitful work and success during the XXVI International Scientific Conference.

The Conference Organizing Committee

Bulgaria, Sozopol

September, 2010



## 100 ГОДИНИ ОТ РОЖДЕНИЕТО НА АКАД. АНГЕЛ БАЛЕВСКИ

На 15.04.2010 г. се навършват 100 години от рождението на големия български учен, организатор на българската наука и държавник акад. Ангел Балеvски, един от създателите на българското висше техническо образование и основоположник на българската научна школа по металознание и технология на металите.

Академик Балеvски е роден в гр. Троян. Завършил е машинно инженерство през 1934 г. в Бърно. През 1945 г. в София е избран за професор в Държавната политехника. Академик Ангел Балеvски създава Катедра по механична технология и фабрична организация, преименувана по-късно в катедра „Металознание и технология на металите“, която ръководи повече от четири десетилетия.

От 1948 до 1953 г. той е Зам. Ректор на Държавната политехника, а от 1966 до 1968 г. - Ректор на Висшия машинно-електротехнически институт. За дългогодишната си преподавателска дейност той е участвал в подготовката на повече от десет хиляди машинни инженери и ръководители в промишлеността.

Акад. Ангел Балеvски провежда активна научно-изследователска дейност в Българската академия на науките като ръководител на секция по „Металознание и технология на металите“ към Техническото отделение на БАН, която прераства в „Централна лаборатория по металознание“. През 1951 г. е избран за член-кореспондент. През 1967 г. е избран за академик. На 1 януари 1967 г. с негово активно участие е създаден институт „Металознание и технология на металите“. Най-голямото постижение на института е развитието на методите за обработване на материалите с газово противоналягане, създадени въз основа на патент на акад. Ангел Балеvски заедно с чл. кор. Иван Димов.

Методите „Балеvски-Димов“ получиха световно признание. За научната и практическата стойност на методите е показателно, че в

началото на 80-те години на 20 в. те получиха световно признание като едно от най-значимите инженерни постижения на века. Тогава Институтът по металознание получава от фондация „Кьорбер“ в Хамбург най-авторитетната европейска награда за научно-технически принос, равностойна на Нобеловата награда за инженерно-техническа дейност. Наградата беше присъдена за развитие на металознанието, металургията, металолеенето и за машините за леене на детайли от традиционни и новосъздадените от сътрудници на института оригинални висококачествени сплави.

На 9 май 1968 г. акад. Ангел Балеvски е избран за председател на БАН, която ръководи успешно повече от 20 години.

Под негово ръководство БАН установява сътрудничество с много Академии и други научни институции в СССР, САЩ, Чехословакия, Германия, Австрия, Великобритания и др.

През 1971-1989 г. акад. Ангел Балеvски е член на Държавния Съвет на НРБ, съпредседател на Международната академия на науките в Мюнхен (1988 г.), член на Съвета на Пъгуошкото движение на учените за мир (1971 г.). Носител е на много ордени и медали: „Академични палми“ на Френското правителство, Златен медал „М.В.Ломоносов“ на Руската Академия на науките, Златен медал на Университета в Хамбург, Златен медал „За заслуги пред науката и човечеството“ на Чехословашката Академия на науките.

Акад. Ангел Балеvски е Народен деятел на науката, носител на Почетния знак на БАН „Марин Дринов“ и на Почетния знак на Софийския Университет. Той е доктор хонорис кауза на Технически Университет - София.

Високо ерудиран човек, акад. Ангел Балеvски омайва събеседниците си със своите знания не само в областта на металознанието, но и по литература, музика, история, философия.

В последните си години акад. Ангел Балеvски е автор на лирични и хумористично-сатирични книги: „Българиада“ и „Настроения“ (1997), а в книгата си „Тревоги“ (1995), прави равносметка на своя живот, обхващащ голяма част от 20 век.

## СЪДЪРЖАНИЕ

<b>МАТЕРИАЛОЗНАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ НА МЕТАЛИТЕ</b>	<b>11</b>
<i>Валентин КАМБУРОВ, Йордан ГЕНОВ</i>	
<b>Моделиране и симулация на комбинирани схеми на формоизменение с интензифицирана пластична деформация</b>	<b>13</b>
<i>Серьожа ВЪЛКАНОВ, Ангел ВЕЛИКОВ</i>	
<b>Рентгенов микроанализ на азот и въглерод в стомани P6M5</b>	<b>21</b>
<b>ВИРТУАЛНО ИНЖЕНЕРСТВО, CAD/CAM/CAE, RAPID PROTOTYPING &amp; TOOLING, MEMS</b>	<b>27</b>
<i>Георги ТОДОРОВ, Венелин ЖИВКОВ, Николай НИКОЛОВ, Вътко ДРАГАНОВ</i>	
<b>Възможности за използване на кинетичната енергия при спиране на транспортните средства</b>	<b>29</b>
<i>Георги ТОДОРОВ, Николай НИКОЛОВ, Явор СОФРОНОВ, Панчо ДАНАИЛОВ, Петър ГАБРОВСКИ</i>	
<b>Възможности на лазерната технология за обработване на различни материали от инженерната практика</b>	<b>35</b>





***МАТЕРИАЛОЗНАНИЕ  
И ТЕХНОЛОГИЯ НА  
МЕТАЛИТЕ***





## MODELING AND SIMULATION OF COMBINED SCHEMES FOR FORMING WITH SEVERE PLASTIC DEFORMATION

Valentin KAMBUROV    Jordan GENOV

**Abstract:** Obtaining of ultrafine grained (nano- and submicrocrystalline) dispersed structure within bulk metal specimens could be realized during different methods of severe plastic deformation, which are repeated, cyclic, ensuring high levels of deformation ratio, but are not targeting on modification of shapes and dimensions of the original billets. The typical approach is based on realizing of deformation scheme of shear deformation under high enough spherical stress tensor.

There is also possible to combine the severe plastic deformation to appropriate schemes of forming, for example, equal channel two angular pressing with in-between extrusion, constrained groove pressing with forward extrusion forging, combined with torsion forward extrusion. Some combined with severe plastic deformation schemes for forming are simulated in order to estimate effect of combination on a concentration of shear deformation zones, non-uniformity of deformations, as well as level of deformation ratio.

**Key words:** plastic deformation, bulk metals forming, computer simulation.

## МОДЕЛИРАНЕ И СИМУЛАЦИЯ НА КОМБИНИРАНИ СХЕМИ НА ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ С ИНТЕНЗИФИЦИРАНА ПЛАСТИЧНА ДЕФОРМАЦИЯ

Валентин КАМБУРОВ    Йордан ГЕНОВ

**Резюме:** Формирането на ултрафина (нано- и субмикроструктурна) дисперсна структура в обема на масивни метални образци може да бъде достигнато чрез различни схеми на интензивна пластична деформация, които са повтарящи се, циклични, свързани с натрупването на големи степени на деформация, но не целят изменение на формата и размерите на изходната заготовка. Типичният подход е базиран върху реализирането на деформационната схема на чисто плъзгане, съчетана с подчертано натисков сферичен тензор на напреженията.

Възможно е и комбинирането на интензифицираната пластична деформация с подходящи схеми на формоизменение, напр., равноканална двуъглова екструзия с междинно пресоване, ограничено знакопроменливо огъване с право изтичане, комбинирано с усукване право пресоване. За да се оцени ефекта от комбинирането върху концентрирането на зоните на „чисто плъзгане, неравномерността на деформациите, както и степента на достигната степен на деформация, няколко комбинирани схеми на формоизменение с интензифицирана пластична деформация са симулирани с подходящ програмен продукт.

**Ключови думи:** интензифицирана пластична деформация, масивни метални образци, компютърно симулиране.

### 1. ВЪВЕДЕНИЕ

Формирането на ултрафина (нано- и субмикроструктурна) дисперсна структура „отгоре - надолу” в обема на масивни метални образци може да бъде достигнато чрез различни схеми на интензивна пластична деформация (ИПД) [1, 4]. Тези схеми са специално разработени за постигане на ултрадисперсна структура с големина на кристалитите около 0.05 - 0.5  $\mu\text{m}$  в заготовки с големина 10 - 200 mm. Процесът на деформиране е повтарящ се, цикличен, свързан с натрупването на големи степени на деформация, но не цели изменение на формата и размерите на изходната заготовка. Типичният подход е реализирането на деформационната схема на чисто плъзгане, съчетана с подчертано натисков сферичен тензор на напреженията.

При схемите с ИПД се разчита на значителна неравномерност (локализиране) на деформации, тъй като деформираната чрез чисто плъзгане зона е съсредоточена в сравнително малък участък или напречно сечение на заготовката, но високото хидростатично налягане, което се поддържа в целия обем на заготовката, елиминира опъновите напрежения. Липсата на опънови напрежения спира получаването на пукнатини т.е. не води до разрушаването на заготовката, а напротив материалът изпада в състояние, известно като свръхпластичност. Енергията за съсредоточената пластична деформация, която не се консумира за формоизменение и разрушаване, трансформира структурата на метала. Ако се елиминира и процеса на рекристализация, който над определени температури следва или протича едновременно с деформационния процес резултатът е издребняване на структурата на материала и формиране на ултрафина дисперсна структура.

## **2. СЪЩНОСТ НА МЕТОДИТЕ**

За да се реализира ИПД се използват механични схеми с натискови напрежения, затворено или силно ограничено деформационно пространство при съсредоточена деформационна зона. Концентрираната в сравнително малък обем или напречно сечение зона на чисто плъзгане дава възможност за редуването или ограждането ѝ със зони на формоизменение, което може да увеличи хидростатичното налягане до желаните стойности, премахващи изцяло опасността от опънови напрежения.

Отношението на деформираната към недеформираната зона от заготовката и броя на преходите, за които се възстановява първоначалната форма на заготовката, разделя известните методи за ИПД [2, 3] в три големи групи: - методи с постепенно, но цялостно деформиране на обема на заготовката в един преход с възстановяване на изходната форма, следван от пространствено обръщане на заготовката; - методи с етапно деформиране на определени части в първи преход и преход за възстановяване на формата, следвани от преход за деформиране на недеформираните части и ново възстановяване на изходната форма; - методи за едновременно деформиране (в „пакет“) на няколко отделни заготовки, свързвани в монолитна изковка.

Типично за механичните схеми от първата група е, че деформационното пространство е затворено и в повечето случаи изцяло запълнено от деформиращата се заготовка. При постепенното деформиране на последователни сечения от заготовката не настъпва съществена промяна на напречните размери и формата на заготовката. Това позволява многократно (циклично) деформиране на заготовката след междинно изправяне или калиброване. Известните схеми от тази група са: - затворено усукване под високо налягане (constrained high pressure torsion - CHPT); - равноканална ъглова екструзия (пресоване) (equal channel angular extrusion / pressing - ECAE / ECAP), равноканално ъглово изтегляне (ECAD), многоъглова равноканална екструзия (equal channel multiangular extrusion - ECMAE), винтова екструзия (пресоване) (twist extrusion - TE) с противоналягане, разширяваща екструзия (spread extrusion - SE), циклично пресоване и сплескване (тип „пясъчен часовник“) с противоналягане (cyclic extrusion compression - CEC (sandglass extrusion - SGE)), затворено в съставен контейнер усукване под налягане (torsion in a compound container under pressure - TCCP) и пр.

При механичните схеми втората група, деформационното пространство е също ограничено, но в повечето случаи заготовката не го изпълва изцяло. Процесът на получаване на изходната форма на заготовката е разделен на преходи, като в първия преход се деформират само определени части от заготовката, които се редуват с недеформирани участъци. След първия преход изковката е със силно изменена форма. Във втория преход деформираната заготовка възстановява първоначалните си форма и размери, а в следващите преходи се деформират само недеформираните (при първи преход) зони. Известните схеми от тази група са: - многоосно коване (multi directional / axial 3D forging - MDF); - циклично затворено сплескване (cyclic closed-die forging - CCDF); многократно гофриране и изправяне (repetitive corrugation and straightening - RCS); затворено (ограничено) гофриране и изправяне (constrained groove pressing - CGP) и пр.

При механичните схеми от трета група се използват класически схеми на формоизменящо деформиране (право пресоване, валцоване, коване и пр.), но заготовката е съставна. По този начин намаляването на напречното сечение, като резултат от деформирането (обикновено неколккратно удължаване) се компенсира чрез използване на съставна заготовка, получена от наслагането на няколко скъсени изковки. Процесите предполагат едновременното деформиране на няколко (поне две) удължени заготовки в „пакет“. Повтаряемостта на процеса на деформиране е възможен само в условията и при реализирането на ковашко-пресово заваряване между заготовките по време на пакетното деформиране, т.е. получаване на монолитна изходна изковка. Известните схеми от тази група са: - пакетното коване с междинно

огъване на изкованата заготовка; - пакетната хидроекструзия (bale hydro extrusion - BH), многократно пресово свързване при валцоване (accumulative roll-bonding - ARB), пакетно усукване под високо налягане (bale high pressure torsion - BHPT) и пр.

Механични схеми на интензифициране могат да се прилагат и при непрекъснати или полунепрекъснати процеси, реализирани чрез пресоване, валцоване или тяхното комбиниране, например: ECAP по непрекъснатата „Push-pull” схема, непрекъснато валцоване и пресоване през дюза, ECAP – Conform; непрекъснато периодично гофриране и изправяне чрез валцоване (repetitive corrugation and straightening - RCS), както и многократното пресово свързване при валцоване (ARB).

Целта на работата е изследване на възможността за компютърно симулиране на комбинирани схеми за интензивна пластична деформация, свързано с определяне на напрегнатото, деформираното и термичното състояние на деформирания материал.

### **3. МЕТОДИКА НА ИЗСЛЕДВАНЕ**

#### **3.1. Подбор на комбинирани методи за ИПД за моделиране**

През последните години за издребняване на структурата при пластична деформация се разработват [5]: - комбинации от различни методи за интензивно пластично деформиране; - методи за ИПД, съчетани с метод за термомеханично обработване; - методи за ИПД, реализирани при криогенни температури; - известни деформационни схеми при нови технологични режими, като хидростатично пресоване, асиметрично валцоване, интензивно повърхностно деформиране и пр.

При комбинираните методи за ИПД разглеждани в работата, се съвместяват: - деформационната схема на чисто плъзгане, съсредоточено в определен обем от заготовката; с - високо хидростатично налягане, поддържано чрез формоизменение на съседни зони. Предпочитат се механични схеми на деформиране, характеризиращи се с натисков тензор на напрегнатото състояние (право пресоване, закрито обемно щамповане, обемно щамповане с изтичане и пр.).

В работата са моделирани и изследвани два комбинирани методи за ИПД: - двуъглова канална екструзия (от определената първа група), комбинирана с право пресоване; - затворено (ограничено) гофриране чрез сбиване (от определената втора група), комбинирано с преход за закрито обемно щамповане с обратно изтичане. Целта на симулирането е да се установи възможността за реализиране на посочените комбинирани методи и да се оптимизира формата на деформационното пространство по отношение запълването му с деформирания материал и степента на концентриране на зоните с протичаща интензивна деформация.

#### **3.2. Подбор на специализиран софтуерен пакет**

За симулиране процесите на пластично деформиране се използват различни специализирани софтуерни пакети, като например: DeForm, QForm, Simufact, Marc, Ansys и пр. Въпреки различната им степен на специализация и пригодност за симулиране на големи пластични деформации, те имат една и съща последователност на действие, включваща, генериране на модел (препроцесинг), посредством графични конвертори (формати .dxf, .stl, .iges, .step и пр.); - пресмятане с метода на крайните елементи; - визуализация на резултатите (постпроцесинг). Всички пакети имат вградена библиотека от база данни за: - механични и термомеханични свойства на използваните материали (криви напрежение- деформация при набор от температури, скорост на деформация и пр.); - набор от смазващи вещества, - типово оборудване и съоръжения за обработване на материалите под налягане. Почти всички пакети имат и допълнителни модули, симулиращи изменението на микроструктурата на деформирания материал.

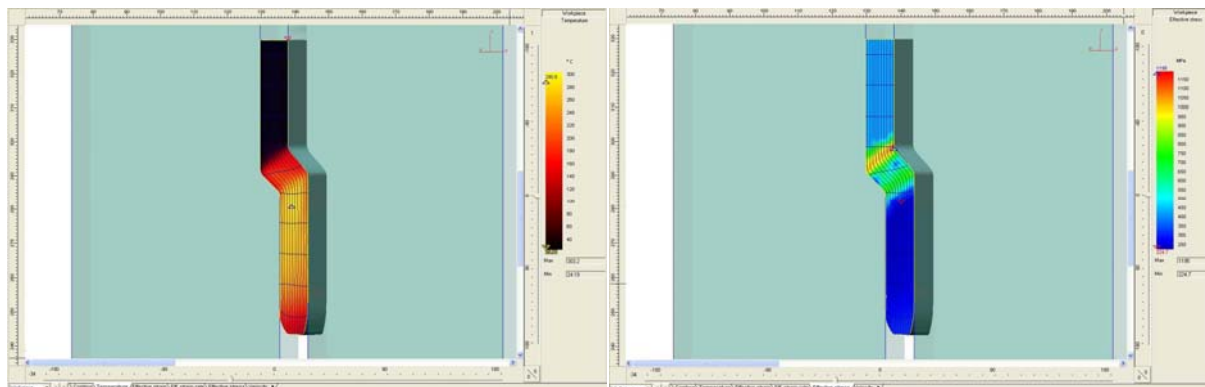
В работата е използван програмният пакет CAD/CAE - продукт Quantor Form 2D/3D lite version 5.1.1. Начални условия (от набора на пакета) за моделиране: - материал за изходна заготовка - 34CrMo4; - размери на напречното сечение 10x10 mm; - начална температура 100<sup>o</sup>C (студена пластична деформация); - скорост на деформиране 0.002 mm/s; - хидравлична преса.

Използуваният програмен продукт визуализира неравномерността на: - разпределението на температурата; - степента на концентриране на интензивността на деформациите в отделните сечения на заготовката; - разпределението на интензивността на напреженията; както и - разпределението на интензивността на скоростите на деформация и температурното разпределение.

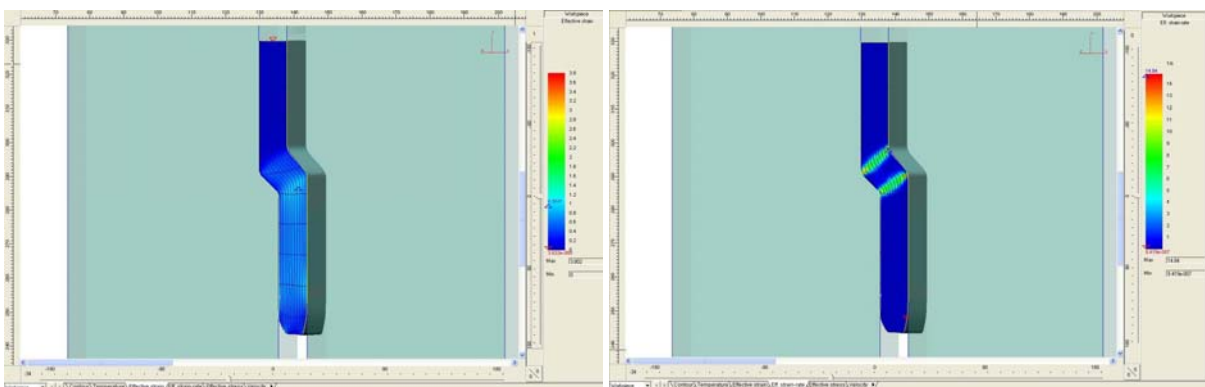
#### **4. РЕЗУЛТАТИ И ОБСЪЖДАНЕ**

##### **4.1. Моделиране на двуъглова канална екструзия, комбинирана с право пресоване между зоните на „чисто“ плъзгане**

Методът използва две зони на чисто плъзгане, аналогично на двуъгловата равноканална екструзия, но каналът между тях е дюза с намаляващо сечение (фиг.1). По този начин между двете зони с ИПД е разположена зона за право пресоване, което създава допълнително хидростатично налягане.



**а) Разпределение на температурата в обема на екструдирания заготовка**      **б) Разпределение на интензивността на напреженията**



**в) Разпределение на интензивността на деформациите**      **г) Разпределение на интензивността на скоростта на деформациите**

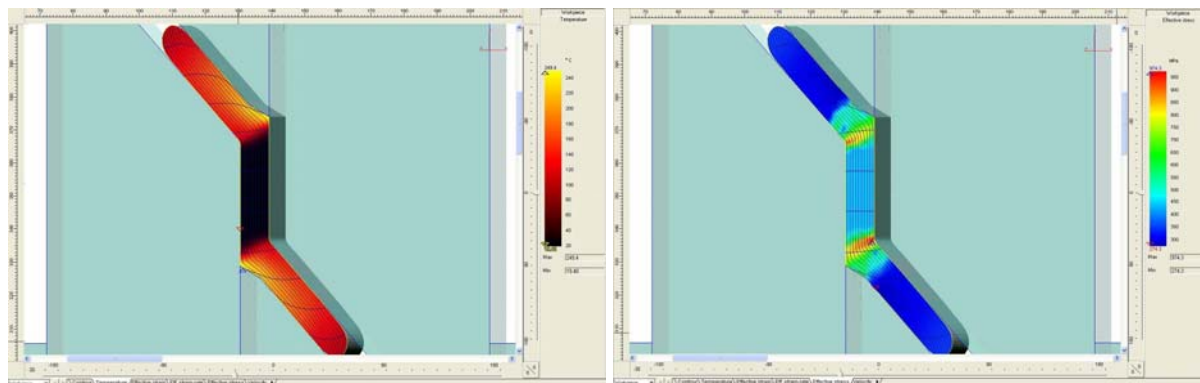
**Фиг. 1** Двуъглова канална екструзия, комбинирана с право пресоване между зоните на „чисто“ плъзгане

При симулирането с програмния продукт (фиг. 1) се установява, че схемата с разпределение на напреженията, между двете концентрирани зони с ИПД се формира зона с увеличено (над 750 MPa) хидростатично налягане - фиг. 1б. Акумулираната интензивност на деформациите след втората зона на ИПД е над 0.9 - 0.98 - фиг. 1в. Крайната температура на изковката след деформиране е над 300°C - фиг. 1а.

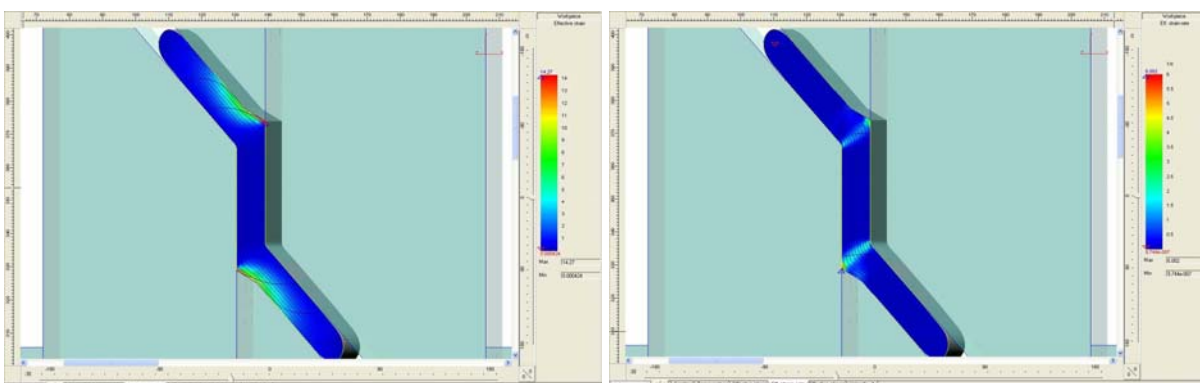
##### **4.2. Моделиране на двуъглова канална екструзия, комбинирана с право пресоване след зоните на „чисто“ плъзгане**

Методът използва също две зони на чисто плъзгане, аналогично на двуъгловата равноканална екструзия, но каналът след тях е дюза с намаляващо сечение (фиг. 2). По този начин след двете зони с ИПД са разположени зони за право пресоване, които създават допълнително хидростатично налягане.

При симулирането (фиг. 2) се установява, че при схемата с разпределение на интензивността на напреженията - фиг. 2б, пред двете концентрирани зони с ИПД се очертава зона с увеличено хидростатично налягане (над 450 MPa). Акумулираната интензивност на деформациите след локализираните зони за ИПД е под 1.0 - фиг. 2в. Крайната температура на изковката след деформиране е около 150°C - фиг. 2г.



**а) Разпределение на температурата в обема на екструдираната заготовка**      **б) Разпределение на интензивността на напреженията**



**в) Разпределение на интензивността на деформациите**      **г) Разпределение на интензивността на скоростта на деформациите**

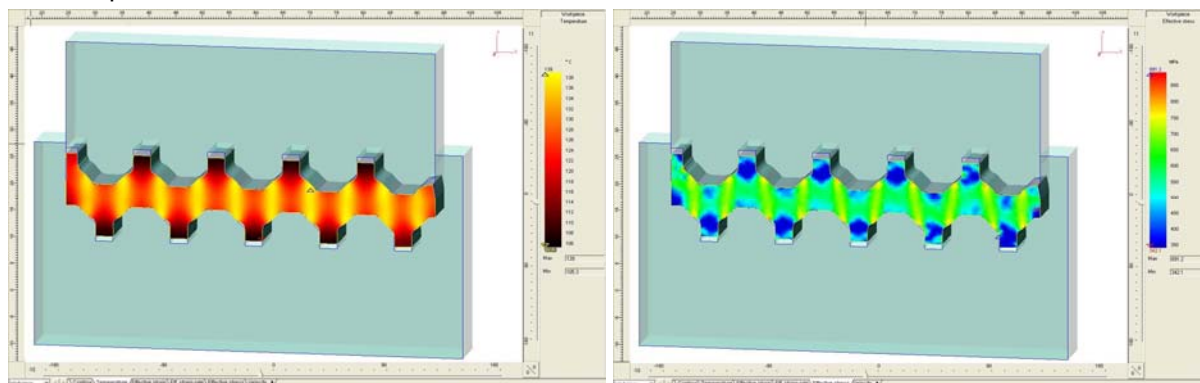
**Фиг. 2** Деуъглова канална екструзия, комбинирана с право пресоване след зоните на „чисто“ плъзгане

**4.3. Моделиране на затворено „ограничено“ гофриране комбинирано с право пресоване, с подготвителен преход за щамповане с комбинирано изтичане**

Методът използва редуващи се зони на чисто плъзгане в първи преход, като при схемата на ограничено гофриране, но е комбиниран с право пресоване (в издадените участъци) за поддържане на хидростатично налягане (фиг. 3).

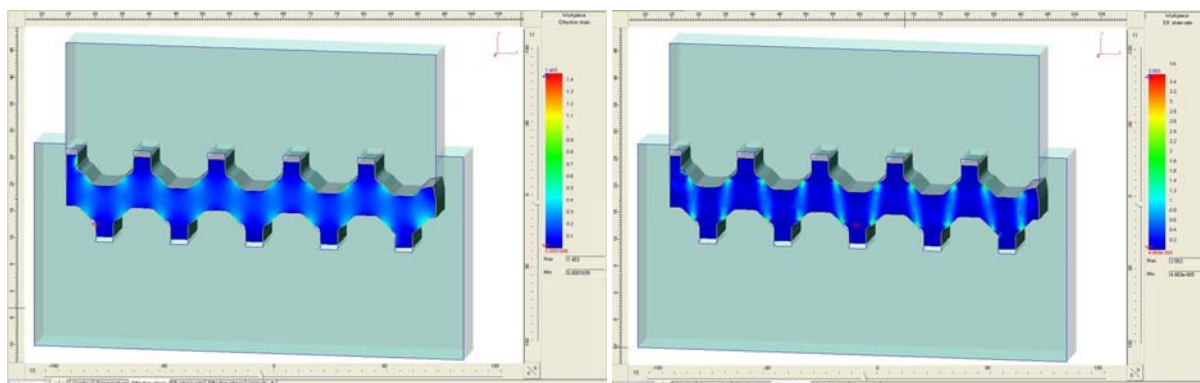
Резултатите от симулирането са дадени на фиг. 3. При схемата с разпределение на интензивността на напреженията - фиг. 3б, около зоните с ИПД са разположени зони с повишено хидростатично налягане (над 700 MPa). Акумулираната интензивност на деформациите в локализираните зони на деформираната изковка е около 0.5 - фиг. 3в. Крайната температура на изковката след деформиране е над 140°C - фиг. 3г.

Създаването на сложна по форма изходна заготовка предполага и затворен преход за получаването ѝ от изходната заготовка с проста паралелепипедна форма. За формиране на такава изковка при първи преход е използвана затворената схема на обемно щамповане с комбинирано изтичане.



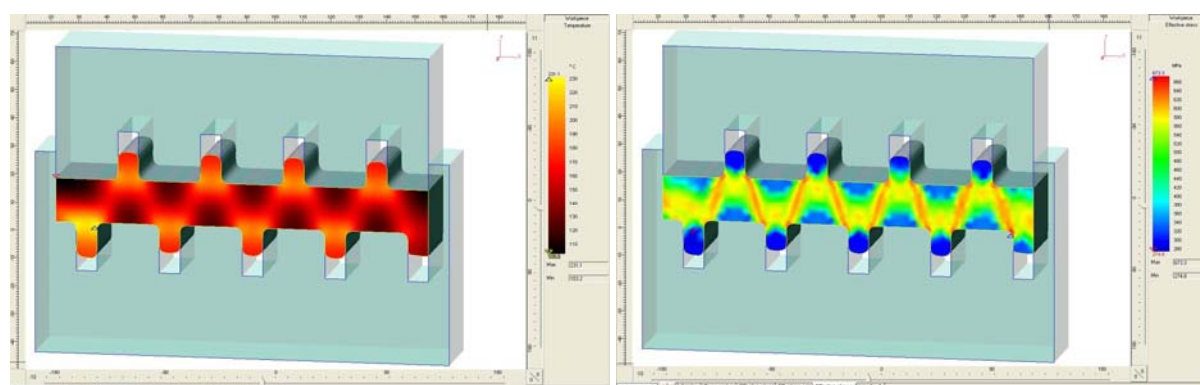
**а) Разпределение на температурата в обема на гофрираната заготовка**      **б) Разпределение на интензивността на напреженията**



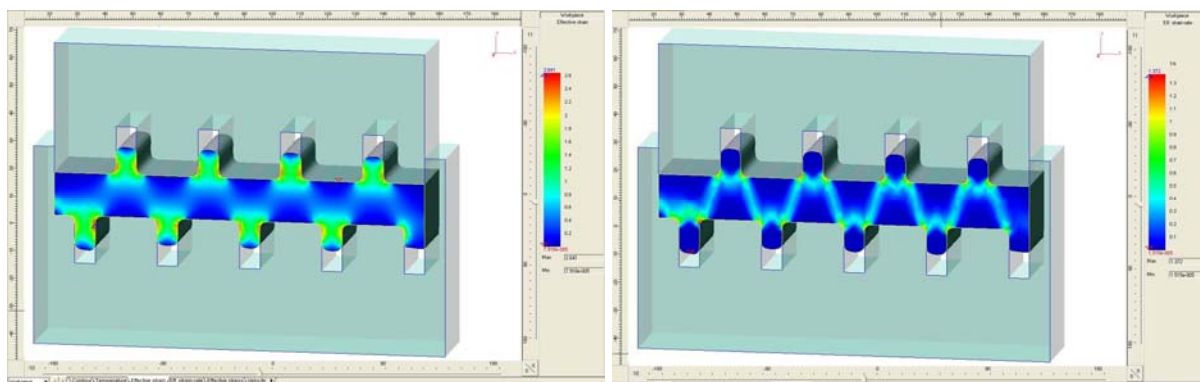


в) *Разпределение на интензивността на деформациите*      г) *Разпределение на интензивността на скоростта на деформациите*

**Фиг. 3 Затворено „ограничено“ гофриране, комбинирано с право пресоване**



а) *Разпределение на температурата в обема на заготовката*      б) *Разпределение на интензивността на напреженията*



в) *Разпределение на интензивността на деформациите*      г) *Разпределение на интензивността на скоростта на деформациите*

**Фиг.4 Подготвителен преход за гофриране чрез щамповане с комбинирано изтичане**

Резултатите от симулирането са дадени на фиг. 4. При схемата с разпределение на напреженията - фиг. 4б, се формира зиг-загообразна зона с повишено хидростатично налягане (над 550 МРа). Акумулираната интензивност на деформациите (след завършване на прехода) в зоните с ИПД е между 0.8-1.0 - фиг. 4г. Зоните с ИПД в края на прехода са с температура над 240<sup>o</sup>С - фиг. 4а.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Чрез симулиране със софтуерен пакет е потвърдена възможността за реализиране на комбинираните методи за интензивна пластична деформация, съвместяващи деформационната схема на чисто плъзгане, съсредоточено в определен обем от заготовката; с високо хидростатично налягане, поддържано чрез формоизменение на съседни зони.

2. Чрез симулиране със софтуерен пакет е определена възможността за реализиране на затворено (ограничено) гофриране, комбинирано с право пресоване, както и възможността за подготвителен преход на гофриране чрез щамповане с комбинирано изтичане.

3. При извършеното симулиране, за избрания материал (34CrMo4), е установено разположението и формата на деформационните зони при комбинираните схеми на: - двуъглова канална екструзия, комбинирана с право пресоване, между и след зоните на чисто плъзгане; - затворено (ограничено) гофриране, комбинирано с право пресоване; - подготвителен преход на гофриране чрез щамповане с комбинирано изтичане.

## **БЛАГОДАРНОСТИ**

Изследванията са финансирани от Национален фонд „Научни изследвания“, България – Договор № 102ни 112-5-2010 на НИС при Технически Университет – София.

Авторите изказват благодарност на съставителите и дистрибуторите на програмния пакет CAD/CAE - продукт Quantor Form 2D/3D lite version 5.1.1.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Valiev, R.Z., I.V. Alexandrov, *Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation*, Moscow, „Logos“, 2000, 272 p. (in Russian);
2. Dobatkin, S.V., *Bulk nanostructured materials obtained by severe plastic deformation*, Машиностроителна техника и технологии, Варна, 2003, 3-6;
3. Гагов В.И., Х.Р. Радев, Д.Д. Господинов, Е.Х. Янков, *Някои тенденции в изследването и приложението на ултрадребнозърнести материали*, АМО'09 конференция „Авангардни материали и обработки“, Кранево, България, 2009, т.1, 119-125;
4. Гагов В.И., Х.Р. Радев, Д.Д. Господинов, Е.Х. Янков, *Свойство и възможности за приложение на ултрадребнозърнести метали*, международна конференция „Унитех'09“, Габрово, 2009, II-228;
5. Azussima A., R.Kopp, A.Korhonen, D.Y.Yang, F.Micari, C.D. Lahoti, P. Groshe, J. Yanagimoto, N. Tsuji, A. Rocosovski, A. Yanagida, *Severe plastic deformation (SPD) processes for metals*, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2008, 57, 716-735.

## **КОРЕСПОНДЕНЦИЯ**

доц. д-р инж. Валентин КАМБУРОВ  
Технически Университет - София, катедра „Материалознание и технология на материалите“,  
e-mail: vvk@tu-sofia.bg

проф. д.т.н. инж. Йордан Генов  
Технически Университет - София, катедра „Материалознание и технология на материалите“,  
e-mail: jgenov@tu-sofia.bg





## X-RAY MICROANALYSIS OF NITROGEN AND CARBON IN STEEL P6M5

Seryozha VALKANOV      Angel VELIKOV

**Abstract:** Presented is an opportunity for quantitative X-ray microanalysis of carbon and nitrogen in complex alloy steels by X-ray microanalyzer with wave dispersion. We have prepared the necessary standards, we found optimal conditions for analysis and selected the appropriate program to correct the measured concentrations, that way was determined the quantitative composition for structural elements of the tool steel P6M5.

**Key words:** microanalysis, light elements, tool steels.

## РЕНТГЕНОВ МИКРОАНАЛИЗ НА АЗОТ И ВЪГЛЕРОД В СТОМАНИ Р6М5

Серьожа ВЪЛКАНОВ      Ангел ВЕЛИКОВ

**Резюме:** Представена е възможност за провеждане на количествен рентгенов микроанализ на въглерод и азот в сложно легирани стомани чрез рентгенов микроанализатор с вълнова дисперсия. Подготвени са необходимите еталони, установени са оптимални условия за анализ, подбрана е подходяща програмата за коригиране на измерените концентрации. Определен е количествения състав на структурните елементи на инструментална стомана Р6М5.

**Ключови думи:** микроанализ, леки елементи, инструментални стомани.

### 1. ВЪВЕДЕНИЕ

В практиката специални свойства на стоманите се постигат чрез легиране на желязната матрица с елементи на внедряване и заместване в определени съотношения. Комплексното легиране с няколко елемента на води до формирането на сложна микроструктура, изградена на базата на многокомпонентни фази. Познаването на участието на легиращите елементи в изграждането на фазите и разпределението им между структурните съставлящи са особено важни при избора на химичния състав, методите за получаване на материала и следващата му обработка (термична и механична), разработването и оптимизирането на технологията за производство и режимите на експлоатация на проектираните материали. Използването на рентгеновия микроанализ с неговата висока локалност е предпоставка за разширяване на познанието за строежа на изследвания материал.

Целта на работата е да се оптимизира режима за рентгенов микроанализ на азот и въглерод и да бъде приложен за определяне фазовия състав на инструментални стомани. Преодолени са трудностите при анализа на азот и въглерод в сплави чрез рентгенов микроанализатор с вълново дисперсионен спектрометър.

### 2. РЕЗУЛТАТИ И ОБСЪЖДАНЕ

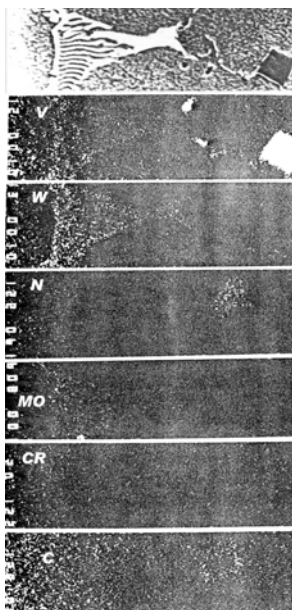
Обект на изследването са инструментални стомани (Р6М5), чиито химичен състав в т. % е показан в таблица 1.

Таблица 1

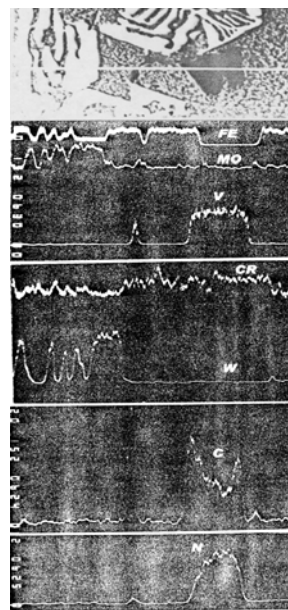
Означение	C	N	Cr	W	Mo	V	Mn	Si
№1	0,87	0,186	4,60	6,10	5,68	1,66	0,32	0,46
№2	0,87	0,023	4,45	6,00	5,85	1,70	0,22	0,24

Рентгеновият микроанализ е проведен с апарат “JСХА - 733”, на фирмата JEOL с вълново дисперсионна система. За оптимизацията на условията за анализ и за количествени определяния чрез на вълново дисперсионната система са използвани предварително изготвени в лабораторията азотосъдържащи и въглеродосъдържащи еталони и образци с карбонитриди.

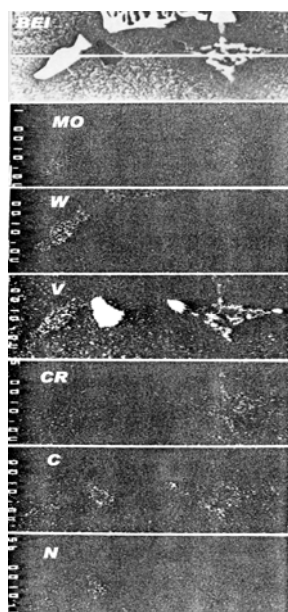
Качественото идентифициране на фазите е извършено чрез сканиране по микроплощ в режим на отразени електрони и характеристично рентгеново лъчение (фиг. 1а, 2а) и чрез проследяване разпределението на елементите по подходящо избрана линия (фиг.1б, 2б, 3, 4).



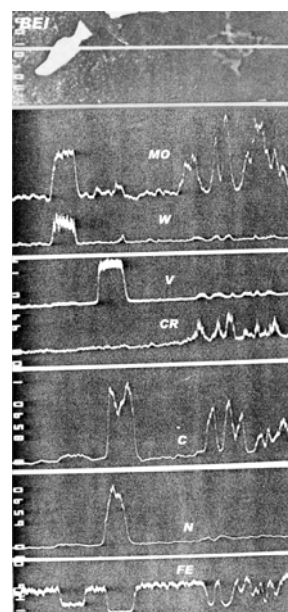
**Фиг. 1.а. Обр.№1. Микротопографии в режим на отразени електрони и характеристично рентгеново лъчение на V, W, N, Мо, Cr, C**



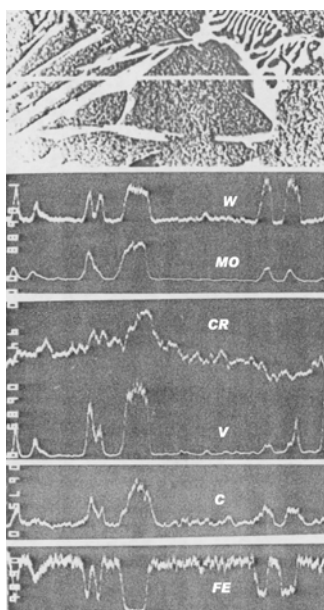
**Фиг. 1.б. Обр. №1. Микротопография и разпределение на концентрацията на елементите Fe, Мо, V, Cr, W, C, N по линията на анализ**



**Фиг.2.а. Обр.№1. Микротопографии в режим на отразени електрони и характеристично рентгеново лъчение на Мо, W, V, Cr, C, N**



**Фиг.2.б. Обр.№1. Микротопография и разпределение на концентрацията на елементите Мо, W, V, Cr, C, N, Fe по линията на анализ**



**Фиг.3 Обр.№2. Микротопография и разпределение на концентрацията на елементите W, Мо, Cr, V, C, Fe по линията на анализ**

Въз основа на получените микротопографии преди провеждането на количествения анализ наблюдаваните фази са класирани по морфологията и присъстващи елементи (таблица 2). Върху 15 броя фази от всеки вид е проведен рентгенов микроанализ в точка по елементите C, N, Cr, W, Mo, V, Fe. При количествения анализ се определя отношението между интензитетите на дадена характеристична рентгенова линия, измерена върху анализирания образец и върху еталона, като образецът и еталонът се анализират при напълно еднакви експериментални условия. Отношението на интензитетите (относителен интензитет) в първо приближение дава съдържанието на изследвания елемент в образеца. Измерените относителни интензитети на присъстващите във фазите елементи са коригирани по метода на Bastin [1, 2, 3], след което е определена средно аритметичната стойност на съдържанието на всеки елемент от серията измервания. От получените концентрации в атомни проценти са определени съответните стехиометрични съотношения на елементите в различните видове фази. Резултатите от количествения микроанализ са представени в таблица 2.

От микротопографиите в отразени електрони се вижда, че в обема на зърното има отделена фаза с размери под 1  $\mu\text{m}$ , чийто състав не може да бъде количествено определен по стандартната методика на рентгеновия микроанализ. По наши предварителни изследвания тази фаза е от вида  $M_{23}C_6$ .

**Таблица 2**

Сплав	Типове Фази	Морфология	%	C	N	Cr	W	Mo	V	Fe
№1	$M_6C$	скелетообразна	Тег.	3,5	0,6	4,9	29,1	27,8	2,6	31,4
			Ат.	14,5	2,5	6,2	12,1	20,9	3,6	40,1
№2	$M_6C$	скелетообразна	Тег.	2,7	-	4,1	31,4	25,7	4,0	32,5
			Ат.	16,2	-	5,7	12,0	18,9	5,7	41,5
№1	$M_2C$	Не се наблюдава								
№2	$M_2C$	ветрилообразна	Тег.	5,5	-	6,9	35,5	33,4	13,0	5,6
			Ат.	31,0	-	8,9	2,9	23,4	17,1	6,9
№1	MC	Правилно остенена	Тег.	6,0	13,9	4,5	0,9	1,2	72,7	1,3
			Ат.	14,6	33,0	3,0	0,2	0,4	48,3	0,8
№2	MC	Не се наблюдава								
№1	$M_2C$	Фино йероглифна	Тег.	9,3	-	22,9	12,1	38,8	8,7	8,0
№2	$M_2C$	Фино йероглифна	Тег.	7,3	-	16,2	15,7	38,6	14,6	7,1
№1	$\alpha$ -Fe	Основа	Тег.	Не е определяно		3,7	5,7	4,1	1,1	84,9
№2	$\alpha$ -Fe	Основа	Тег.	Не е определяно		3,4	5,6	3,6	1,4	84,5

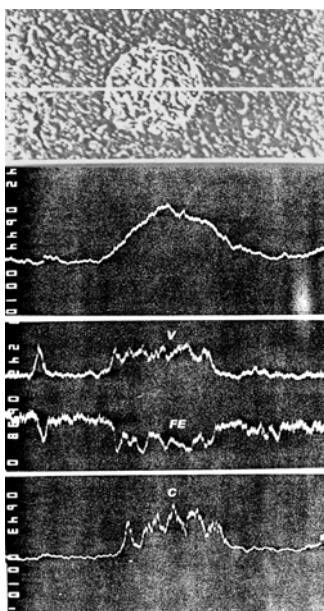
Данните от горната таблица са представени в стехиометричен вид в таблица 3. Вижда се, че обемното азотиране на сплав тип Р6М5 променя вида на отделените фази: в микроструктурата не се наблюдава фазата тип  $M_2C$ , но се отделя правилно остенената богата на ванадий карбонитридна фаза тип  $M(CN)$ .

Таблица 3

Сплав	Фаза	Форма	Стехиометрия
№2	$M_6C$	скелетообразна	$(Fe_{3.0} Mo_{1.35} W_{0.86} Cr_{0.41} V_{0.41})(C_{1.0})$
№1	$M_6(CN)$	скелетообразна	$(Fe_{2.9} Mo_{1.25} W_{0.88} Cr_{0.45} V_{0.26})(C_{0.85} N_{0.15})$
Р6М5 [4]	$M_6C$		$(Fe_{2.8} Mo_{1.62} W_{0.78} Cr_{0.42} V_{0.221})(C_{1.0})$
№2	$M_2C$	ветрилообразна	$(Mo_{0.68} V_{0.49} W_{0.37} Cr_{0.26} Fe_{0.2})(C_{1.0})$
№1	$M(CN)$	правоъгълна	$(V_{0.91} Cr_{0.06} Fe_{0.02} Mo_{0.01} W_{0.003})(N_{0.7} C_{0.3})$
Р6М5 [4]	MC		$(V_{0.84} Cr_{0.07} Fe_{0.18} Mo_{0.04} W_{0.018})(-----)$

В резултатите на работа [4] не са дадени данни за морфологията и съдържанието на азот и въглерод.

Анализът по линия на фазите тип  $M(CN)$  в образец №1 (фиг. 4) показва нехомогенност по съдържанието на азот и въглерод. Централната част е обогатена на азот, а към периферията се наблюдава увеличаване на концентрацията на въглерода. Показаните в табл. 2 данни за стехиометрията ѝ се отнасят за централната част.



Фиг.4 Обр.№1. Микрофотография и разпределение на концентрацията на елементите N, V, Fe, C по линията на анализ

Азотът в азотно легираната стомана основно се ориентира към фазата  $M(CN)$  -13.9 тег.%. От таблицата се вижда доброто съвпадение за състава на металната част на фазата  $M_6C$  в азотираната и неазотираната стомана. След азотиране обаче концентрацията на V в тази фаза намалява. Причината е формирането на богатия на V карбонитрид  $V(NC)$ , който изтегля ванадия. Друг ефект е обогатяването на твърдия разтвор на азотираната стомана №1 с Mo (4.1 тег.% в обр.№1 срещу 3.6 тег.% в обр.№2), което се обяснява с неформирането на богатата на молибден фаза  $M_2C$  в азотираната сплав.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установени са оптималните условия за едновременен количествен микроанализ на азот и въглерод с вълново дисперсионен рентгенов спектрометър, а за количествен микроанализа на азот и въглерод в стомани най-подходяща е програмата за корекция на базата на Bastin

метода. Чрез рентгенов микроанализ по оптимизиран режима за анализ на азот и въглерод е определен количествения състав на структурните съставлящи на инструментална стомана Р6М5. Получена е информация за връзката на стехиометрията на отделените фази със степента на легиране.

#### **4. ЛИТЕРАТУРА**

1. Bastin G., Heijligers H., X-rayspectrometry, 15, 1986, p.135.
2. Bastin G., Heijligers H., Scanning, 1986,p.45.
3. Bastin G., Heijligers H., J.Microscop. Spectr. Electro., 11, 1986, p.215.
4. Rasheva I., Rashev Ts. At al., Materials sci. and Technology, 10, 1981.

#### **КОРЕСПОНДЕНЦИЯ**

н.с. I ст. д-р Серьожа ВЪЛКАНОВ, н.с. I ст. инж. Ангел ВЕЛИКОВ  
ИМСТЦХ – БАН, бул.Шипченски проход 67, София 1574  
e-mail: [serg@ims.bas.bg](mailto:serg@ims.bas.bg), [anmabg@yahoo.com](mailto:anmabg@yahoo.com)





***ВИРТУАЛНО  
ИНЖЕНЕРСТВО,  
CAD/CAM/CAE,  
RAPID PROTOTYPING  
& TOOLING,  
MEMS***





## POSSIBILITIES FOR VEHICLE KINETIC ENERGY UTILIZATION DURING BRAKE MODES

Georgi TODOROV

Venelin JIVKOV

Nikolay NIKOLOV

Vutko DRAGANOV

**Abstract:** Possibility for vehicle kinetic energy utilization during brake modes is investigated and results are estimated over typical urban drive cycles in the present paper.

Using the European drive cycle MVEG-95 and the American drive cycle FTP-75USA it is found out an increase of 15-20% in vehicle mileage with a single electrical battery charge cycle.

**Key Words:** electric vehicles, hybrid propulsion systems, electric machine – kinetic energy storage.

## ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА ИЗПОЛЗВАНЕ НА КИНЕТИЧНАТА ЕНЕРГИЯ ПРИ СПИРАНЕ НА ТРАНСПОРТНИТЕ СРЕДСТВА

Георги ТОДОРОВ

Венелин ЖИВКОВ

Николай НИКОЛОВ

Вътко ДРАГАНОВ

**Резюме:** В работата е изследвана и оценена възможността за оползотворяване на енергията при спиране на транспортно средство в условията на „градски цикъл“ на движение.

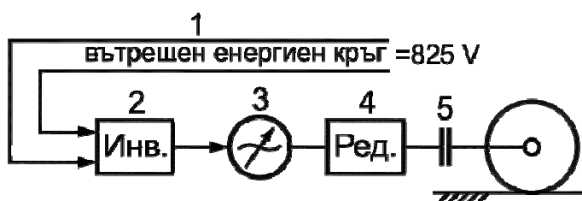
Въз основа на Европейския – MVEG-95 и на американския FTP-75USA скоростен цикъл е установена реалната перспектива за увеличаване на пробега на автомобила с 15-20% при едно зареждане на електрическата батерия.

**Ключови думи:** електромобил, хибридни системи за задвижване, електрическа машина-маховик.

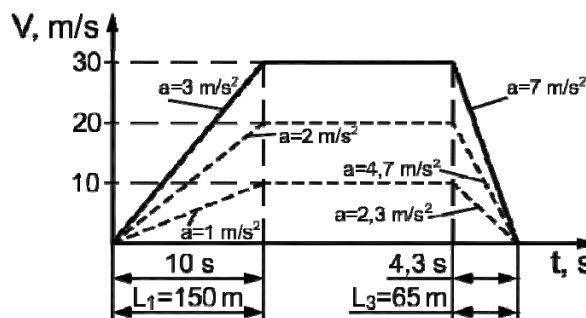
### 1. УВОД

Проблемите, свързани с екологията, енергийната криза, респ. тенденцията за намаляване на запасите в световен мащаб на фосилни горива, предопределят насочването на усилия на изследователи и производители към по-ефективно използване на енергийните източници. Като илюстрация на казаното са пуснатите на пазара хибридни системи за задвижване на транспортни средства, в това число и електромобили (Mitsubishi, Hyundai, GM и др.).

В настоящото изследване са анализирани възможностите за рекупериране на енергия при спиране на транспортните средства и по-специално при автомобилите с електрозадвижване, реализирано чрез електрическа батерия и кинетичен акумулатор на енергия (супермаховик).



Фиг. 1 Система за рекупериране на енергия при конвенционални влакови композиции, в т.ч. метрополитени: 1 - вътрешен енергиен пръстен; 2 - инвертор; 3 - честотно управляем асинхронен мотор-генератор; 4 - редуктор; 5 - съединител



Фиг. 2 Елементарен трапецовиден цикъл на изменение на скоростта на транспортно средство

Основните трудности за акумулирането на енергията при спирането на транспортните средства са големите енергийни потоци, които трябва да се трансформират за много кратко време – от 2 до 6 секунди за автомобилите и до 15 секунди при влаковите композиции. Такива ударни натоварвания са непосилни за стандартните електрически акумулатори. Поради тази причина рекупериранието на енергия е получило практическо приложение засега само при конвенционални влакови композиции, в това число и за метрополитени, при които енергията при спиране се трансформира в електрическа и се препраща към вътрешен енергиен кръг (фиг.1), докато при електромобилите този подход е неприложим. Така например, в новите моториси на Софийския метрополитен тази възможност за използването на енергията на спиране е решена. При отрицателни ускорения честотно управляемото асинхронно задвижване работи в генераторен режим до определена минимална скорост и чрез инвертора връща постоянен ток с напрежение 825 V във вътрешния енергиен кръг на метрополитена.

Поемането на големи мощностни потоци за кратко време е възможно само от капацитивни (кондензатори) или кинетични акумулатори на енергия. Главните недостатъци на първия тип акумулатори са големите габарити и тегло, а на втория – големите аеродинамични и механични загуби с течение на времето.

## 2. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА КОЕФИЦИЕНТА НА РЕКУПЕРАЦИЯ

Чрез съпоставяне на енергиите, необходими за закъснение и ускоряване на транспортното средство, при един идеализиран транспортен цикъл, състоящ се от краен брой елементарни трапецовидни цикли на изменение на скоростта (фиг.2), може да се получи количествена оценка за това каква част от енергията за ускоряване е възстановима.

Енергията за единица маса на основния двигател, реализираща ускорението на транспортното средство, се изразява чрез

$$E_{\dot{v}>0} = \frac{1}{\eta_1} \sum_{i=1}^{n-1} \left\{ \frac{\delta}{2} |v_i^2 - v_{i+1}^2| + g(f \pm \sin \alpha) \int_{t_i}^{t_{i+1}} v dt + k_v \int_{t_i}^{t_{i+1}} v^3 dt \right\}, \quad (1)$$

където

интервалите  $t_i, t_{i+1}$  [s] са тези, при които ускорението  $\dot{v}$  е положително;

$g$  [m/s<sup>2</sup>] – земното ускорение;

$f = 0,008 \div 0,012$  – коефициент на триене при търкаляне;

$\alpha$  – наклон на пътя;

$k_v$  – коефициент на аеродинамично съпротивление на транспортното средство,

$k_v = (3 \div 5)10^{-4}$  [1/m] при маса на транспортното средство 1000 kg ;

$\eta_1$  – КПД на трансмисията от двигателя към ходовите колела ( $\eta_1 = 0,75 \div 0,92$ );

$\delta = 1,06 \div 1,1$  – инерционен коефициент, отчитащ всички ротиращи маси, вкл. ходовите колела.

Енергията за единица маса, която би могла да бъде възстановена при спиране на транспортното средство, по аналогичен начин се изразява чрез

$$E_{\dot{v}<0} = \eta_2 \sum_{i=1}^{n-1} \left\{ \frac{\delta}{2} |v_i^{*2} - v_{i+1}^{*2}| - g(f \pm \sin \alpha) \int_{t_i^*}^{t_{i+1}^*} v dt - k_v \int_{t_i^*}^{t_{i+1}^*} v^3 dt \right\}, \quad (2)$$

където

интервалите  $t_i^*, t_{i+1}^*$  [s] са тези, при които ускорението  $\dot{v}$  е отрицателно;

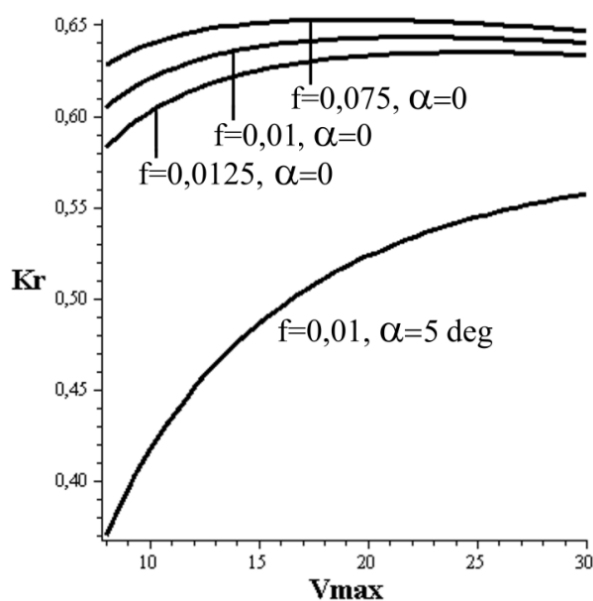
$\eta_2$  – КПД на трансмисията от ходовите колела към акумулатора на енергия ( $\eta_2 = 0,60 \div 0,85$ ).

От отношението на (2) към (1) се съди каква част от вложената енергия за ускоряване може да бъде възстановена в някакъв вид акумулаторна енергия, тоест то представлява коефициента на рекуперация  $k_r$ , който има вида:

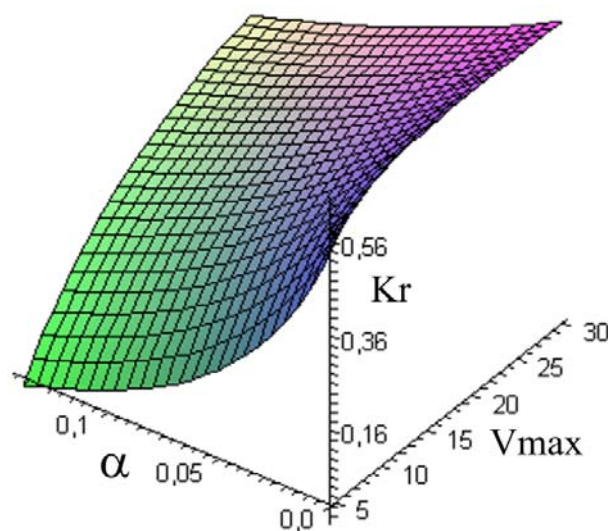
$$k_r = \frac{E_{v < 0}}{E_{v > 0}} 100 = \eta_{\Sigma} \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left\{ \frac{\delta}{2} |v_i^{*2} - v_{i+1}^{*2}| - g(f \pm \sin \alpha) \int_{t_i^*}^{t_{i+1}^*} v dt - k_v \int_{t_i^*}^{t_{i+1}^*} v^3 dt \right\}}{\sum_{i=1}^{n-1} \left\{ \frac{\delta}{2} |v_i^2 - v_{i+1}^2| + g(f \pm \sin \alpha) \int_{t_i}^{t_{i+1}} v dt + k_v \int_{t_i}^{t_{i+1}} v^3 dt \right\}} 100, \quad (3)$$

където  $\eta_{\Sigma} = \eta_1 \eta_2 = (0,4 \div 0,8)$ .

На фиг.3 е изобразен коефициента  $k_r$  във функция от максималната скорост за цикъла от фиг.2 при  $\alpha = 0$  (нулев наклон на пътя),  $\eta_{\Sigma} = 0,72$ ,  $k_v = 4.10^{-4} [1/m]$ ,  $\delta = 1,1$  и различни стойности на пътните съпротивления  $f$ , а на фиг.4 – повърхнината на  $k_r$  при  $f = 0.01$ .



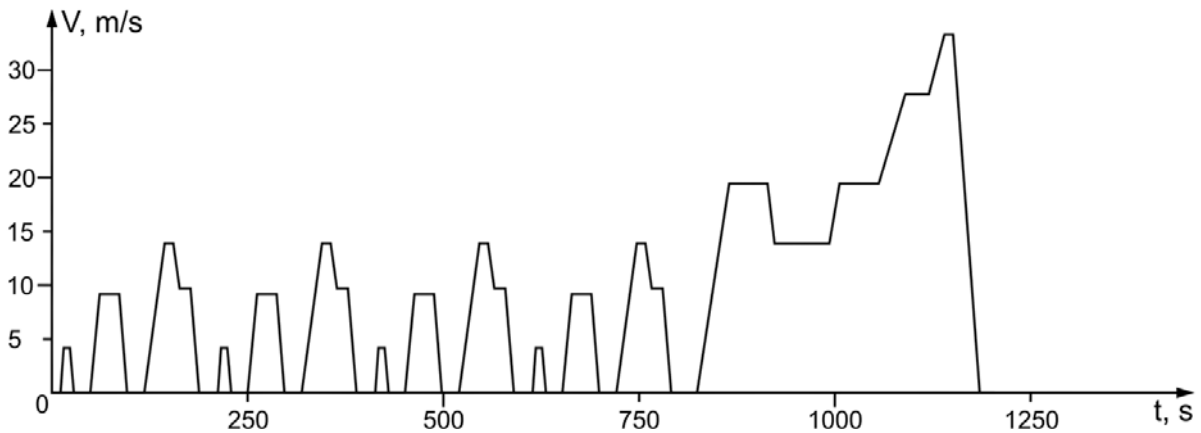
**Фиг. 3** Изменение на коефициента на рекуперация  $k_r$  във функция от максималната скорост за цикъла от фиг.2 при  $\alpha = 0$



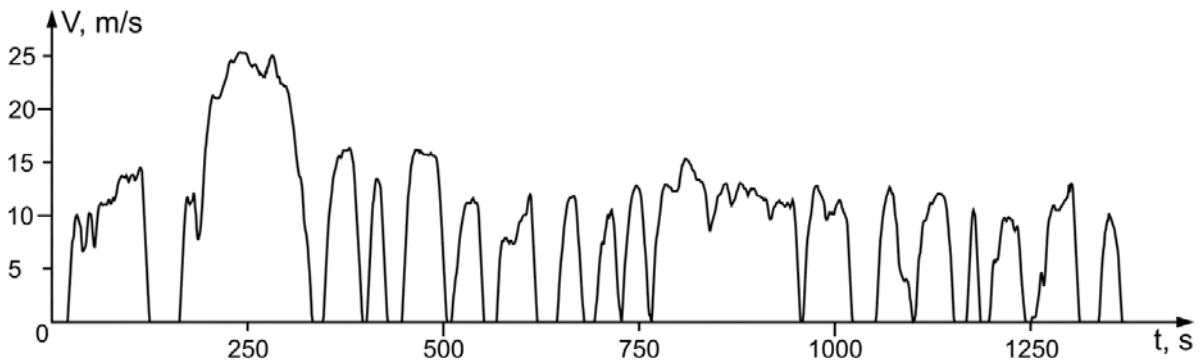
**Фиг. 4** Изменение на коефициента на рекуперация  $k_r$  във функция от максималната скорост за цикъла от фиг.2 и ъгъла на наклона на пътя  $\alpha$

От анализа на получените резултати се установява, че в градски условия, при идеализиран скоростен цикъл (фиг.2), от 40 до 60% от енергията за ускоряване на транспортното средство може да се оползотвори при спиране на транспортното средство, вместо да се трансформира в топлина в спирачната система.

Прилагайки получената зависимост (3) за Европейския скоростен цикъл MVEG-95 (фиг.5), както и този на USA – FTP-75 (фиг.6), то за  $k_r$  във функция на  $\eta_{\Sigma}$  при  $\alpha = 0$ ,  $k_v = 4.10^{-4} [1/m]$ ,  $\delta = 1,1$  и  $f = 0,01$  се получава резултатът, показан на фиг.7.

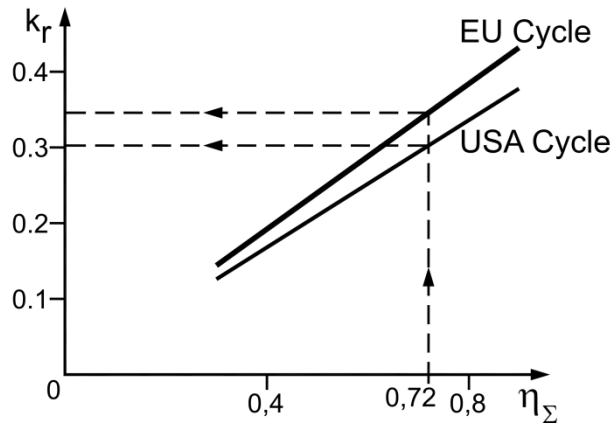


Фиг. 5 Европейски скоростен цикъл MVEG-95



Фиг. 6 USA скоростен цикъл FTP-75

Пробегът на автомобил с принципна структура схема, показана на фиг.8, съдържаща електрически акумулатор 1, инвертор 2, честотно управляем асинхронен електродвигател 3, съединител 4, редуктор 5 и ходова част, за двата градски цикъла – европейски и американски при положение, че енергията при спиране не се оползотворява, се определя чрез баланса на енергиите



Фиг. 7 Изменение на коефициента на рекуперация  $k_r$ , във функция от  $\eta_{\Sigma}$  за Европейския скоростен цикъл MVEG-95 (фиг.5) и този на USA – FTP-75 (фиг.6)

$$Q_{\text{бат}} \eta_{\text{бат}} \eta_{\text{мех}} = N_z \left[ \sum_{i=1}^{n-1} \frac{m \delta}{2} |v_i^2 - v_{i+1}^2| + m g f \int_0^{T_y} v dt + m k_v \int_0^{T_y} v^3 dt \right], \quad (4)$$

където

$Q_{\text{бат}}$  [kWh] – капацитетът на батерията;

$N_z$  – брой цикли;

$m$  [kg] – маса на автомобила;

$T_u$  [s] – време за един цикъл,

а от там

$$L_{проб} = L_C N_z, \quad (5)$$

където  $L_C$  е пробегът за един цикъл.

Така например при  $m = 1000 \text{ kg}$ ,  $f = 0,01$ ,  $\alpha = 0$ ,  $k_v = 4.10^{-4} \text{ m}^{-1}$ ,  $\eta_{бат} \eta_{мех} = 0,85$ ,  $Q_{бат} = 20 \text{ kWh} \approx 7,2.10^7 \text{ J}$ , пробегът на електромобил с едно зареждане на батерията за двата цикъла се получава

$$L_{проб}^{Eu} = 169,9 \text{ km}, \quad L_{проб}^{USA} = 165,4 \text{ km},$$

като резултатите плътно се доближават до тези за електромобила на Mitsubishi [4].

При оползотворяване на енергията при спиране (рекуперация), енергийният баланс на автомобила се изразява с

$$Q_{бат} \eta_{бат} \eta_{мех} = N_z \left[ \sum_{i=1}^{n-1} \frac{m \delta}{2} |v_i^2 - v_{i+1}^2| - k_r \sum_{i=1}^{n-1} \frac{m \delta}{2} |v_i^{*2} - v_{i+1}^{*2}| + m g f \int_0^{T_u} v dt + m k_v \int_0^{T_u} v^3 dt \right], \quad (6)$$

при което за пробег с едно зареждане на батерията за двата градски цикъла при  $k_r = 0,45$  се получава съответно

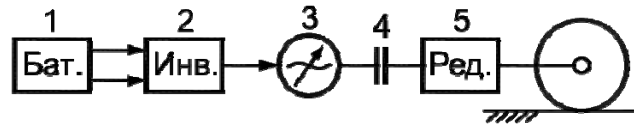
$$L_{проб}^{Eu} = 196,5 \text{ km}, \quad L_{проб}^{USA} = 205,9 \text{ km},$$

което е процентно увеличение съответно с 15,64% и 24,49%.

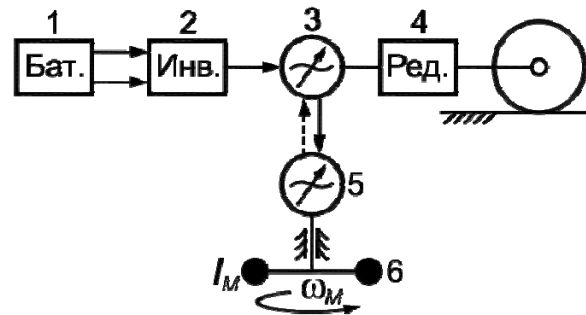
От направеният анализ на енергийните потоци и числения пример се установява целесъобразността от оползотворяване на енергията при спиране на транспортното средство.

Маховикът като кинетичен акумулатор на енергия в градски цикъл на движение на електромобил е подходящо да се използва основно в две структурни модификации, представени на фиг.9 и фиг.10.

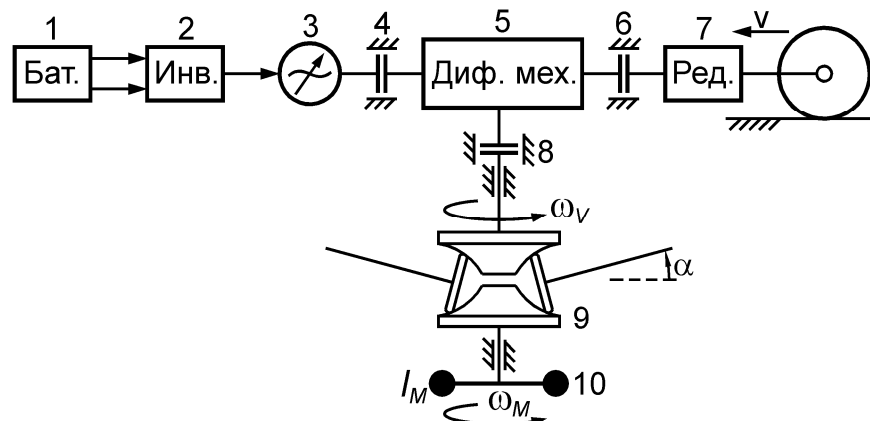
Първата структурна схема предполага по-голям брой трансформации на енергия в сравнение с втората, което означава по-големи загуби. Кинетичният акумулатор на енергия (маховикът) е в състояние да поеме големите ударни мощностни потоци в процеса на спиране на електромобила, поради много малките спиращи времена в преходните режими, обусловени от градския цикъл на движение.



Фиг. 8 Принципна структурна схема на електромобил, съдържаща електрически акумулатор 1, инвертор 2, честотно управляем асинхронен електродвигател 3, съединител 4, редуктор 5 и ходова част



Фиг. 9 Структурна модификация на електромобил, включваща електрическа батерия 1, инвертор 2, асинхронни честотно управляеми мотор-генератори 3 и 5, зъбен редуктор 4 и маховик 6



Фиг. 10 Структурна модификация на електромобил, включваща електрическа батерия 1, инвертор 2, честотно управляеми асинхронни електродвигател 3, съединители-спирачки 4, 6 и 8, диференциален планетен механизъм 5, зъбен редуктор 7 и фриксионен вариатор 9 и маховик 10



Предимството на схемата от фиг.10 се състои в обстоятелството, че чрез подходящо управление по скорост на управляващия орган на вариатора  $\alpha = \alpha(\omega_M)$ , скоростта на изходящия (входящия) вал на вариатора  $\omega_V$  може да се поддържа  $\omega_V = \text{const}$  [2], [3] което облекчава управлението на движение на електромобила, т.е. скоростта на движение  $v$  ще се детерминира от скоростта на изходящия вал на честотно управляемия асинхронен електродвигател 3 – фиг.10.

### **3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

От направените теоретични изследвания се установи реалната перспектива за оползотворяване на 30÷40% от енергията на спиране на транспортно средство в условията на „градски цикъл“ на движение, докато при „магистрален“, то не би било ефективно.

Приложението на хибридна система за задвижване „електрическа машина – маховик“ (фиг.9, респ. фиг.10) при капацитет на електрическата батерия от порядъка на 20 kWh и маса на автомобила 1 000 kg би увеличило пробега от 15÷25% с едно зареждане.

### **БЛАГОДАРНОСТИ**

Изследванията, отразени в настоящата статия, са финансирани по договор №Д00-106-5/12.2008 „Иновационен център за върхови научни постижения, развитие и трансфер на технологии“ с насоченост в областта на микро електромеханични системи (MEMS) и рекупериране на енергия между НИС при ТУ-София и ФОНД “НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ”, МОМН на РБ.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Lino Guzzella, Antonio Sciarrelta. Vehicle Propulsion Systems. 2-nd Edition, *Springer Berlin, Heidelberg, New York*.
2. Живков, В, Стоичков, К. Управление на кинетичен акумулатор посредством фрикционен вариатор. *сп. „Механика на машините“*, №85, с.47-52.
3. Скоичков, К., Николов, Н. Анализ и синтез на фрикционен предавателен механизъм с минимизирано плъзгане. *Bultrib-2009*, София, с.54-58.
4. Kozinori Handa, Hiroaki Yoshida. Development of Next-Generation Electric Vehicle Mitsubishi – Mi EV. *ATZ Auto Technology*, 10, vol. 8, Oct. 2008, pp.18-23.

### **КОРЕСПОНДЕНЦИЯ**

доц. д-р инж. Георги ТОДОРОВ  
кат. ТМММ, МТФ, ТУ-София, бул. „Кл. Охридски“ 8, 1000 София, БЪЛГАРИЯ  
e-mail: [gdt@tu-sofia.bg](mailto:gdt@tu-sofia.bg)

чл. кор. проф. д.т.н. инж. Венелин ЖИВКОВ  
кат. ТММ, МТФ, ТУ-София, бул. „Кл. Охридски“ 8, 1000 София, БЪЛГАРИЯ  
e-mail: [jivkov@tu-sofia.bg](mailto:jivkov@tu-sofia.bg)

доц. д-р инж. мат. Николай НИКОЛОВ  
кат. ТММ, МТФ, ТУ-София, бул. „Кл. Охридски“ 8, 1000 София, БЪЛГАРИЯ  
e-mail: [nickn@tu-sofia.bg](mailto:nickn@tu-sofia.bg)

доц. д-р инж. Вътко ДРАГАНОВ  
кат. ТММ, МТФ, ТУ-София, бул. „Кл. Охридски“ 8, 1000 София, БЪЛГАРИЯ  
e-mail: [vdrag@tu-sofia.bg](mailto:vdrag@tu-sofia.bg)

## CAPABILITIES OF THE LASER TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING OF DIFFERENT MATERIALS IN ENGINEERING PRACTICE

Georgi TODOROV      Yavor SOFRONOV      Nikolay NIKOLOV  
Pancho DANAILOV      Petar GABROVSKI

**Abstract:** *The paper is aimed to experimental study and analysis of the micro milling laser technology capabilities. The study was worked out of the cases of different materials popular in engineering practice.*

**Key Words:** *Laser Technology, Laser Polishing.*

## ВЪЗМОЖНОСТИ НА ЛАЗЕРНАТА ТЕХНОЛОГИЯ ЗА ОБРАБОТВАНЕ НА РАЗЛИЧНИ МАТЕРИАЛИ ОТ ИНЖЕНЕРНАТА ПРАКТИКА

Георги ТОДОРОВ      Явор СОФРОНОВ      Николай НИКОЛОВ  
Панчо ДАНАИЛОВ      Петър ГАБРОВСКИ

**Резюме:** *С това изследване се цели да се покажат възможностите на лазерната технология за микро обработване на повърхнини на различни характерни материали от инженерната практика.*

**Ключови думи:** *микро лазерни технологии.*

### 1. ТЕХНОЛОГИЧЕН ПРОЦЕСИ ПРИ ЛАЗЕРНАТА ОБРАБОТКА

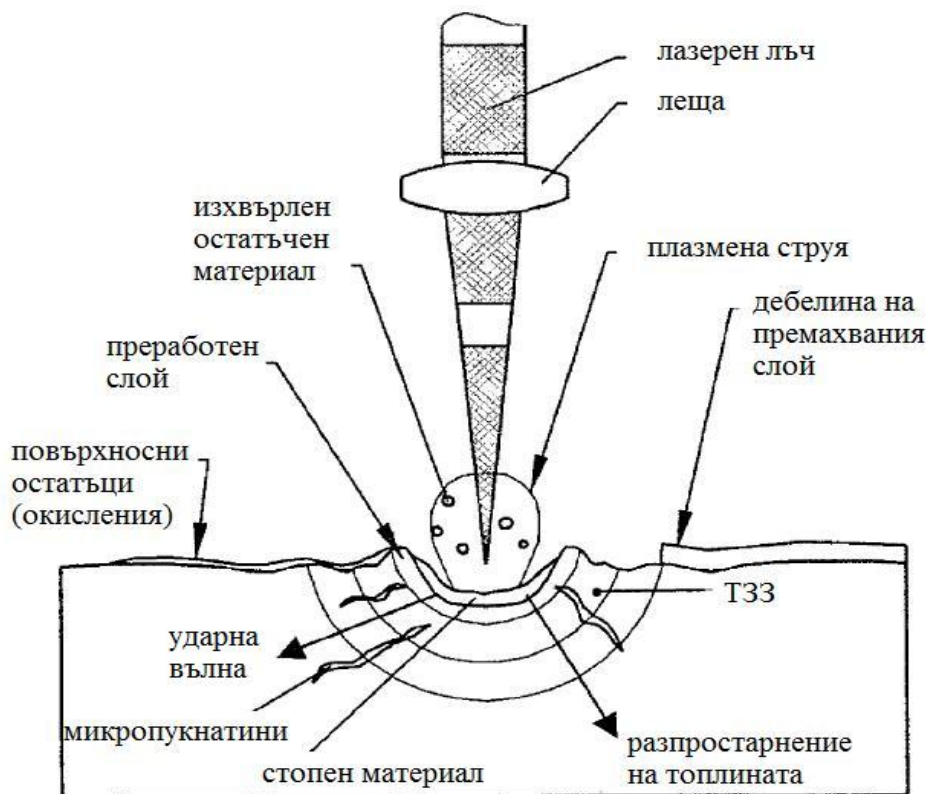
#### 1. Технологични процеси при лазерната обработка

##### 1.1 Физика на процеса

Характерно за лазерната микро обработка е, че тя се възползва от възможността за пряко контролиране на количеството енергия на светлинния лъч, който може да се насочи върху много малък, добре дефиниран регион от материала и да се осъществи процес на пробиване, изрязване, гравирание или друг вид обработка на детайла, в граници от няколко милиметра до няколко микрона. От голямо значение за контрола на лазерният лъч е продължителността на всеки негов импулс, тъй като тя определя дълбочината, до която ще се разпространи топлинното поле спрямо повърхността на материала в следствие лазерната обработка. С промяна на импулса до голяма степен се контролира физическият процес на лазерна аблация. Аблацията представлява поредица от стъпки, които включват лазерно лъчение, взаимодействие си с твърда повърхност, усвояване на енергия от материал, локално нагряване и последващо изпаряване на материала. Това определя лазерната обработка като сложен термодинамичен флуиден процес. Детайлно описание на процесите, протичащи около мястото където се намира лазерният лъч и ефектите породени от него са изобразени на фиг. 1 [8].

Разбира се, показаното на фигурата протича за много малка част от секундата, но всеки един фактор оказва силно влияние върху материала. От най-голямо значение е лазерният лъч. По своята същност той представлява серия от електромагнитни вълни, които нагряват материала. Нагряването е вследствие процеса на лъчист топлообмен, който представлява двукратно трансформиране на създадената от кристала енергията. Вътрешната енергия на кристала под действието на възбудителната лампа се трансформира в електромагнитна енергия, която се излъчва под формата на електромагнитни лъчи, които попадайки върху обработвания материал, поради генерирания висок интензитет, го нагряват и изпаряват, а малка част от тях се трансформират отново във вътрешна енергия. В зависимост от дължината

на вълната на лазерния сноп и вида на обработвания материал една част от попадналата светлина се поглъща от детайла, друга част се отразява от повърхността му, а останалото количество светлина преминава през детайла. Отразените лъчи в повечето случаи са минимални и е възможно да въздействат на оператора на машината. За предотвратяването на евентуални рискове се използват защитни екрани, които се поставят около работната зона и целят да предпазят най-вече очите. Погълнатите лазерни лъчи са причината за формирането на енергия в обработвания детайл. Преминалата в материала енергия се разпространява и под действието на процесите на топлопроводимост формира областта на топлинно засегната зона (ТЗЗ). Топлината се разпространява във всички направления на детайла, като се получава ефект на шоково топлинно натоваване. Под действието на този ефект се образува ударна вълна, която се разпространява навътре в детайла. Като резултат от нагряването и създадените вътрешни напрежения в материала е възможна появата на вътрешни дефекти (микропукнатини), а при по-тънки детайли е възможно да се получат и външно видими дефекти.



Фиг. 1. Процеси и ефекти вследствие лазерната обработка

Повърхностните остатъци (окисления) след извършената обработка нямат влияние върху детайла като тяхното отстраняване е бързо и лесно. Плазмената струя и изхвърленият остатъчен материал в повечето случаи не контактуват с обработваната повърхност и не оказват ефект върху качеството на обработка. Като цяло областта образувана се около лазерното петно се характеризира с висока температура като частиците, които се намират вътре изгарят или се изпаряват. Стопеното вещество в точката на контакт е в минимални количества и в зависимост от обработвания материал има различно поведение.

## 1.2 Основни параметри при микро лазерната обработка

Лазерните технологии като един по-особен клас машини за обработка се различават от конвенционалните машини и по характеризиращите ги параметри. От тук идва и нуждата всеки един параметър да бъде разгледан, за да може да се наблегне върху влиянието, което той оказва на процеса на лазерна обработка. Основните характеристики, които определят възможностите на повечето лазери са:

- енергия на импулса  $E$  [J];
- продължителност на импулса  $\Delta t$  [ $\mu s/ps/ns/fs$ ];
- честота на повтаряне на импулса  $f_p$  [Hz];

- максимална мощност на лазера  $P_b$  [W];
- номинална мощност на лазера  $P_{ном}$  [W];
- дължина на вълната на лазерното излъчване  $\lambda$  [nm];
- плътност на тока  $j$  [A/m<sup>2</sup>];
- големина на лазерното петно  $D$  [ $\mu$ m];
- препокриване (track displacement) на лазерното петно  $U_d$  [ $\mu$ m];
- скорост на движение на лазерния лъч  $V$  [mm/s];
- фокусно разстояние [mm];
- поляризация [dB].

Освен тези няколко параметъра в етапа на обработка важна роля играе и видът на материала и неговите физични и химични свойства. Характерно е, че повърхността на всеки материал притежава следните три свойства, чиято сума трябва да е 1 – отразяване, абсорбиране и пропускане на светлината. В зависимост от стойностите на тези три фактора се определя поведението на процеса на лазерна обработка. Погълнатите фотони се трансформират в топлинна енергия, която се разнася в материала под действието на процесите на конвекция, провеждане и излъчване. Основна роля при лазерите играе процеса на провеждане на топлина. Познаването на поведението на всички фактори участващи в лазерните процеси е от голямо значение дали ще бъде избрана правилната технология за обработка.

## 2. Подготовка на експерименталните изследвания

### 2.1 Избор на методика

Целта на експеримента е да бъде създадена математическа зависимост, която да определя достатъчно точно каква ще бъде крайната грапавост ( $Ra$ ) на обработената повърхнина с лазер при различни технологични режими. Ще се търси също така пътя за постигане на тази цел, който да изисква минимални разходи на време и ресурси. За целта се използва подхода на многофакторния експеримент, с който ще бъде получен необходимия математически апарат, съобразен с конкретните условия и позволяващ реализирането на минимален брой изследвания и намирането на оптимално решение. Приема се, че в разглеждания случай факторите ( $f_p$ ,  $j$  и  $V$ ) влияят нелинейно върху изследвания параметър ( $Ra$ ). Математически това се описва със следните уравнения:

$$Ra = C \cdot f_p^{b_1} \cdot j^{b_2} \cdot V^{b_3} \quad (1) \quad \text{или} \quad ra = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 x + \hat{b}_2 y + \hat{b}_3 z, \quad (2)$$

където  $C$  е константа,  $ra = \ln Ra$ ,  $\hat{b}_0$ ,  $\hat{b}_1$ ,  $\hat{b}_2$ ,  $\hat{b}_3$  са емпирични коефициенти, а  $x$ ,  $y$ ,  $z$  са кодирани стойности на изследваните фактори:  $f_p$  – честота на импулса ( $x$ );  $V$  – скорост на лазерния лъч ( $y$ );  $j$  – плътност на тока ( $z$ ).

### 2.2 Етапи на експеримента

#### 2.2.1 Определяне броя на опитите

Първата стъпка е да се изчисли необходимият брой опити, които трябва да бъдат направени, за да може експеримента да се счете за успешен и верен. Формулата, по която се намира броя опити е:

$$N = 2^k + n_0, \quad (3)$$

където е прието всеки фактор да се изменя на две равнища (долно и горно);  $k$  е броят на факторите ( $k = 3$ );  $n_0$  – броят на наблюденията, проведени в центъра на плана за установяване адекватността на модела ( $n_0 = 0$ ). Получаваме  $N = 8$ , от тук следва, че за целите на експеримента че трябва да бъдат направени 8 на брой опита.

#### 2.2.2 Избиране на стойности за равнищата на факторите

За определяне на нивата на всеки един фактор се използва предварителна информация (теоретична или експериментална). В случая тази информация е числена стойност, на която са зададени две допълнителни равнища. Означенията на равнищата са следните: долно (д), горно (г) и основно (о), като те представляват геометрични прогресии, например  $V_o^2 = V_d \cdot V_g$ . Стойностите на равнищата за всеки един фактор се записват в следната таблица 1:

Табл. 1 Таблица на натуралните стойности

Означения		Долно равнище	Основно равнище	Горно равнище
Натурални	Кодови	-1	0	1
fp [kHz]	x			
V [mm/s]	y			
j [A/mm <sup>2</sup> ]	z			

Тъй като няма налична готова теоретична информация за попълването на таблицата е нужно да се извършат експерименти с еднофакторни опити, за да се определи всяко едно от нивата на разглежданите фактори.

### 2.2.3 Кодирание на факторите и съставяне на матрица на планираният експеримент

Стойностите на кодовете са : x,y,z = 0 когато факторите са на основно равнище; x,y,z = -1 при фактори, намиращи се на долно равнище и за горно равнище x,y,z = 1. Кодирането на всеки един разглеждан фактор се извършва по следните формули, като се използват стойности от табл. 1:

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{2(\ln fp - \ln fp_G)}{(\ln fp_G - \ln fp_D)} + 1 \\
 y &= \frac{2(\ln V - \ln V_G)}{(\ln V_G - \ln V_D)} + 1 \\
 z &= \frac{2(\ln j - \ln j_G)}{(\ln j_G - \ln j_D)} + 1
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

След като бъде направено кодирането на факторите идва ред да се състави матрицата на планираният експеримент. Тя има 8 реда, в съответствие с броя опити N и 8 колони. В първата колона е въведен фиктивен фактор s=+1 за всички редове на матрицата. Приема се в първия ред на матрицата всички кодови означения на факторите да са (-1). Условиата за симетричност, нормираност и относителност на матрицата се постигат като във втората колона (фактора x), знаците на кодовете се променят през един ред, в третата колона (фактора y) през два реда, а в четвъртата колона (фактора z) през четири реда. В следващите три колони се записват натуралните стойности на факторите, чиито знаци отговарят на кодовите означение в предходните три колони. Така съставената матрица без натуралните стойности е показана в табл. 2.

Табл. 2 Таблица (матрица) на планираният експеримент

№ на опита	Кодови означения				Натурални означения		
	s	x	y	z	fp [kHz]	V [mm/s]	j [%]
1	1	-1	-1	-1			
2	1	1	-1	-1			
3	1	-1	1	-1			
4	1	1	1	-1			
5	1	-1	-1	1			
6	1	1	-1	1			
7	1	-1	1	1			
8	1	1	1	1			

### 2.2.4 Изчисляване на емпиричните коефициенти

За извършване изчисляването на емпиричните коефициенти ( $\hat{b}_0, \hat{b}_1, \hat{b}_2, \hat{b}_3$ ) е необходимо да се проведат 8-те на брой експерименти от табл. 3, за получаване стойностите на параметъра Ra. След провеждането им се построява таблица 3.3, където във втората колона се намират стойностите за Ra, в третата колона се записва ra ( $ra = \ln Ra$ ), а в останалите три колони се записват произведенията  $x^*ra$ ,  $y^*ra$  и  $z^*ra$  като стойностите за x,y,z се взимат от табл. 2.

**Табл. 3 Таблица на измерените стойности от планирания експеримент**

№ на експеримента (i)	Резултати от експеримента за Ra <sub>i</sub>	ra <sub>i</sub>	x*ra <sub>i</sub>	y*ra <sub>i</sub>	z*ra <sub>i</sub>
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					

Коефициентите  $\hat{b}_0, \hat{b}_1, \hat{b}_2, \hat{b}_3$  показват какво е влиянието съответно на x, y, z върху изходната величина Ra. Тези коефициенти имат дименсията на Ra. Тъй като изменението на изходната величина Ra има случаен характер може да се определят само извадковите коефициенти b<sub>i</sub> (i = 0,1,2,3). Формулите, по които се определят стойностите на емпиричните коефициенти са:

$$\begin{aligned} \hat{b}_0 &= \frac{1}{N} \sum ra_i \\ \hat{b}_1 &= \frac{1}{N} \sum x^* ra_i \\ \hat{b}_2 &= \frac{1}{N} \sum y^* ra_i \\ \hat{b}_3 &= \frac{1}{N} \sum z^* ra_i \end{aligned} \tag{5}$$

Когато се изчислят всички коефициентите те могат да бъдат заместени във уравнението на регресията (3.6), което придобива вида:

$$ra = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 \cdot x + \hat{b}_2 \cdot y + \hat{b}_3 \cdot z, \tag{6}$$

стойностите за x,y,z могат да бъдат взети от формулите (4). След направените преобразувания по уравнението и като се знае, че ra = lnRa, се прилага антилогаритмуване и (6) приема окончателният си вид:

$$Ra = C \cdot f \cdot p^{b_1} \cdot V^{b_2} \cdot j^{b_3}. \tag{7}$$

С така получената формула може да се определи вече какво е влиянието на всеки един фактор върху грапавостта. По този начин ще може да се даде по-ясна представа при задаване на съответни стойности за параметрите какви да са очакваните стойности за крайната грапавост на обработените повърхнини.

### 3. Опитна постановка и използвано оборудване

Поставена е целта да бъде открит най-подходящият и ефективен технологичен процес за микро обработка на материала - стомана S304, посредством лазерна технология. Задачата, която е поставена в конкретният случай е да бъде отчетено влиянието на факторите: скорост, честота и плътност на тока на лазерния лъч, върху качеството на обработената повърхност. Решаването на тази задача ще послужи да се определи какви са възможностите за оптимална обработка на детайли и инструментална екипировка от този тип стомана, посредством лазерните технологии.

Избраният материал е вследствие широката му употреба в машиностроенето и възможността му за лесна обработка. Химичният състав на използваната стомана S304 е следният (табл. 4):

**Табл.4 Химически състав на стомана S304**

Fe	Cr	Ni	Mn	Co	Si/C/P/S
69.50%	18.50%	9.00%	1.00%	0.75%	под 1% всеки

Този вид стомана се характеризира при стайна температура със сивкав цвят, намира се в твърдо състояние, без миризма, точка на топене 1600 - 1800К, има висока точка на кипене, не е запалим, плътност  $7,5-8,5\text{kg/m}^3$ , неразтворим във вода и органични разтворители, напрежение на огъване 274 - 357МРа, напрежение на опън 605 - 710МРа, твърдост 60-88RB (201НВ). Първоначалната грапавостта на обработваната повърхност е със стойност  $Ra=1.13\pm 0.064\ \mu\text{m}$ , а използваната заготовка е с размери дължина 150 mm, ширина 55 mm и дебелина 2 mm (фиг. 2).



Фиг. 2 Заготовка използвана в експеримента

### 3.1 Използвано оборудване

#### 3.1.1 Лазерна машина Lasertec 40

За целите на експеримента е използвана лазерната машина Lasertec 40 на фирма DMG, фиг. 3.



Фиг. 3 Машина Lasertec 40

Този лазер спада към твърдотелните лазери, използващи Nd:YAG кристал и Q switch. Към машината е свързана абсорбиращата система, чийто крайник е разположен непосредствено до лазерната глава с цел оптимално премахване на остатъчния материал в процеса на обработка. Контролното табло на машината е изведено върху отделен модул като на него са разположени всички необходими уреди за боравене с лазера. Лазерният лъч се излъчва в режим серия от импулси, а лъчът се характеризира със случайна поляризация. Подвеждането на лазерният сноп става с помощта на прецизен скенер с динамични огледала. За контролиране на обработваните повърхнини се използва измервателна сонда за позиционирането по ос Z. Допълнително се използва CCD-камера с висока резолюция за точно позициониране на детайлите. Тъй като в процеса на лазерна обработка нямаме механично въздействие детайла може да бъде оставен свободно върху масата без допълнителни устройства за закрепване. Основните параметри на машината са изведени в табл. 5.

**Табл.5 Основни параметри на машина Lasertec 40**

Параметри	Означение	Минимално	Средно	Максимално	Единици
Номинална изходна мощност	Pном	48	50	52	W
Регулиране на Pном		10		100	%
Дължина на вълната	$\lambda$	1055	1064	1070	nm
Спектър на излъчване	$\Delta\lambda$		5	10	nm
Продължителност на импулса	$\Delta t$	100	120	140	ns
Q switch отворен			120	200	$\mu$ sec
Q switch затворен			120	200	$\mu$ sec
Честота на импулса	f <sub>p</sub>	20		80	kHz
Енергия на импулса			1		mJ
Нестабилност на енергията на импулса				5	%

Машината притежава CNC работната маса, която има възможност да се премества по осите X,Y и Z с точност до 0.001 микрона. Големината на работната повърхност е 300x400mm, като възможностите ѝ за предвижване по различните оси са: X=400mm, Y=300mm, Z=500mm. Върху работната маса може да се обработват детайли не по-тежки от 50 kg, максималните скорости на движение по осите X и Y е 20 000mm/min, а за ос Z 12 000mm/min. Оптичната система изградена от серия огледала позволява на лазерния лъч да обработва детайли с повърхност 65x65 mm и дебелина 25mm без да е нужно работната маса да бъде премествана. Това е много удобно когато е необходимо да се намалят механичните трептения в детайла при неговото обработване.

**Табл.6 Препоръчителни честоти за работа с някои видове материали**

материал	честота на импулса
стомана	25 - 45kHz
алуминий F38	10 - 25kHz
месинг	10 - 25kHz
мед	10 - 25kHz
титан	35 - 40kHz
твърди метли	15 - 19kHz
силикон карбиди	30 - 35kHz
силикон нитриди	30 - 35kHz
оксидна керамика	5 - 10kHz
CBN	20 - 25kHz
PKD	30 - 35kHz
графит	30 - 50kHz

С тези си параметри машината е ефективна в производството на матрици, инструменти за формообразуване, гравюри, щампи, миниатюрни модели, MEMS, режещи пластини за инструменти и инструменти за сложни релефни форми изработени от карбид, PKD и CBN материали. За нуждите на рязането и заваряването мощността на машината е прекалено малка и процесите ще бъдат с малка полезна стойност. Голямо е разнообразието на обработваемите материали - стомана, алуминий, месинг, карбид, керамика, графит и др. Препоръчителни стойности за работа с някои видове материали са дадени в табл. 6.

Потребителският софтуер за управление на машината е LaserSoft 3D-control, с интерфейс на Windows, което е допълнителен плюс при обучението на оператори. Тъй като софтуера на машината поддържа работа с файлове с разширение .dxf, които могат да се генерират от всеки един 2D или 3D моделиер, вариантите за повърхнините, които искаме да получим са безбройни. Възможностите за изработване на сложни 3D повърхнини са големи, а крайната точност на обработка е много висока. Освен стандартните функции софтуера на машината предлага и няколко допълнителни - генератор на 3D обеми, 3D-контурна лазерна



обработка, 3D-гравирание с дефиниран ъгъл на наклона на стените, 3D-grey scale обработка. Друг плюс на тази лазерна машина, е че предлага възможност за обработване на повече детайли без намесата на оператор.

### **3.1.2 Ултразвукова вана**

За целите на експеримента е използвана ултразвукова машина (фиг. 4) за почистване на обработените повърхнини от окисленията получени вследствие термичното въздействие на лазера. Токът, който използва машината е 220V, мощността ѝ е 100W. Този тип машини използват ултразвук (обикновено 20-400kHz), който е идеален за почистване деликатни елементи. Специфичното тук е, че ултразвукът не е ефективен без почистващ разтвор. Почистващият разтвор съдържа съставки, чието предназначение е да направят ултразвуковото почистване по-ефективно. Точният състав на разтвора е от голяма зависимост за това какво ще се почиства и от какво ще се почиства. Най-често тези машини се използват за почистване на бижута, лещи и други оптични части, монети, часовници, зъболекарски и хирургически инструменти, промишлени части и електронно оборудване. Като цяло процеса на почистване е лесен и бърз. В разглеждания експеримент след окончателното обработване на повърхнините, детайлите бяха поставяни за няколко минути в ултразвуковата машина, след което се подсушаваха и подлагаха на измерване на грапавостта.



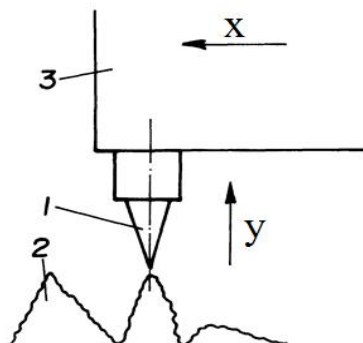
**Фиг. 4 Ултразвукова вана**

Характерно за ултразвуковото почистване е процесът на образуване на кавитационни мехурчета, които се закрепват по замърсената повърхност. Мехурчетата може да проникнат във всяка една пукнатина или вдлъбнатина като се стремят да премахнат напълно частиците от повърхностите. Образуването на тези мехурчета става посредством ултразвукови вълни, които се генерират от активни елементи (датчици), намиращи се в горната част на машината. Тези елементи най-често представляват два пръстена изработени в повечето случаи от пиезоелектрични материали. Образуваните мехурчета притежават голяма енергия, висока температура (10 000K) и голямо налягане. Колкото по-висока е честота на ултразвуковата машина, толкова по-сложни детайли могат да се почистват. Замърсителите могат да включват прах, мръсотия, масла, пигменти, мазнини, полиращи съединения, пръстови отпечатащи, сажди, восък и други. Поради физиката на процеса е възможно този метод на почистване да се използва за широка гама от детайли като форма, размери и материали.

### **3.1.3 Уред за измерване на грапавостта**

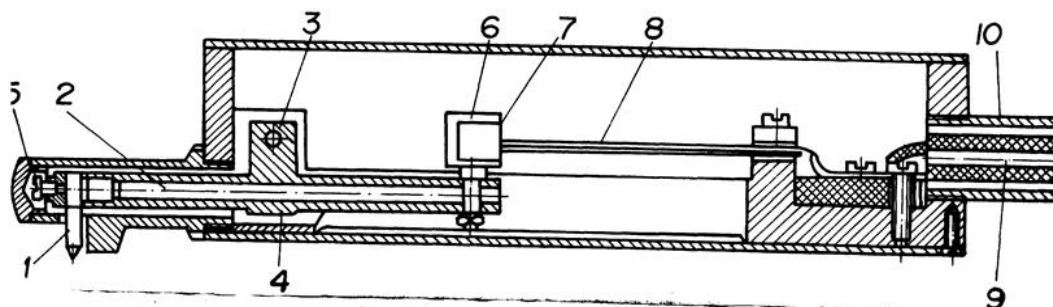
Използваният прибор за измерване на грапавостта на обработените повърхности е електрически и се основава на метода на опипване. Този метод (фиг. 5) се свежда до преместване на игла 1 по грапавините на металната повърхност 2. Иглата е закрепена в подвижната маса 3 на преобразувателя и под действието на неголям, но постоянен натиск,

обхожда металната повърхност по направление "x". По този начин се отчитат височините на грапавините в направление "y".



Фиг. 5 Схема на измервателната глава

Конструкцията на подвижната част на преобразувателя оказва съществено влияние върху точността на измерването. Колкото по-остра е иглата, толкова по-висока е точността при обхождане на грапавините. Точността зависи и от радиуса на закръгление на иглата. Големият радиус внася съществени неточности върху крайния резултат. Затова изборът на радиуса на иглата и налягането, което се упражнява върху нея, трябва да става много внимателно, като се отчита видът на материала на металните повърхности и характерът на обработката им. Електрически прибор за измерване на грапавостта е показан на фиг. 6. Игла 1 е закрепена в края на подвижното рамо 2, което може да се завърта около оста 3. Рамото 2 е монтирано в защитната втулка 4, свободният край на която завършва, със зъба 5, разположен непосредствено до иглата. Зъбът ограничава натоварването на иглата, което не бива да превишава  $0,1\text{N/mm}^2$ . Другият край на подвижното рамо се носи от опората 6, свързана чрез еластичната лента 7 със свободния край на двете пластинки 8.



Фиг. 6 Схема на измервателния уред

При преместване на иглата по неравностите на металните повърхности, свободният край на пластините 8 също се премества и пластинките се огъват като върху повърхността им възникват електрически заряди. Големината на тези заряди зависи от големината на измерваните грапавини. Електрическите заряди се отвеждат чрез екранирания кабел 9, монтиран в металната обвивка 10, към показващите или регистриращи уреди. Общ вид на машината е показан на фиг. 7.



Фиг. 7 Уред за измерване на грапавостта

### 3.1.4 Оптичен микроскоп

В процеса на провежданите експерименти беше използван оптичен микроскоп (фиг. 8) за изследване на получените микроструктури след лазерната обработка. С негова помощ, посредством цифров фотоапарат, бяха направени заснемания на повърхностите след всяка обработка. Приближаващата способност на уреда е 16 пъти.



Фиг. 8 Оптичен микроскоп

## 4. Експериментални резултати

Процесите на лазерна обработка са силно интерактивни и слабо познати, затова в началото преди многофакторния експеримент ще се извършат серия от еднофакторни опити. Първоначално се варира със скоростта и честотата на лазерния лъч като се използва евристичен метод, при който са избрани такива стойности за двата параметъра, които да покриват възможно най-широк обхват от работни стойности на машината.

### 4.1 Провеждане на еднофакторни опити

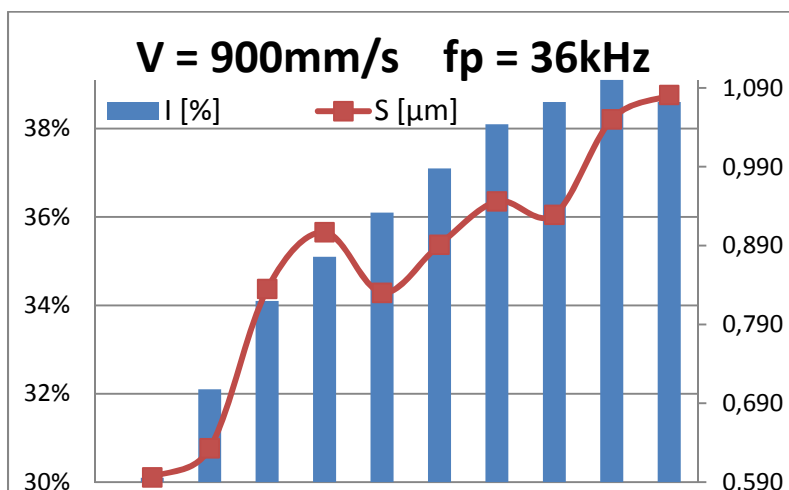
В първите четири серии от опити се варира с големината на скоростта и/или на честотата като целта на всяка една от пробите е да бъде постигнато отнемане на материал с дебелина 1 микрон. Отчитането на всяка проба става на всеки 8 преминавания на лазера през повърхността на детайла при препокриване на лазерният лъч от 8 микрона и големината на лазерното петно 40 микрона. При постигане на повече от 3 последователни попадения в граници  $\pm 0,05\mu$  от търсената дебелина, която трябва да бъде отнета, процеса приключва и като резултат се генерира таблица, съдържаща големината на премахваните слоеве спрямо избраните режими на тока в зависимост от зададената честота и скорост. При петия режим са зададени постоянни стойности на  $V$  и  $f_p$ , а се променя плътността на тока като се премахват 80 слоя при всеки опит, а отчитането на отнетия материал отново е на всеки 8 слоя. След така направените обработки детайла се поставя за почистване в описаната в точка 3 ултразвукова машина, за да бъдат премахнати получените окисления по повърхностите вследствие високите температури на обработка.

**4.1.1 Първичен евристичен етап** - използваните отношения от табл. 7 са произволно подбрани, за да може да бъде намерена най-подходящата технология за обработка.

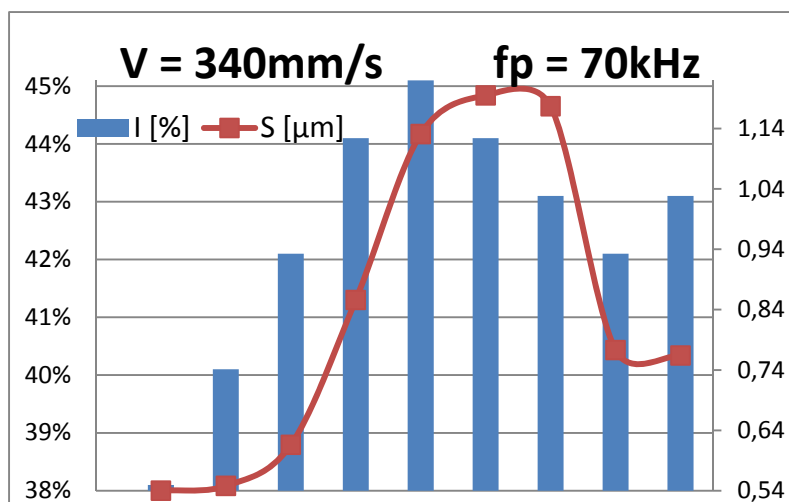
**Табл.7 Режими използвани при първичният евристичен етап**

	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
V [mm/]	900	340	480	550	1000	300	700	100
fp [kHz]	36	70	64	55	80	20	40	50

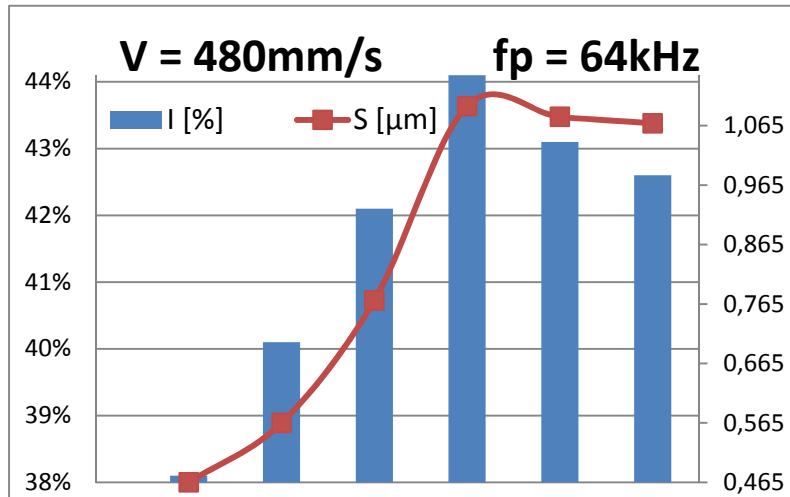
За извършването на опитите се обработват 8 джоба с размери 3x3mm. Всеки от режимите достига сходимост на параметрите си за различен брой проби като стартирането на всеки процес започва при  $j = 38\%$  от максималната стойност на плътността на тока. В края на всеки процес в зависимост от оптимизациите направени от софтуера се извежда стойността за плътността на тока, която е най-подходяща за използваното съотношение между скоростта и честотата. С помощта на получените от машината таблици, съдържащи информация за връзката в измененията на тока  $j$  [%] спрямо отнетия слой  $S$  [ $\mu\text{m}$ ] материал, се построяват графики за всеки един от зададените режими. В лявата част на графиките по вертикалата се отчита изменението на плътността на тока, а в дясната страна дебелината на отнетия слой материал. Тока е представен на всяка графика посредством колони, а дебелината на премахнатия слой е изобразена с помощта на плавна крива. По хоризонталата може да се отчете броят слоеве, които са били премахнати до достигане на оптимална сходимост между параметрите  $V$  и  $f_p$  като се има в предвид, че на всяка една колона съответстват по 8 премахнати слоя.



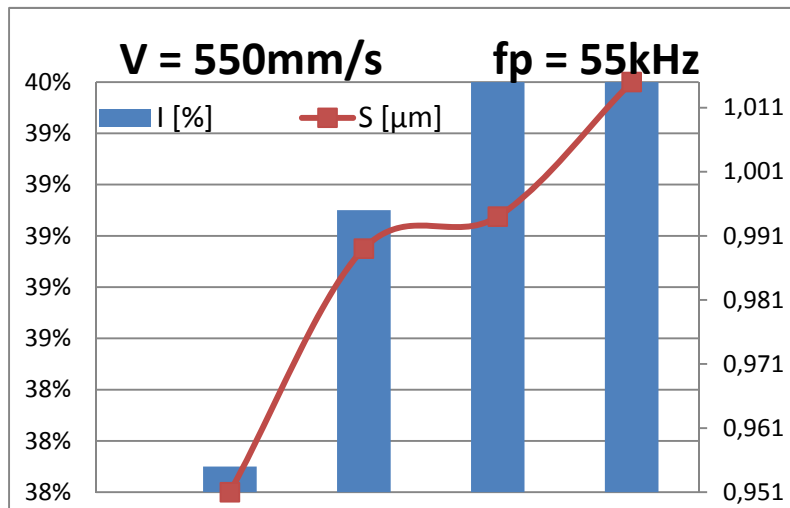
**Фиг. 9 Режим 1.1**



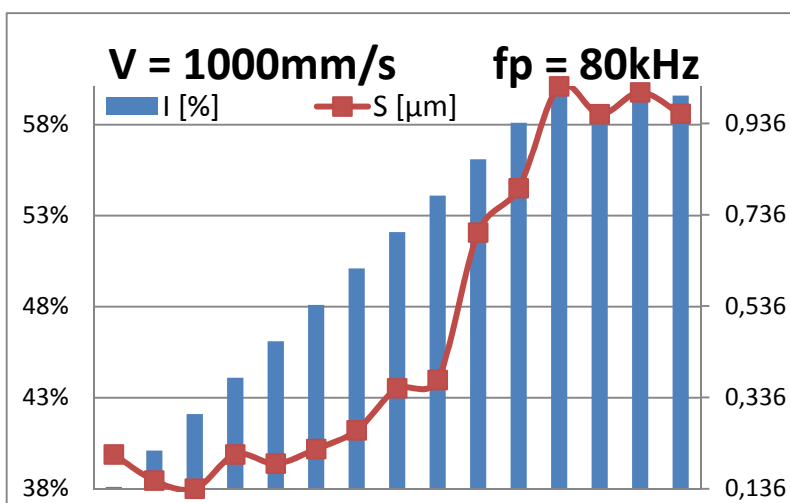
**Фиг. 10 Режим 1.2**



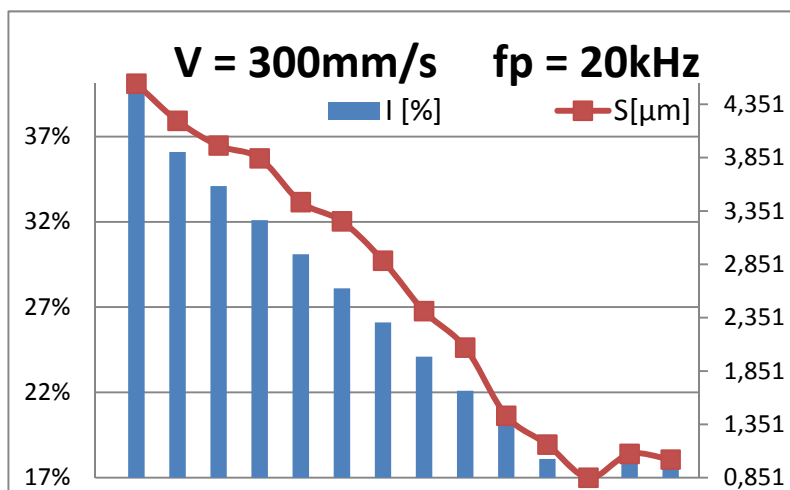
Фиг. 11 Режим 1.3



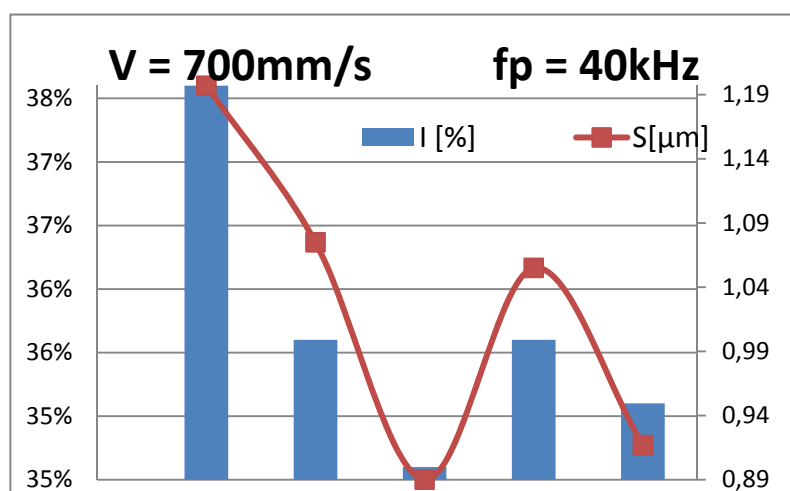
Фиг. 12 Режим 1.4



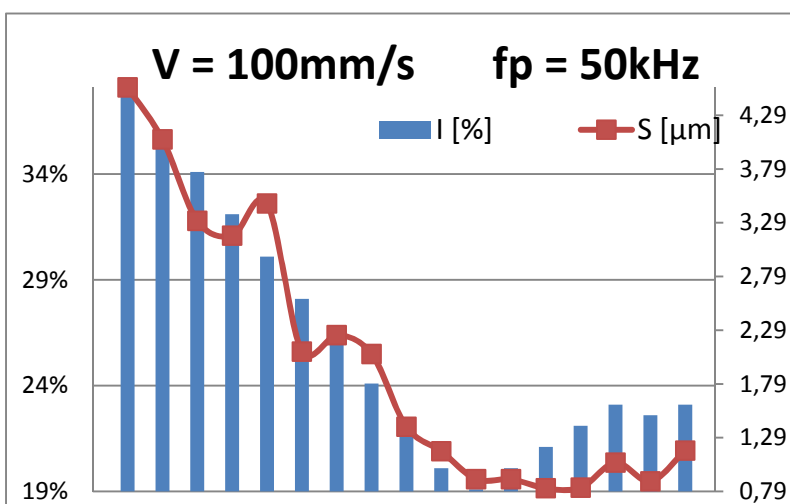
Фиг. 13 Режим 1.5



Фиг. 14 Режим 1.6



Фиг. 15 Режим 1.7

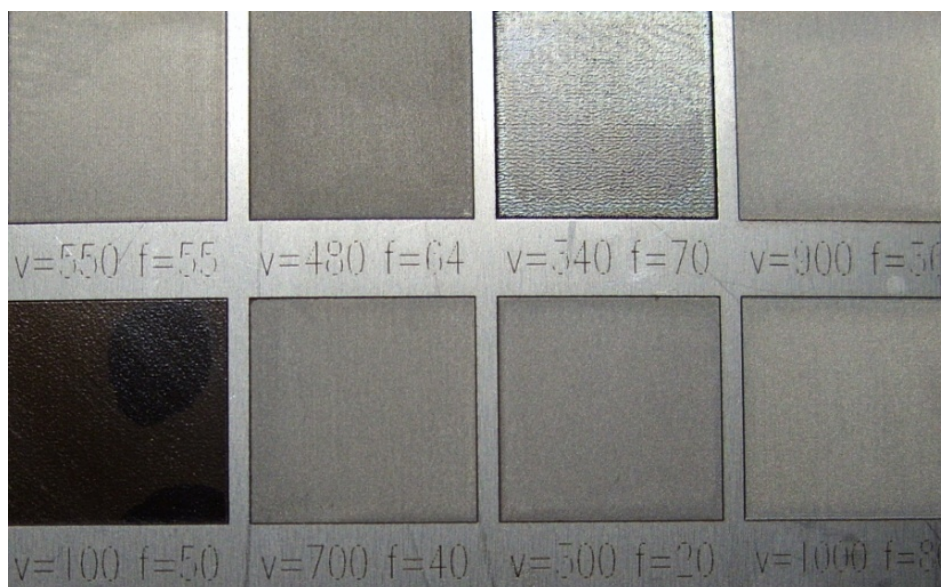


Фиг. 16 Режим 1.8

С помощта на тези графики се вижда, че при режимите 1.3 (фиг. 11), 1.5 (фиг. 13), 1.6 (фиг. 14) и 1.8 (фиг. 16) промяната в плътността на тока е плавна, а отнемането на материал за всеки от процесите клони към 1 микрон. При по-внимателно анализиране на кривите се вижда, че най-сполучливи са опити 1.3 (фиг. 11) и 1.6 (фиг. 14) тъй като при първия режим сходността е достигната много бързо, а за втория двете криви са симетрични една на друга, което говори за стабилен процес на обработка. За останалите шест режима получените резултати са или

много разнородни или кривите са прекалено начупени, което е индикация за несъвместимост в съотношенията на зададените параметри.


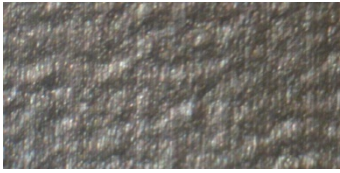


**4.1.2 Вторичен евристичен етап** – при тази серия от опити отново се използват режимите от табл. 7, но с вече известните ни стойности за плътността на тока, които се взимат от предходния ни етап. Броят на обработваните джобове е 8, но този път с размери 10x10mm (фиг. 17), за да може да бъде измерена след това грапавостта на обработените повърхности посредством описания уред.







**Фиг. 17** Обработени джобове при съответстващите режими

Изследваните нива на грапавост и съответстващите им режими и микроструктури са изведени в табл. 4.2:

**Табл.8** Измерени грапавини и микроструктури








режим №	V [mm/s]	fp [kHz]	j [%]	Ra [ $\mu$ m]	Rz [ $\mu$ m]	увеличение 16x
2.1	900	36	38	1.060	0.050	
2.2	340	70	44	1.060	0.054	
2.3	480	64	42	0.783	0.050	
2.4	550	55	39.3	0.671	0.025	

2.5	1000	80	59.7	0.660	0.032	
2.6	300	20	17.3	0.740	0.062	
2.7	700	40	36	0.785	0.040	
2.8	100	50	22	0.677	0.074	

Най-ниска грапавост е измерена при опит 2.4, 2.5 и 2.8 (табл. 8). Би следвало да се избере някой от тях, но след направения при първичния евристичен етап анализ на графиките, описващи сходимостта на процесите, се вижда, че тези три режима не са подходящи поради силно начупените криви за плътността на тока и сваления слой материал. Разглеждат се режими 2.3, 2.6 и 2.7, които са следващи три опита, притежаващи ниска грапавост. Процеса 2.7 е неподходяща поради вече изброените по-горе причини. Относно 2.3 и 2.6 с оглед на получените грапавости и заключенията направени в предходния етап може да се счете, че тези два режим са успешни. За определянето, кои параметри от режимите ще се използват в следващите етапи е нужно избраната стойност да бъде средна за разглеждания интервал или по възможност да бъде най-отдалечена от граничните стойност. При режима 2.3  $V = 480\text{mm/s}$ ,  $f_p = 64\text{kHz}$ , а при режима 2.6  $V = 300\text{mm/s}$ ,  $f_p = 20\text{kHz}$ . Тъй като при вторият опит стойността за честота е гранична стойност то тук ще се избере скоростта ( $V = 300\text{mm/s}$ ), от което следва, че от първия опит ще се вземе честотата ( $f_p = 64\text{kHz}$ ).

**4.1.3 Първи еднофакторен опит** – в този етап при постоянна скорост ще бъде изменяна честота на излъчване на импулса на лазера. В края на предходния етап беше определено, че скоростта която ще се използва при тази обработката ще бъде  $V = 300\text{mm/s}$ . Промяната на  $f_p$  ще бъде през  $10\text{kHz}$  в работния диапазон на машината от 20 до  $80\text{kHz}$ . Стойността за  $j$ , от която се стартира всеки процес е 25% от максималната. Извършва се обработване на 7 джоба с размер  $10 \times 10\text{mm}$ , измерват се грапавостите на всяка обработена повърхност и се търси къде тя е най-малка, получените стойности се попълват в табл. 9:

**Табл.9 Измерени грапавини и микроструктури**






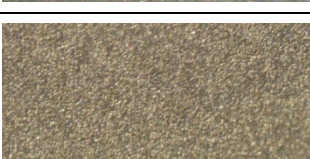
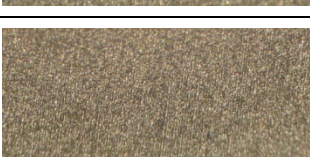
V = 300mm/s							
режим №	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7
$f_p$ [kHz]	20	30	40	50	60	70	80
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0.740	0.680	0.765	0.938	0.710	4.130	10.030
Rz [ $\mu\text{m}$ ]	0.062	0.015	0.062	0.061	0.040	0.246	0.66
увеличение 16x							







Единствената проба, която се откроява от другите, е номер 3.2 (табл. 9), чиято грапавост е  $Ra = 0.680$ , а колебанията са в много малки стойности. С помощта на оптичния микроскоп се вижда, че същият образец е с много добро качество на повърхността, получена след лазерната обработка. Близка по стойност на 3.2 (табл. 9) е грапавостта измерена за режима 3.5 (табл. 9), но тук като недостатък се явява голямото отклонение получено за  $Rz$ . Останалите проби имат или незадоволителни стойности на грапавост или релефа на повърхностния слой, отчетен чрез микроскопа, е прекалено вълнист.

**4.1.4 Втори еднофакторен опит** – при тази фаза от експеримента ще се варира със стойностите за  $V$  в граници от 80 до 1000mm/s. Избраната стойност във вторичния евристичен етап за честотата беше 64kHz. В случаят се закръгля стойността за честотата и се използва  $f_p = 60kHz$ . Началната стойност на тока при всички процеси е  $j = 30\%$ . В случаят се изработват 11 на брой джоба отново с размери 10x10mm и се повтарят действията от предходния опит. Таблица 10 съдържа измерените стойности за  $Ra$ ,  $Rz$  и съответстващите им микроструктури.

**Табл.10 Измерени грапавини и микроструктури**




f <sub>p</sub> = 60kHz				
режим №	V [mm/s]	Ra [μm]	Rz [μm]	Увеличение 16x
4.1	80	0.705	0.056	
4.2	100	0.623	0.043	
4.3	200	извън обхвата на уреда		
4.4	300	0.710	0.040	
4.5	400	0.897	0.050	
4.6	500	0.750	0.030	
4.7	600	0.650	0.040	





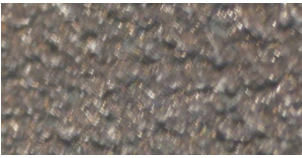
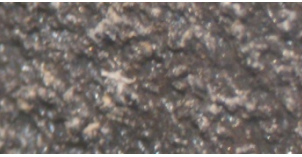

4.8	700	0.690	0.030	
4.9	800	0.726	0.084	
4.10	900	0.760	0.037	
4.11	1000	0.864	0.070	

Най-много се отличава опита направен при режим 4.2 (табл. 10) където стойността за Ra е най-малка. На фона на другите измерени грапавости в тази част от експеримента това е най-добрият получен резултат. Като цяло при  $f_p = 60\text{kHz}$  може да бъде видно, че големината на грапавините е сравнително малка за целия разглеждан интервал, което навеждана на мисълта, че така избраната стойност за честотата е най-подходяща за изследвания материал. Единствено режима 4.3 се отличава с прекалено голяма грапавост, която е извън обхвата на измервателни уред. С оглед на всички измерени до този момент грапавости от предходните два етапа и текущия, и след сравняване на режимите 3.2 (табл. 9) и 4.2 (табл. 10) се избира вторият, защото той има по-ниска стойност за Ra.

**4.1.5 Трети еднофакторен опит** – с избраният режим 4.2 изследваме как ще повлияе промяната в плътността на тока върху обработената повърхност. Интервала, в който ще променяма  $j$  е от 10 до 100% през всеки 10%. Размера на всеки изработен джоб отново е 10x10mm. Измерените грапавости са изведени в табл. 11.

**Табл.11 Измерени грапавини и микроструктури**

f <sub>p</sub> = 60kHz V = 100 mm/s				
режим №	j [%]	Ra [μm]	Rz [μm]	Увеличение 16x
5.1	10	0.51	0.06	
5.2	20	0.698	0.066	
5.3	30	0.598	0.103	

5.4	40	извън обхвата на уреда	
5.5	50		
5.6	60		
5.7	70		
5.8	80		
5.9	90		
5.10	100		

Резултатите получени за грапавостите при промяната на плътността на тока на лазерния лъч са предвидими с оглед на това, че при повишаване на интензивността на процеса количеството енергия, която се съсредоточава върху детайла влияе пряко на качеството на повърхността. Не е случаен факта, че повечето стойности за грапавостта са извън обхват на измервателния уред. При обработката с послените няколко режима беше констатирано даже прекомерно изхвърляне на сажди около обработваната повърхност, които не бяха премахнати от абсорбиращата система на машината. Първите три опита се характеризират с ниска грапавост и сравнително добро качество на обработената повърхност. За целите на експеримента се избира слуга когато плътността на тока е  $j = 30\%$ . Заедно с избраните вече стойности за скоростта и честотата на лазерния лъч можем вече да пристъпим към основната част от експеримента.

#### 4.2 Многофакторен експеримент

В този етап ще се разгледа същинската част от експеримента и ще се определи зависимостта на формула (1). След като са получени стойностите за всеки един от изследваните фактори посредством еднофакторните опити може да се определят нивата им и да се попълнят в табл. 13 и в матрицата на планирания експеримент табл. 12.

**Табл.12 Таблица (матрица) на планираният експеримент**

№ на опита	Кодови означения				Натурални означения		
	s	x	y	z	fp [kHz]	V [mm/s]	j [%]
1	1	-1	-1	-1	40	80	20
2	1	1	-1	-1	80	80	20
3	1	-1	1	-1	40	120	20
4	1	1	1	-1	80	120	20
5	1	-1	-1	1	40	80	40
6	1	1	-1	1	80	80	40
7	1	-1	1	1	40	120	40
8	1	1	1	1	80	120	40

**Табл.13 Таблица на натуралните стойности**

Означения		Долно равнище	Основно равнище	Горно равнище
Натурални	Кодови	-1	0	1
fp [kHz]	x	40	60	80
V [mm/s]	y	80	100	120
j [%]	z	20	30	40

Посредством стойностите от табл. 13 вече е възможно да се определи кодирането на всеки един от факторите с помощта на формулите:

$$x = \frac{2(\ln fp - \ln fp_G)}{(\ln fp_G - \ln fp_D)} + 1 = \frac{2(\ln fp - 4,382)}{(4,382 - 3,689)} + 1 = 2,885 * \ln fp - 11,642$$

$$y = \frac{2(\ln V - \ln V_G)}{(\ln V_G - \ln V_D)} + 1 = \frac{2(\ln V - 4,787)}{(4,787 - 4,382)} + 1 = 4,933 * \ln V - 22,614 \quad (8)$$



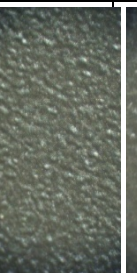
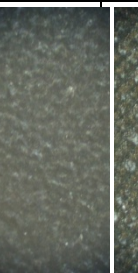
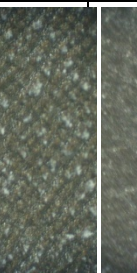
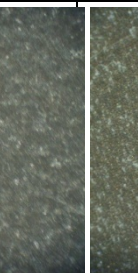


$$z = \frac{2(\ln j - \ln j_G)}{(\ln j_G - \ln j_D)} + 1 = \frac{2(\ln j - 3,689)}{(3,689 - 2,996)} + 1 = 2,885 * \ln j - 9,643$$

След извършване на кодирането се пристъпва към реализирането на многофакторният експеримент. Използват се данните от табл. 12, като се спазва последователността на опитите. Машините и измервателната техника са същите използвани до този момент. След завършване на експеримента се записват данните за грапавостите в таблица 14 и се пресмятат стойностите за  $ra_i$ ,  $x*ra_i$ ,  $y*ra_i$  и  $z*ra_i$ . В табл. 15 са изведени режимите, измерените грапавини и съответстващите им микроструктури.

**Табл.14 Таблица на измерените стойности от планирания експеримент**

№ на експеримента (i)	Резултати от експеримента за $Ra_i$	$ra_i$	$x*ra_i$	$y*ra_i$	$z*ra_i$
1	0.645	-0.349	0.349	0.349	0.349
2	0.43	-0.844	-0.844	0.844	0.844
3	0.69	-0.371	0.371	-0.371	0.371
4	0.446	-0.807	-0.807	-0.807	0.807
5	7.86	2.062	-2.062	-2.062	2.062
6	0.44	-0.821	-0.821	0.821	-0.821
7	3.48	1.247	-1.247	1.247	1.247
8	0.57	-0.57	-0.57	-0.57	-0.57

Табл.15 Измерени граповини и микроструктури

режим №	1	2	3	4	5	6	7	8
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0.645	0.43	0.69	0.446	7.86	0.44	3.48	0.57
Rz [ $\mu\text{m}$ ]	0.5	0.07	0.11	0.078		0.12	0.23	0.15
Увеличение 16x								

С така получените стойности в табл. 14 се изчисляват емпиричните коефициенти от формулите (5) като в крайна сметка се получава:

$$\hat{b}_0 = \frac{1}{N} \sum r a_i = \frac{1}{8} (-0.349 - 0.844 - 0.371 - 0.807 + 2.062 - 0.821 + 1.247 - 0.57) = -0.057$$

$$\hat{b}_1 = \frac{1}{N} \sum x^* r a_i = \frac{1}{8} (0.349 - 0.844 + 0.371 - 0.807 - 2.062 - 0.821 - 1.247 - 0.57) = -0.704$$

$$\hat{b}_2 = \frac{1}{N} \sum y^* r a_i = \frac{1}{8} (0.349 + 0.844 - 0.371 - 0.807 - 2.062 - 0.821 + 1.247 - 0.57) = -0.069$$

$$\hat{b}_3 = \frac{1}{N} \sum z^* r a_i = \frac{1}{8} (0.349 + 0.844 + 0.371 + 0.807 + 2.062 - 0.821 + 1.247 - 0.57) = 0.536$$

След като и четирите коефициента са известни може да се престъпи към заместване на всички неизвестни в уравнението на регресията:

$$r_a = -0.057 - 0.704 \cdot [2.885 \cdot \ln(fp) - 11.642] - 0.069 \cdot [4.933 \cdot \ln(V) - 22.614] + 0.536 \cdot [2.885 \cdot \ln(j) - 9.643] = 4.531 - 2.031 \ln(fp) - 0.34 \ln(V) + 1.546 \ln(j) \quad (9)$$

След като бъде приложено антилогаритмуване се получава уравнение, даващо връзка между трите разглеждани фактора и силата, която те оказват върху параметъра граповост:

$$R_a = 92.851 \cdot fp^{-2.031} \cdot V^{-0.34} \cdot j^{1.546} \quad (10)$$

## 5. Анализ и оценка на получените резултати

Както при всички машини, така и при лазерите, различно зададените работни параметри на машината влияят с определена специфичност върху вида обработван материал. Бяха констатирани множество характерни особености при обработката на стомана S304 посредством машината Lasertec 40. Получените резултати дадоха общ поглед върху възможността за последваща обработка на горе споменатия материал.

Бяха разгледани три параметъра на лазерната машина – честота на излъчване на светлинния сноп, плътност на тока на лазера и скорост на движение на лазерното петно. При различните комбинации от зададени параметри на машината се забеляза тенденция към сравнително близки стойности за граповостта на обработената повърхност. Единствените потличаващи стойности за граповостта бяха получени при по-високата плътност на тока ( $j$ ) на лазерния лъч. Това е ясен аргумент, че за качествената микро обработка на стомана S304 трябва да се използват сравнително ниски стойности за плътността на тока при дадената машината. Също така е много важно да се отбележи, че параметъра  $j$  е силно зависим и от стойностите зададени на другия разглеждан параметър, а именно честотата на излъчване ( $fp$ ). В процеса на работа беше отчетено, че  $fp$  има също голямо значение за качеството на обработка. В случая когато се изменя само честотата е видимо как в граничните за машината стойности, граповостта на обработените повърхнини е по-висока от тази когато се работи в средата на работния диапазон. Ясно се вижда от планирания експеримент, че в повечето случаи ниска граповост има там където  $fp = 40\text{kHz}$ , докато при  $fp = 80\text{kHz}$  получените стойности

са високи. Това се обяснява с факта, че когато честота на излъчване е по-ниска се натрупва повече количество енергия, в резонаторната част на машината, и когато тя бъде освободена, попадайки върху повърхността на материала, аблацията в точката на контакт е по-голяма от колкото ако честота е по-голяма. Обратно - когато честотата е по-голяма от средната за машината, лазерният лъч контактува с повърхността с такава наситеност, че е възможно да се получат микроструктури от типа на кратери или най-просто казано ще се образува хълмиста грапавост. Последният от трите разглеждани параметъра е скоростта на лазерния лъч. Тук разбира се основна роля отново играе времето, за което се осъществява контакта между материала и светлинния сноп. От проведените експерименти се вижда как при високи скорости на движение на лазера и ниски стойности за  $j$  и  $fr$  получената грапавост е над 1 микрон, което само по себе си е достатъчна причина да бъде отхвърлено като комбинация. Това се обяснява с факта, че при висока скорост поради малкия интензитет на лазера лъча не успява да обработи сполучливо повърхността. Съответно за ниски стойности на скоростта и високи за  $j$  и  $fr$  получените резултати отново не са оптималните търсени. Това е така, защото с малката си скорост лъча, който в този случай притежава голяма енергия, контактува прекалено продължително с обработваната повърхност и по този начин се осъществява интензивно изгаряне на материала, което не се препоръчва при такъв вид микро обработки. Впечатление правят експериментите, които са проведени с ниска скорост при средна честота и ниска плътност на тока. Измерените резултати са ясна обосновка, че точно този режим е препоръчителен за микро обработки, на стомана S304, посредством използваната лазерна машина.

С провеждането на многофакторният експеримент резултатите получени от серията еднофакторни опити придобиват по-голяма истинност и значение. На база изведената формула е възможно да се прогнозира с достатъчна достоверност каква да бъде очакваната грапавост след обработката на материал при определени стойности за разглежданите три фактора. Тази формула може да се използва при обработки, които се извършват само на машината Lasertec 40, като не е гарантирано, че при друг вид машини няма да е нужно да бъде направена същата последователност от изследвания.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Изследванията, отразени в настоящата статия, са свързани с договор №102ни184-5/2010 „Изследване на процеса на микрообработване на сложни форми чрез лазерно изпаряване.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Коваленко, В.С.; Котляров, В.П. – „Лазерна обработка на материалите”, С., Техника, 1988.
2. JPSA Laser - „MEMS Micromachining with UV Excimer Lasers”, [http://www.jpsalaser.com/apps\\_main.html](http://www.jpsalaser.com/apps_main.html).
3. JPSA Laser - „Short pulse UV lasers in semiconductor applications”, [http://www.jpsalaser.com/apps\\_main.html](http://www.jpsalaser.com/apps_main.html).
4. JPSA Laser - „Wafer Processing with Short-Pulse UV DPSS Lasers”, [http://www.jpsalaser.com/apps\\_main.html](http://www.jpsalaser.com/apps_main.html).
5. Karnakis, D. ; Rutterford, G.; Knowles, M. - „High quality laser milling of ceramics, dielectrics and metals using nanosecond and picosecond lasers”, <http://www.oxfordlasers.com>.
6. Karnakis, D. - „Ultrafast Laser Nanomachining: Doing More With Less”, <http://www.oxfordlasers.com>.
7. Wagner, R.G.; Huynh, Q.U.; Hopfinger, R. - „Ablation Behaviour of Metals for the Mould and Die Industry”, TU Berlin.
8. Kaldos, A.; Pieper, H.J.; Wolf, E. - „Lasermachining in die making - a modern rapid tooling process”, [www.elsevier.com/locate/jmatprotoc](http://www.elsevier.com/locate/jmatprotoc).
9. Софийски Университет „Св. Климент Охридски” - „Лазерен генератор с непрекъснато възбуждане от полупроводников лазер: устройство и основни характеристики”, <http://quantum.phys.uni-sofia.bg>.

## **КОРЕСПОНДЕНЦИЯ**

доц. д-р инж. Георги ТОДОРОВ  
кат. ТМММ, МТФ, ТУ-София, бул. „Кл. Охридски“ 8, 1000 София, БЪЛГАРИЯ  
e-mail: [gdt@tu-sofia.bg](mailto:gdt@tu-sofia.bg)

маг. инж. Явор СОФРОНОВ  
кат. ТММ, МТФ, ТУ-София, бул. „Кл. Охридски“ 8, 1000 София, БЪЛГАРИЯ  
e-mail: [engineer@dir.bg](mailto:engineer@dir.bg)

доц. д-р инж. мат. Николай НИКОЛОВ  
кат. ТММ, МТФ, ТУ-София, бул. „Кл. Охридски“ 8, 1000 София, БЪЛГАРИЯ  
e-mail: [nickn@tu-sofia.bg](mailto:nickn@tu-sofia.bg)

доц. д-р инж. Панчо ДАНАИЛОВ  
кат. ТМММ, МТФ, ТУ-София, бул. „Кл. Охридски“ 8, 1000 София, БЪЛГАРИЯ  
e-mail: [pdanail@tu-sofia.bg](mailto:pdanail@tu-sofia.bg)

бак. инж. Петър ГАБРОВСКИ  
МТФ, ТУ-София, бул. „Кл. Охридски“ 8, 1000 София, БЪЛГАРИЯ  
e-mail: [pe4orak@abv.bg](mailto:pe4orak@abv.bg)