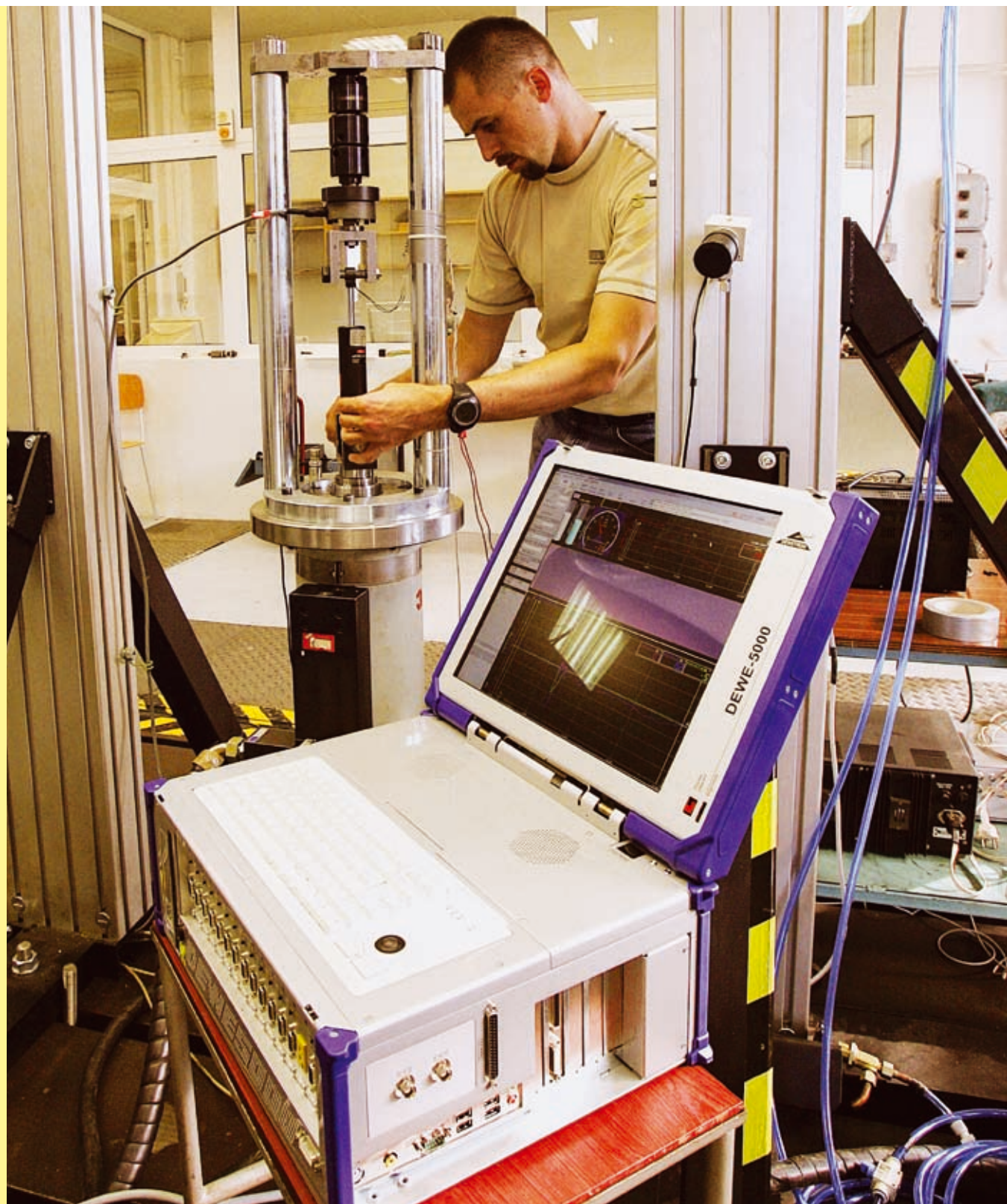


**3**  
**2007**

# JMO

## JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA FINE MECHANICS AND OPTICS

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI - FAKULTA STROJNÍ**





# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

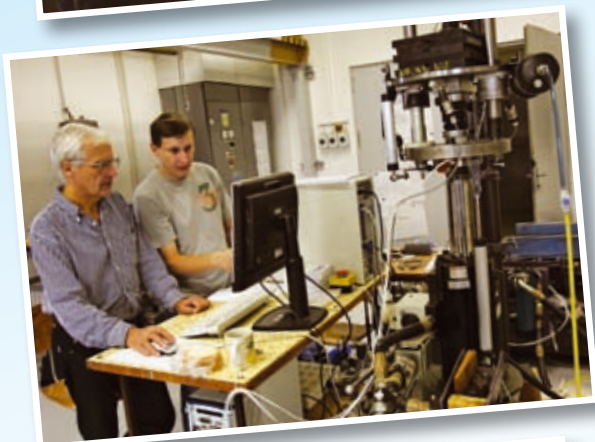
## FAKULTA STROJNÍ

### AKREDITOVANÉ STUDIJNÍ PROGRAMY



#### TŘILETÝ BAKALÁŘSKÝ STUDIJNÍ PROGRAM: » STROJÍRENSTVÍ

Studijní obory – stroje a zařízení, Výrobní systémy, Materiály a technologie [P, K]



#### TŘILETÝ NAVAZUJÍCÍ MAGISTERSKÝ STUDIJNÍ PROGRAM: » STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

Studijní obory – Strojírenská technologie, Konstrukce strojů a zařízení, Výrobní systémy, Automatizované systémy řízení ve strojírenství, Aplikovaná mechanika [P, K, A]



#### PĚTILETÝ MAGISTERSKÝ STUDIJNÍ PROGRAM: » STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

Studijní obory – Strojírenská technologie, Konstrukce strojů a zařízení, Výrobní systémy, Automatizované systémy řízení ve strojírenství, Aplikovaná mechanika [P, K, A]

#### DOKTORSKÉ STUDIJNÍ PROGRAMY: » STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

Studijní obory – Aplikovaná mechanika, Výrobní systémy a procesy, Materiálové inženýrství [P, K]



#### » STROJE A ZAŘÍZENÍ

Studijní obory – Konstrukce strojů a zařízení [P, K]

#### » STROJÍRENSKÁ TECHNOLOGIE

Studijní obory – Strojírenská technologie [P, K]

#### VYSVĚTLIVKY:

P – prezenční forma studia

K – kombinovaná forma studia

A – studium v angličtině

## REDAKČNÍ RADA

**Předseda:** RNDr. Miloslav VYCHODIL, CSc., Meopta-optika, s.r.o., Přerov

**Členové:** RNDr. Ing. Ján BARTL, CSc., ÚM SAV, Bratislava, doc. Dr. RNDr. Zdeněk BOUČHAL, UP, Olomouc, Ing. Igor BREZINA, Bratislava, Ing. Jan DUPÁK, CSc., ÚPT AV ČR, Brno, prof. Ing. Pavol HORŇÁK, DrSc., STU, Bratislava, prof. RNDr. Miroslav HRABOVSKÝ, DrSc., SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, RNDr. Vladimír CHLUP, Olomouc, RNDr. Lubomír JASTRABÍK, CSc., FZÚ AV ČR, Praha, RNDr. Karol KAROVIČ, DrSc., ÚM SAV, Bratislava, RNDr. Pavel KLENOVSKÝ, Český metrologický institut, Brno, RNDr. Josef KRÁSA, CSc., FZÚ AV ČR, Praha, Ing. Jiří KRŠEK, VUT, Brno, doc. RNDr. Vojtěch KŘESÁLEK, CSc., UTB, Zlín, Ing. Jan KŮR, Mesing, spol. s r.o., Brno, doc. Ing. Martin LIBRA, CSc., ČZU, PRAHA, prof. RNDr. Miroslav LIŠKA, DrSc., VUT, Brno, RNDr. Zdeněk LOŠŤÁK, Meopta-optika, s.r.o., Přerov, prof. Ing. Petr LOUDA, CSc., TU, Liberec, Ing. Vladimír MATELA, Meopta-optika, s.r.o., Přerov, Ing. Monika MÍČHALOVÁ, PHILIPS Slovakia s.r.o., Bratislava, doc. RNDr. Miroslav MILER, DrSc., ÚFE AV ČR, v.v.i., Praha, prof. RNDr. Jan PEŘINA, DrSc., UP, Olomouc, prof. Ing. Jaromír PIŠTORA, CSc., VŠB - TU, Ostrava, prof. RNDr. Ing. Jaroslav POSPÍŠIL, DrSc., UP, Olomouc, Jan ŘÍDKÝ, CSc., FZÚ AV ČR, Praha, RNDr. Dagmar SENDEŘÁKOVÁ, Ph.D., UK, Bratislava, prof. Ing. Karel STUDENOVSKÝ, DrSc., ČVUT, Praha, prof. RNDr. Anton ŠTRBA, CSc., UK, Bratislava

Gerd HÄUSLER, Lehrstuhl für Optik, Universität Erlangen - Nürnberg, Erlangen (Germany), Michael J. LALOR, Liverpool John Moores University, U. K.; Paul RAUSNITZ, TCI New York, U. S. A.; Rodney J. SOUKUP, University of Nebraska-Lincoln, U. S. A.; M. C. TEICH, Boston University, U. S. A.; Emil WOLF, University of Rochester, U. S. A.

## JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA

Vydává Fyzikální ústav Akademie věd České republiky, v.v.i. za spoluúčasti The International Society for Optical Engineering (SPIE/CS) v Nakladatelství Fyzikálního ústavu Akademie věd České republiky, v.v.i.

**Ředitel FZÚ AV ČR:** Ing. Karel JUNGWIRTH, DrSc.

**Odpovědný zástupce vydavatele:** Jan ŘÍDKÝ, CSc.

**Šéfredaktor:** dipl. tech. Jaroslav NEVŘALA

**Adresa redakce v Olomouci** (předplatné, nakladatelské služby):

SLO UP a FZÚ AV ČR, Tř. 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc,  
tel.: 585 631 576, fax: 585 631 531, e-mail: pelclova@optnw.upol.cz

**Adresa redakce v Přerově** (šéfredaktor): Kabelíkova 1, 750 02 Přerov,  
tel.: 581 242 151, mobil: 776 011 925, fax: 581 242 222.

Otisk povolen se svolením redakce a se zachováním autorských práv. Nevyžádané materiály se nevrací. Za původnost a správnost příspěvků odpovídají autoři.

**Předplatné:** Celoroční 420,- Kč/rok. Ceny jsou jednotné pro Českou i Slovenskou republiku. Do všech ostatních zemí je časopis JMO distribuován za jednotnou cenu 10 EUR/ks. Pro členy SPIE/CS činí předplatné 120,- Kč/rok. Předplatné pro studenty Bc., Mgr., Ph.D. a studenty středních škol při osobním odběru činí 120 Kč/rok; v případě zaslání poštou 300,- Kč/rok.

**Rozšiřuje** vydavatel a Podniková prodejna Meopta-optika, s.r.o., Přerov, Kabelíkova 1, 750 02 Přerov.

**V Slovenské republice je kontaktní místo:** prof. RNDr. Anton Štrba, CSc., katedra experimentální fyziky FMFI UK, Mlynská dolina F2/148, SK - 842 48 Bratislava, tel.: 00421 2 65 426 706, e-mail: Strba@fmph.uniba.sk

**V Slovenské republice rozšiřuje a objednávky přijímá:**

prof. Ing. Ivo Čáp, CSc., Žilinská univerzita - FPV, Hurbanova 15, SK - 010 26 Žilina, tel.: +421 415 136 350, e-mail: ivo.cap@fpv.utc.sk

**Tiskne** TYPOServis Holešov, Masarykova 650, 769 01 Holešov,  
tel.: 573 398 746, e-mail: dtp@typoservis.cz

**Inzerce:** redakce, Kabelíkova 1, 750 02 Přerov,  
tel.: 581 242 151, mobil: 776 011 925, fax: 581 242 222.

Odborné články jsou lektorovány.

© JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA 2007

# JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA

VĚDECKO-TECHNICKÝ ČASOPIS  
ROČNÍK 52

3/2007

## OBSAH

- Zkoušky korozní odolnosti uhlíkových vrstev vytvořených na slitinách hořčíku metodou PACVD**  
(M. Gołqbczak, S. Mitura) ..... 63
- Aplikace MW/RF plazmy pro vytváření uhlíkových nanostruktur** (W. Kaczorowski) ..... 64
- Bioaktivita diamantu** (K. Bakowicz-Mitura)..... 67
- Uhlíkové vrstvy a jejich aplikace v medicíně**  
(Š. Tümová, Z. Rožek, P. Louda) ..... 69
- Významné životní jubileum Ing. Jana Kůra (red.)**..... 70
- Vliv plazmového obrábění na mechanické vlastnosti uhlíkových PAN vláken** (H. Sarraf, P. Louda)..... 71
- Nanofotonické metody vzájemných přeměn optických záření a plazmonů v rozhraní dielektrika a kovu**  
(J. Pospíšil, J. Hrdý, J. Hrdý, jr.)..... 74
- TAE 2007 (Směřování zemědělské techniky)**  
(M. Libra)..... 78
- Mikroskopie magnetických sil**  
(A. Hendrych, R. Kubínek, M. Vůjtek) ..... 79
- Měření a analýza nerovností povrchů kovových materiálů vytvořených abrazivním vodním paprskem**  
(J. Valíček, P. Hlaváček, S. Hloch, M. Ohlídal, K. Páleníková).... 86
- Chytrý senzor pozná formát digitální fotografie (mp)** ..... 90
- Správa o Stavebných veltrhoch Brno** (P. Horňák)..... 90
- Mikrosystémová technologie na HANNOVER MESSE**  
(jpe)..... 91
- Obsah časopisu Jemná mechanika a optika je uveden na internetu: <http://jmo.fzu.cz>

Informace o předplatném podá, objednávky přijímá, objednávky do zahraničí vyřizuje: SLO UP a FZÚ AV ČR, Tř. 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc, tel.: 585 223 936, fax: 585 631 531.

Cena čísla 40 Kč včetně DPH



## ADVISORY BOARD

**Chairman:** Miloslav VYCHODIL - Meopta-optika, s.r.o., Přerov (Czech Rep.)

**Members:** Ján BARTL - Inst. of Measurement Science Slovak Academy of Sciences, Bratislava (Slovak Rep.), Zdeněk BOUCHAL - Palacky Univ. (Czech Rep.), Igor BREZINA - Bratislava (Slovak Rep.), Jan DUPÁK - Inst. of Scientific Instruments of Czech Academy of Science, Brno (Czech Rep.), Pavol HORŇÁK - Slovak Tech. Univ., Bratislava (Slovak Rep.), Miroslav HRABOVSKÝ - Joint Lab. of Optics of Palacky Univ. and Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Olomouc (Czech Rep.), Vladimír CHLUP - Olomouc (Czech Rep.), Lubomír JASTRABÍK - Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Praha (Czech Rep.), Karol KAROVIČ - Inst. of Measurement Science Slovak Academy of Sciences, Bratislava (Slovak Rep.), Pavel KLENOVSKÝ - Czech Metrology Inst., Brno (Czech Rep.), Josef KRÁSA - Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Praha (Czech Rep.), Jiří KRŠEK - Tech. Univ., Brno (Czech Rep.), Vojtěch KRĚSÁLEK - Tomas Bata Univ. in Zlín (Czech Rep.), Ing. Jan KŮR, Mesing, spol. s r.o., Brno (Czech Rep.), Martin LIBRA - Czech Univ. of Agric., Praha (Czech Rep.), Miroslav LIŠKA - Tech. Univ., Brno (Czech Rep.), Zdeněk LOŠTÁK - Meopta-optika, s.r.o., Přerov (Czech Rep.), Petr LOUDA - Tech. Univ., Liberec (Czech Rep.), Vladimír MATELA - Meopta-optika, s.r.o., Přerov (Czech Rep.), Ing. Monika MÍČALOVÁ, PHILIPS Slovakia s.r.o., Bratislava (Slovak Rep.), Miroslav MILLER - Inst. of Photonics and Electronics of Academy of Sciences, v.v.i., Praha (Czech Rep.) Jan PEŘINA - Palacky Univ., Olomouc (Czech Rep.), Jaromír PIŠTORA - Tech. Univ., Ostrava (Czech Rep.), Jaroslav POSPÍŠIL - Palacky Univ., Olomouc (Czech Rep.), Jan ŘÍDKÝ - Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Praha (Czech Rep.), Dagmar SENDEŘÁKOVÁ - Comenius Univ., Bratislava (Slovak rep.), Karel STUDENOVSKÝ - Czech Tech. Univ., Praha (Czech Rep.), Anton ŠTRBA - Comenius Univ., Bratislava (Slovak Rep.),

Gerd HÄUSLER, Lehrstuhl für Optik, Universität Erlangen - Nürnberg, Erlangen (Germany), Michael J. LALOR, Liverpool John Moores University, U. K.; Paul RAUSNITZ, TCI New York, U. S. A.; Rodney J. SOUKUP, University of Nebraska-Lincoln, U. S. A.; M. C. TEICH, Boston University, U. S. A.; Emil WOLF, University of Rochester, U. S. A.

## FINE MECHANICS AND OPTICS

Published by Institute of Physics Academy of Sciences of the Czech Republic under participation of The International Society for Optical Engineering (SPIE/CS) in the Publishing House of the Institute of Physics of the Academy of Sciences of the Czech Republic.

**Director of Institute of Physics, Academy of Sciences of the Czech Republic:** Karel JUNGWIRTH

**Editor:** Jan ŘÍDKÝ

**Managing Editor:** Jaroslav NEVŘALA

**Address of the Editor's office in Olomouc** (subscription, publisher services): SLO UP a FZÚ AV ČR, Tř. 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc, Czech Republic, phone: ++420 585 631 576, fax: ++420 585 631 531, e-mail: pelclova@optnw.upol.cz

**Address of the Editor's office in Přerov** (Managing Editor): Kabelíkova 1, 750 02 Přerov, Czech Republic.

Reproduction only with permission of the Editor and under observing the copyright. Unasked manuscripts are not sent back. The authors are responsible for originality and correctness of their contributions.

**Subscription fee:** Annual fee is 420,- CZK. This price of subscription is the same for both Czech and Slovak Republics. Fine Mechanics and Optics journal is distributed into other countries for uniform price 10 EUR/Pcs. For members of SPIE/CS the annual subscription fee is 120,- CZK. For Bc., Mgr., Ph.D. and secondary school students the subscription fee is 120,- CZK per year, annual subscription including postage is 300,- CZK.

**Distribution:** by the Publisher, Company Sales shop of Meopta-optika, s.r.o., Přerov, Kabelíkova 1, 750 02 Přerov, Czech Republic.

**Contact place for the Slovak Republic:** Anton Štrba, Department of Experimental Physics, Faculty of Mathematics, Physics and Informatics, Comenius University, Mlynská dolina F2/148, SK - 842 15 Bratislava, phone: 00421 2 65 426 706, e-mail: strba@fmph.uniba.sk

**Printing:** TYPOServis Holešov, Masarykova 650, CZ-769 01 Holešov, phone: 573 398 746 (from abroad: ++420 573 398 746). e-mail: dtp@typoservis.cz

**Advertising:** editor's office, Kabelíkova 1, CZ-750 02 Přerov, fax: 581 242 222.

Papers are reviewed.

© FINE MECHANICS AND OPTICS 2007

# FINE MECHANICS AND OPTICS

SCIENTIFIC-TECHNICAL JOURNAL

VOLUME 52

3/2007

## CONTENTS

- Corrosion resistance testing of diamond layers deposited on magnesium alloys by PACVD method** (M. Gołąbczak, S. Mitura) ..... 63
- Carbon nanostructures produced using MW/RF plasma** (W. Kaczorowski) ..... 64
- Diamond bioactivity** (K. Bakowicz-Mitura) ..... 67
- Application of diamond-like films in medicine** (Š. Tůmová, Z. Rožek, P. Louda) ..... 69
- Considerable anniversary of Ing. Jan Kůra** (red.) ..... 70
- Effect of plasma treatment on fine mechanical properties of pan-based carbon fibers** (H. Sarraf, P. Louda) ..... 71
- Nanophotonical methods of the mutual conversions of optical radiations and surface plasmons in a dielectric-metal interface** (J. Pospíšil, J. Hrdý, J. Hrdý, jr.) ..... 74
- TAE 2007 (Trends in Agricultural Engineering)** (M. Libra) ..... 78
- Magnetic force microscopy and its aptitude for nano-magnetic studies** (A. Hendrych, R. Kubínek, M. Vůjtek) ..... 79
- Measurement and analysis of the roughness of metal material surfaces generated by the abrasive waterjet** (J. Valíček, P. Hlaváček, S. Hloch, M. Ohlídal, K. Páleníková) ..... 86
- Smart sensor identifies a format of digital photo** (mp) ..... 90
- Information about civil engineering fairs in Brno** (P. Horňák) ..... 90
- Micro-system technology in HANNOVER MESSE** (jpe) ..... 91
- You can also find the contents of the Journal on Internet:  
<http://jmo.fzu.cz>

Information on subscription rate and on ordering gives the SLO UP a FZÚ AV ČR, Tř. 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc, tel.: 585 223 936, fax: 585 631 531.

Price for single copy: 40 Kč incl. VAT

# Zkoušky korozní odolnosti uhlíkových vrstev vytvořených na slitinách hořčíku metodou PACVD

## 1. ÚVOD

Slitiny hořčíku aktuálně nacházejí široké použití v mnoha oblastech průmyslu, kde má zásadní význam redukce hmotnosti [1,2]. Příklady oblastí použití slitin hořčíku jsou: letecký průmysl, kosmický, automobilový, elektronický, produkce sportovního náčiní atd. K hlavním přednostem slitin hořčíku náleží: vysoký poměr mechanické odolnosti a hmotnosti, vysoká tepelná vodivost, malá tepelná roztažnost, dobré slévárenské vlastnosti a vysoká funkční integrita umožňující vytváření objektů ze slitin hořčíku v podobě blízké koncové (near-net-shape) [1,2].

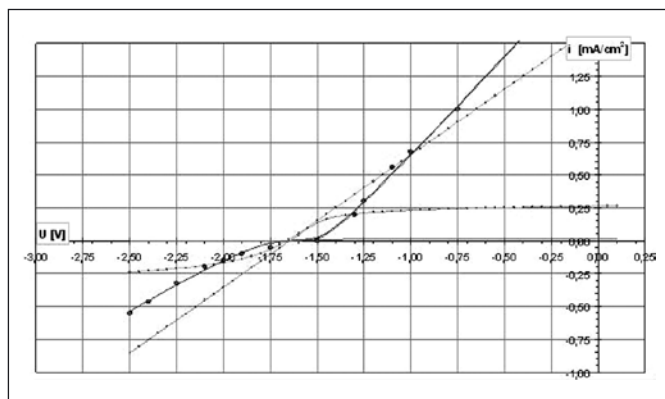
Slitiny hořčíku vykazují také vady [1], ze kterých je největší velká korozní poddajnost, což má za následek jejich úbytek a zmenšení mechanické odolnosti. Jiná vada slitin hořčíku je jejich malá odolnost proti opotřebení, pokles vysokoteplotní odolnosti a také poruchy elektromagnetického pole. Vyjmenované vady podstatnou měrou omezují použití slitin hořčíku v technice.

V prezentované práci byly tyto vady eliminovány výběrem vzorků. Na slitinách hořčíku AZ31 došlo k vytvoření speciálních uhlíkových vrstev, tvořících ochranné bariéry a zároveň i splňující dekorativní funkce, použitím technologie vysokofrekvenční plazmy PACVD (Plasma Activated Chemical Vapour Deposition) [1,3]. Prezentovány jsou výsledky vlastních experimentů korozní odolnosti uhlíkových vrstev vytvářených na této slitině. Experimenty obsahovaly zkoušky korozní odolnosti uskutečněné elektrochemickou metodou a také testy koroze v solné komoře.

## 2. VÝSLEDKY

Elektrochemické zkoušky spočívaly ve vykonání série potenciostatických měření za pomoci aparatury Volta Master 1 a potenciostatu Radiometr-Copenhagen PGP 201. Zkoumané vzorky byly ponořeny v Tyrodově kapalině o teplotě 20 °C, která byla směsí roztoků solí s následujícím chemickým složením: NaCl - 8 g/dm<sup>3</sup>, CaCl<sub>2</sub> - 0,2 g/dm<sup>3</sup>, KCl - 0,2 g/dm<sup>3</sup>, NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> - 0,05 g/dm<sup>3</sup>, MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O - 0,1 g/dm<sup>3</sup>, NaHCO<sub>3</sub> - 1 g/dm<sup>3</sup>, pH - 6,9.

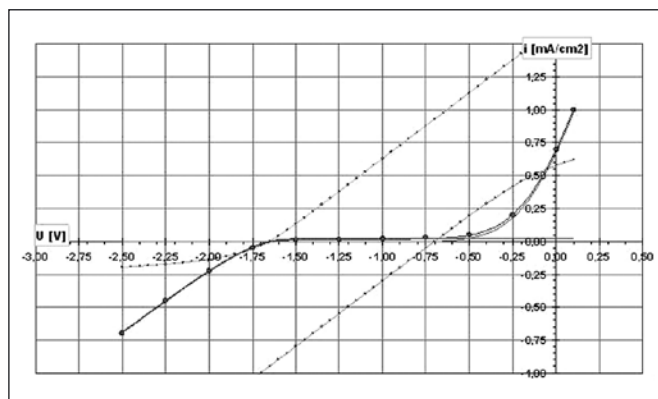
Příklady výsledků potenciostatických zkoušek jsou představeny v grafické podobě na obrázcích 1-2. Hodnocení korozní odolnosti bylo uskutečněno na základě porovnání hodnot korozních potenciálů. Korozní potenciály na hranici fází kov-roztok vyjadřují body průniku křivek napětí s osou OX.



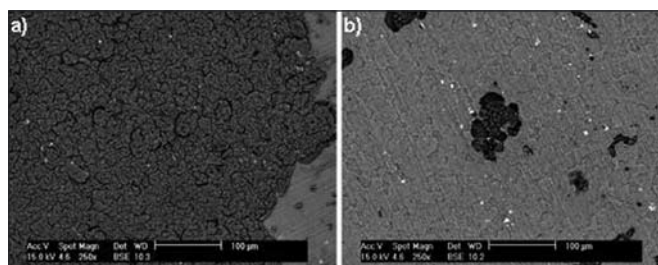
Obr. 1 Potenciostatická křivka pro vzorek ze slitiny hořčíku AZ31 bez uhlíkové vrstvy;  $i$  - hustota proudu,  $U$  - napětí

Analýza výsledků elektrochemických zkoušek osvědčila, že použití uhlíkové vrstvy na vzorcích ze slitiny hořčíku AZ31 zásadně ovlivňuje posun a rozložení potenciálů (vzrůst korozního potenciálu) na hranici fází kov-roztok (obr. 2) oproti vzorku bez tohoto povlaku (obr. 1). Naznačuje to velmi výhodný vliv uhlíkové vrstvy vytvářené na této slitině na zvětšení ochranné bariéry před elektrochemickou korozi.

Po zakončení etapy potenciostatických zkoušek bylo uskutečněno pozorování povrchu zkušebních vzorků SEM mikroskopií. Tato zobrazení jsou uvedena na obr. 3. V případě povrchu vzorků pokrytých uhlíkovou vrstvou je možno pozorovat pouze jednotlivé, tmavé skvrnky (obr. 3b), které pravděpodobně svědčí o zárodkách koroze; v případě povrchu vzorků bez tohoto povlaku (obr. 3a) je zřejmé výrazné působení elektrochemické koroze na celém povrchu vzorku.



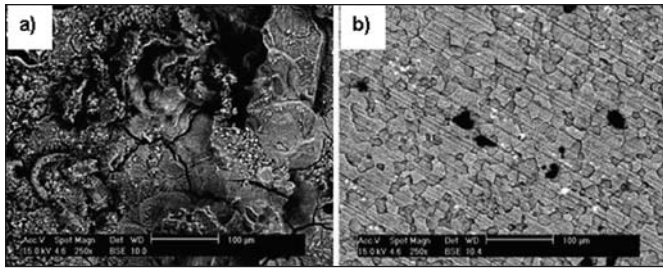
Obr. 2 Potenciostatická křivka pro vzorek ze slitiny hořčíku AZ31 s vytvořenou uhlíkovou vrstvou;  $i$  - hustota proudu,  $U$  - napětí



Obr. 3 Porovnání zobrazení SEM vzorků ze slitiny hořčíku AZ31 po potenciostatické zkoušce koroze: a) vzorek bez vrstvy b) vzorek s uhlíkovou vrstvou

Testy korozní odolnosti byly uskutečněny v solné komoře typu SIGMA DIESEL (BOSCH) [1]. Pro experimenty byly připraveny vzorky ze slitiny hořčíku AZ31 s vytvořenou uhlíkovou vrstvou i bez tohoto povlaku. Expoziční čas vzorků v solné komoře byl stanoven následovně: 5 h - pro vzorky bez uhlíkové vrstvy a 200 h - pro vzorky s vytvořenou uhlíkovou vrstvou. Konstantní podmínky korozního testu v solné komoře: teplota 35 °C ± 1 °C, vlhkost 85 % - 90 %, intenzita postřiku 2 ml ± 1 ml / h, tlak 1,0 bar ± 0,2 bar, objem NaCl v roztoku 5 % objemově.

Hodnocení korozního testu vzorků bylo provedeno na základě porovnání zobrazení povrchů vzorků získaných během pozorování SEM mikroskopii. Příklady zobrazení povrchů zkušebních vzorků jsou uvedeny na obr. 4.



Obr. 4 Porovnání zobrazení SEM vzorků ze slitiny hořčíku AZ31 po zkoušce v solné komoře: a) vzorek bez vrstvy b) vzorek s uhlíkovou vrstvou

Porovnání zobrazení povrchů vzorků ze slitiny AZ31 vystavených působení korozního prostředí v solné komoře ukazuje, že vzorky bez ochranného uhlíkového povlaku podléhají korozi po relativně krátkém čase expozice (5 h). Vzorky z této slitiny pokryté uhlíkovou vrstvou oproti tomu prokázaly pouze náznaky ohnisek koroze teprve po 200 h expozici v solné komoře. Uvedené výsledky zkoušek potvrzují velmi výhodný vliv uhlíkových vrstev na ochranu této slitiny před korozi.

Marcin Gołąbczak, Stanisław Mitura, Institute of Materials Science and Engineering, Technical University of Lodz, Stefanowskiego 1/15, Poland, mitura@p.lodz.pl

Witold KACZOROWSKI, Institute of Materials Science and Engineering, Technical University of Lodz, Poland

## Aplikace MW/RF plazmy pro vytváření uhlíkových nanostruktur

*Spojení dvou na sobě nezávislých systémů zdrojů energie o mikrovlnné a radio-frekvenci umožňuje vytváření uhlíkových vrstev o drobnokrystalické struktuře. Metoda MW/RF PACVD umožňuje nezávislé řízení hustoty proudu iontů rozhodujících o generování a stupni ionizace aktivních částic – s využitím systému MW a také kontrolování proudu a energie iontů – s využitím systému RF. V práci jsou představeny výsledky získané výzkumem vytváření uhlíkových nanostruktur ve výše zmíněné MW/RF plazmě.*

### 1. ÚVOD

Uhlíkové vrstvy vzbuzují zájem již několik desítek let a důvodem je stále vzrůstající počet publikací zabývajících se touto problematikou. Uhlíkové vrstvy se vyznačují množstvím zajímavých vlastností a způsoby řízení procesů jejich vytváření umožňují jejich aplikace v tak odlišných odvětvích jako jsou: obrábění [1,2], elektronika [3] či medicína [4-6]. Plazma MW/RF je ve světě využívána pro vytváření mnoha druhů tenkých vrstev od DLC po  $\text{SiN}_{1,3}$  a také  $\text{SiO}_2$  [7-9]. Výzkum prováděný v tomto oboru naznačuje, že ohromnou předností této metody je možnost omezení vlastního pnutí v povlácích vytvářených tímto způsobem [10]. Tato technologie byla započata pracemi Martina a Klemberg-Sapieho [11], a její dynamický rozvoj je pozorován již mnoho let. V prezentované práci jsou představeny výsledky výzkumu aplikace plazmy MW/RF pro syntézu uhlíkových

### 3. SHRNUTÍ

Provedené zkoušky potvrdily, že slitiny hořčíku s uhlíkovou vrstvou se charakterizují velmi vysokou odolností proti korozi, kdežto slitiny bez těchto vrstev nespĺňovaly jakékoliv užité vlastnosti.

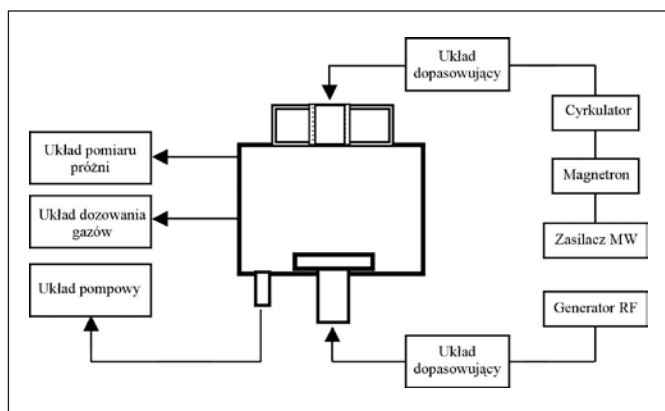
### Literatura

- [1] M. GOŁĄBCZAK: Wytwarzanie warstw węglowych na stopach magnezu metodą PACVD. Praca doktorska, Politechnika Łódzka, 2005.
- [2] J. E. GRAY, B. LUAN: Protective Coatings on Magnesium and its Alloys - A Critical Review. Journal of Alloys and Compounds No 336, 2002, pp. 88-113.
- [3] S. MITURA: Nanoszenie cienkich warstw węglowych w procesie rozkładu węglowodorów w polu elektrycznym w. cz. Praca doktorska, Politechnika Łódzka, 1985.

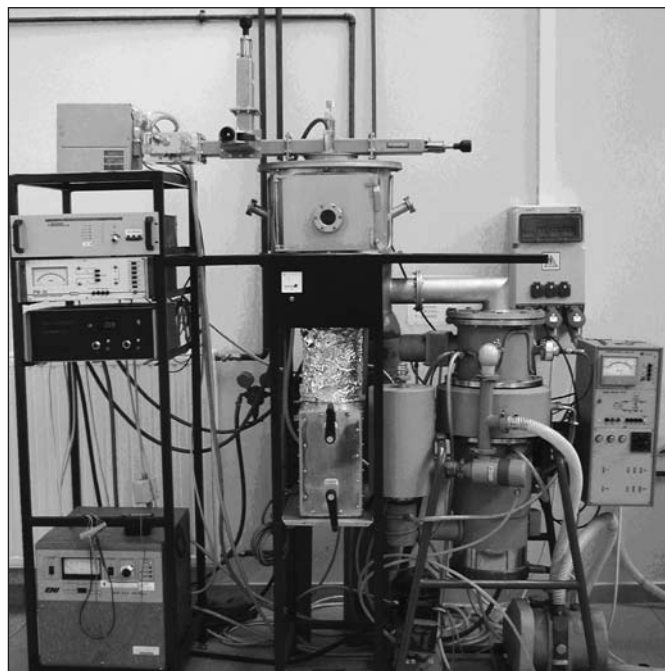


## 2. APARATURA

V uskutečněném výzkumu byla využita aparatura prezentovaná na *obrázcích 1 a 2*. Zařízení využívá metody MW/RF PACVD - *microwave and radio frequency plasma assisted chemical vapour deposition*. Skládá se z následujících provozních jednotek: soustava napájení radiofrekvenční energií (zespod pracovní komory) a mikrovlnou (shora pracovní komory), soustava dávkování pracovních plynů, vytváření vakua, a také systém řízení společně s kontrolně-řídicím panelem. Vzorky byly umístěny na speciálním úchytu který byl umístěn na elektrodě a spojen regulační soustavou s generátorem o radiofrekvenci 13,56 MHz. Mikrovlnný výkon vytvářený v generátoru MW byl do komory dodáván křemíkovou trubicou umístěnou v horní části reaktoru. Zařízení MW/RF PACVD je v Institutu materiálového inženýrství, Polytechniky Łódz používáno pro syntézu uhlíkových vrstev na různých podložích od kovových, slitin titanu, kyselinovzdorných ocelí, po křemíkové plátky a plastické hmoty [12,13]. Obzvláště zajímavé jsou procesy vytváření vrstev s využitím vlastností nízkoteplotní mikrovlnné plazmy.



Obr. 1 Schéma zařízení MW/RF PACVD



Obr. 2 Pohled na zařízení pro vytváření uhlíkových vrstev metodou MW/RF PACVD

## 3. UŽITÉ MATERIÁLY A METODIKA ZKOUŠEK

Během syntézy uhlíkových vrstev byl uplatněn široký rozsah parametrů, jejichž soupis je obsažen v *tabulce 1*. Komora reaktoru byla odčerpána na vakuum okolo několika Pa a následně bylo

podloží podrobena procesu čištění v atmosféře neutrálních plynů, jehož čas byl závislý na druhu použitého podloží. Během procesu vytváření vrstev byl jako pracovní plyn použit metan nebo jeho směs s jinými plyny (v krajním případě byl během syntézy vrstev UNCD maximální podíl metanu v atmosféře pracovních plynů 1%).

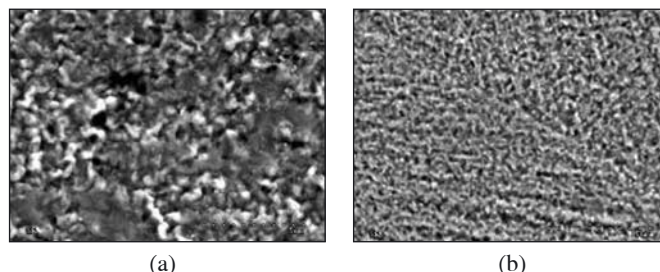
Tab. 1 Parametry vytváření uhlíkových vrstev metodou MW/RF

Výkon generátoru MW [W]	50-1000
Výkon generátoru RF [W]	0-1000
$V_B$ , Potenciál autopolarizace [V]	0-1000
Pracovní tlak [Pa]	5-100
Druh plynu	CH <sub>4</sub> , Ar
Celkový průtok plynů [sccm]	10-200
Čas procesu [min]	1-120

Vytvořené povlaky byly podrobena zkoumání za pomoci elektronového skenovacího mikroskopu SEM a také mikroskopu atomárních sil AFM. Byl použit elektronový skenovací mikroskop firmy Hitachi 3000 N s napětím 15 kV a mikroskop atomárních sil typu Smena firmy NT-MDT.

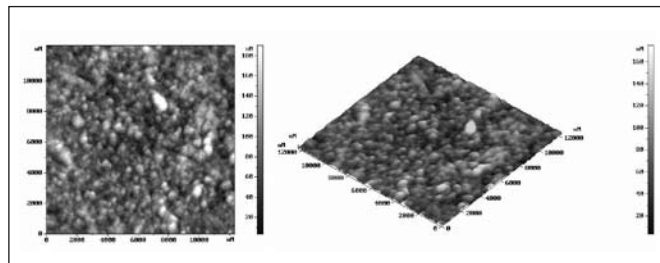
## 4. VÝSLEDKY

V první etapě výzkumu byly uhlíkové vrstvy zkoumány za využití SEM. Touto technikou byl pozorován silný vliv podloží na vytváření uhlíkové vrstvy. Na obr. 3a a 3b jsou představeny typické struktury vrstev vytvořených na podloží ve formě titanu a také oceli AISI 316 L. Jak je vidět, uhlíkové vrstvy na podloží ze slitiny titanu se charakterizují vločkovou stavbou zatímco na ocelovém podloží je struktura vrstev drobnozrná.

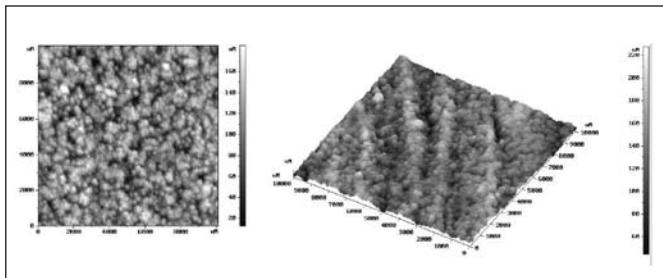


Obr. 3 SEM zobrazení uhlíkových vrstev na titanu (a) a na oceli AISI 316L (b)

V případě oceli AISI 316L byla rovněž provedena analýza vlivu směsi plynů přiváděných do procesu na morfologii vytvářených vrstev. Provedený výzkum se opíral o plyny: metan a argon. Ukázalo se, že dodávání argonu do směsi plynů přiváděných do procesu přispívá k rozdrobení vytvářené struktury. Pro porovnání jsou na *obrázcích 4 a 5* prezentovány příklady zobrazení AFM vrstev vytvářených v metanové i v metanovo-argonové plazmě.

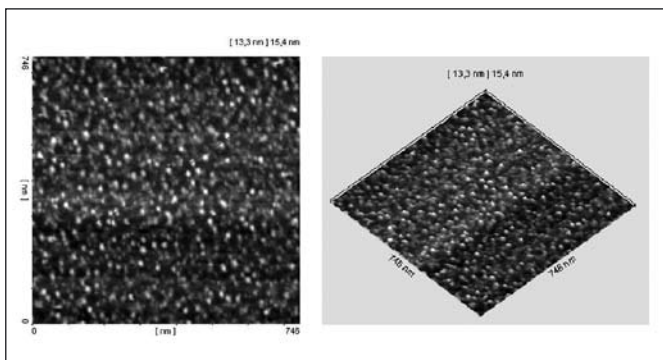


Obr. 4 Uhlíkové vrstvy na podloží AISI 316L vytvářené z metanové plazmy (střední velikost zrn okolo 300 nm)



Obr. 5 Uhlíkové vrstvy na podloží AISI 316L vytvářené z metanovo-argonové plazmy (střední velikost zrn okolo 150 nm)

Analýzy vlivu různých směsí plynů přiváděných do procesu na strukturu získávaných vrstev vedly k vypracování technologie vytváření vrstev UNCD [14]. Tyto vrstvy mají drobnokrystalickou strukturu o velikosti krystalitů od několika do několika desítek nanometrů (obr. 6).



Obr. 6 Zobrazení povrchu vrstvy UNCD vytvořené na křemíkovém podloží získané metodou AFM (pozorovaný povrch vzorku 746 x 746 nm)

## 5. ZÁVĚRY

Jak je patrné z výzkumu, aplikací MW/RF plazmy je možno řízené vytváření uhlíkových nanostruktur. V případě ocelového podloží je struktura vytvářených vrstev krystalická přičemž velikost krystalitů může být modifikována vhodnou volbou směsi plynů přiváděných do procesu. Bylo též pozorováno, že struktura vytvářených vrstev MW/RF je silně závislá na podloží. Dosud uskutečněný výzkum uplatnění dvoufrekvenční plazmy pro vytváření uhlíkových nanostruktur umožnil vypracování technologií vytváření vrstev UNCD.

## Literatura

- [1] W. Kaczorowski, P. Niedzielski, P. Couvrat: Hard carbon coating for cutting aluminium alloys, *Journal of Superhard Materials* 157 (2005) 12
- [2] A. Gołąbczak, P. Niedzielski: Application of Hard Carbon Coating Made by Dense Plasma RF CVD Method for Increase of Life Metal Slitting Saws, *Journal of Chemical Vapor Deposition*, 3 (1995), 332-341
- [3] T. Guzdek, J. Schmidt, M. Dudek, P. Niedzielski: *NCD films as an active gate layer in chem FAT structures*, *Diamond and Related Materials* 13 (2004) 1059-1061
- [4] S. Mitura, A. Mitura, P. Niedzielski, P. Couvrat: *Nanocrystalline diamond coating*, *Nanotechnology in Materials Science*, Pergamon Press, Elsevier 200, 2165-2176
- [5] R. Hauert: *An overview on the tribological behavior of diamond-like carbon in technical and medical applications*, *Tribology International* 37 (2004) 991- 1003
- [6] K. Bąkiewicz, S. Mitura: *Biocompatibility of NCD*, *Journal of Wide Bandgap Materials* 9 (2002) 261-272
- [7] E. Braca, J.M. Kenny, D. Korzec, J. Engemann: *Transition from polymer-like to diamond-like carbon coatings synthesized by hybrid radio frequency-microwave plasma source*, *Thin Solid Films* 394 (2001) 30-39
- [8] M. R. Wertheimer, H.R. Thomas, M.J. Perri, J. Klemberg-Sapieha, L. Martinu: *Plasmas and polymers: From laboratory to large scale commercialisation*, *Pure and Appl. Chem.* 68 (1996), 1047-1053
- [9] L. Martinu, D. Poitras: *Plasma deposition of optical films and coatings: A review*, *Journal of Vacuum Science and Technology A* 18 (2000), 2619-2645
- [10] J. Klemberg-Sapieha, L. Martinu, M.R. Wertheimer, P. Gunther, R. Schellin, C. Thielemann, G. M. Sessler: *Plasma deposition of low-stress electret films for electroacoustic and solar cell applications*, *Journal of Vacuum Science and Technology A* 14 (1996), 2775- 2779
- [11] J. Klemberg-Sapieha, O. M. Kuttel, L. Martinu, M. R. Wertheimer: *Dual microwave-RF plasma deposition of functional coatings*, *Thin Solid Films* 193/194 (1990) 965-972
- [12] W. Kaczorowski, P. Niedzielski, S. Mitura: „Wytwarzanie warstw węglowych w nowym reaktorze MW/RF”, *Inżynieria Biomateriałów* 43-44 (2005) 28
- [13] T. Błaszczuk, B. Burnat, H. Scholl, P. Niedzielski, W. Kaczorowski: The influence of nanocrystalline diamond layers obtained by MW/RF PECVD method on surface properties of AISI 316L; *Inżynieria Biomateriałów* 56-57 (2006) 31-34
- [14] W. Kaczorowski: *Synthesis of ultrananocrystalline diamond by use dual frequency plasma*, *Nanodiam*, PWN, Warszawa 2006, 41-46



## Bioaktivita diamantu

### ÚVOD

Uhlíkové prášky je možno vytvářet různými metodami: RF PA CVD [5], RF/MW PCVD [4] detonační metodou [6, 7] i jinými. Jejich vlastnosti, např. velikost, struktura, fázové složení, jsou striktně závislé na použitých parametrech vytváření. V závislosti na jejich pozdějším použití mohou mít podobu nanokrystalků diamantu, nanotrubiček nebo grafitovo-diamantových konglomerátů. Jak ukazují poslední výzkumy, nejvíce zajímavá v oblasti medicínských aplikací je poslední z vyjmenovaných forem uhlíkových prášků. Získané výsledky poukazují dokonce i na bioaktivitu tohoto typu prášku [1].

### 1. PEROXIDACE LIPIDŮ

Peroxidace lipidů je nejvíce spektakulárním biologickým řeťezovým procesem volných radikálů. Vytváření volných radikálů v živém organismu je spjato s pojmem tzv. oxidačního stresu, čili nejobecněji řečeno toxického působení kyslíku na buňky a tkáně živého organismu. Pojem peroxidace lipidů přesně definuje místo poškození a působení volných radikálů a umožňuje proniknutí do velmi komplikovaných biochemických mechanismů [2].

### 2. ROLE NEUTROFILNÍCH GRANULOCYTŮ VE VYTVÁŘENÍ REAKTIVNÍCH FOREM KYSLÍKU

Neutrofilní granulocyty (PMNL) jsou základními ejektorovými buňkami zánětu a také hlavním elementem protibakteriální obrany. Pod vlivem působení takových faktorů jako je FMLP, doplňující složka C5a, LTB<sub>4</sub>, PAF, IL-8, NAP-2, gro/MGSA, ionofory Ca<sup>2+</sup>, lektiny, diacyloglycerol, vícenenasycené mastné kyseliny, fluoridové ionty, tumor nekrotizující faktor (TNF-*Tumor necrosis factor*), součinitel aktivující destičky, součinitel růstu destiček a komplexy antigen-protilátka granulocyty podléhají aktivaci, jejíž náplní jsou: chemotaxe, adherence, fagocytóza, degranulace, uvolnění řady bílkovin a také vytváření reaktivních forem kyslíku - dýchací výbuch (*respiratory burst*). Název není výstižný, protože může uvádět v omyl: výbuch nemá nic společného s dýcháním, resp. s procesy spotřeby kyslíku probíhajícími v mitochondriích [3].

### 3. KONTAKTNÍ ALERGIE – PLÁTKOVÉ TESTY

#### Plátkové testy (Patch tests)

Patch testy slouží k detekování alergií na drobnocástečkové sloučeniny, např.:

- Kovy
- Součásti gumy
- Léky
- Pachové substance
- Prostředky pro ochranu rostlin
- A také alergeny, které se nacházejí v místě zaměstnání zkoumané osoby.

Alergeny pro plátkové testy jsou dodávány ve formě masti nebo roztoků v aplikaturách připomínajících kapátka nebo injekční stříkačky. Následně jsou přikládány na kůži zad a za pomoci speciálních komůrek upevněny na hypoalergenní náplast. Forma, materiál ze kterého jsou zhotovené a také velikost komůrek se různí v závislosti na výrobci. Přichystané alergeny se nalepí na kůži zad ve vzdálenosti minimálně 5 cm od páteře. Zkoumanou osobu je třeba informovat o zákazu namáčení zad a vyhýbání se propocením. Alergeny jsou ponechány na kůži pacienta po 48 hodin. Po tomto časovém období se odstraní náplast a také se záda osuší pomocí filtračního papíru od přebytku alergenu. Hodnocení alergické reakce se provádí ihned ze snímků alergenu a následně po dalších 24 a 48 hodinách [8].

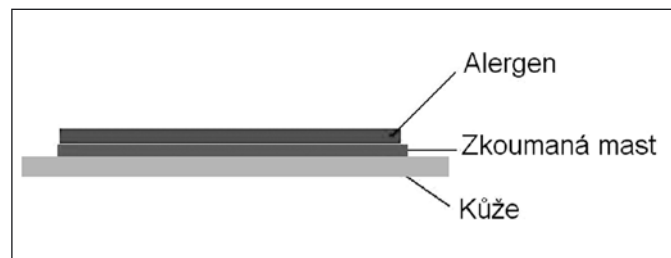
### 4. METODIKA TESTŮ ALERGIE

#### Tvorba diamantové masti

Diamantová mast se zakládá na bázi dříve vytvořeného diamantového prášku a bílé vazelíny z nemocniční lékárny Univerzity klinické nemocnice Norberta Barlickiego v Lodži.

Prvním krokem je odvážení 10 g bílé jalové vazelíny na pergamenovém kolečku a také 100 mg diamantového prášku. Následně byl diamantový prášek rozmačkán v keramickém moždíři na co možno nejdrobnější částičky. Odvážený a rozdrcený prášek byl přidán do 1 ml destilované vody.

Následujícím krokem je sloučení vazelíny se získanou suspenzí v keramickém moždíři. Důkladně propracované složky vytvoří očekávanou diamantovou mast šedé barvy, která se přendá z moždíře do malých krabiček a následně se zabezpečí pergamenovým kolečkem.

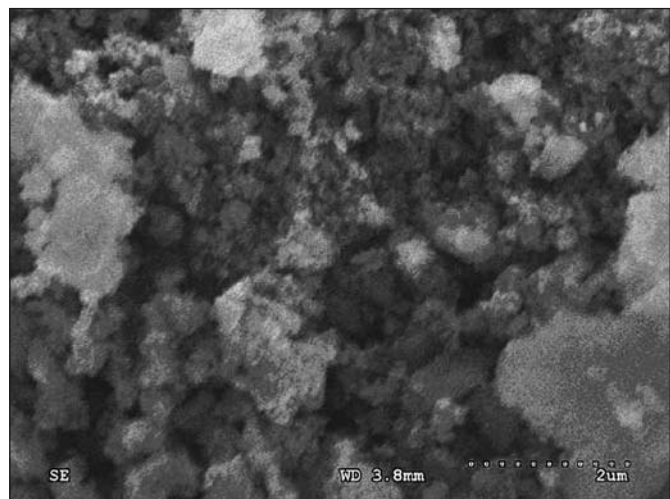


Obr. 1 Schéma nanesení diamantové masti a alergenu na kůži pacienta – plátkové testy

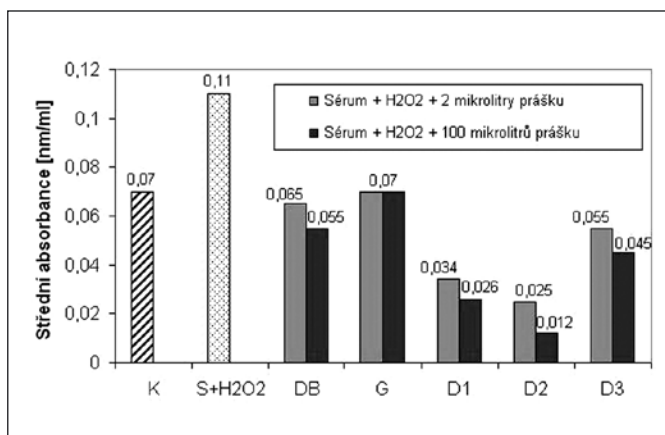
Kromě diamantových mastí vytvořených z diamantových prášků PND1 a PND2 byly zhotoveny kontrolní vzorky.

První vzorek vznikl přiložením alergenu bezprostředně na kůži pacienta, naproti tomu druhý vzorek byl pozitivní a spočívá v přiložení steroidu zabraňujícího projevům kontaktní alergie, s obchodním názvem Elocem, místo diamantové masti.

#### Výsledky experimentů



Obr. 2 SEM zobrazení nanokrystalického diamantu vytvořeného detonační metodou [1]



Obr. 3 Zobrazení absorbance vlny 532 nm. Přesnost  $p < 0,05$ . Grafické vyjádření antioxidačních vlastností diamantového prášku (brzdění peroxidace lipidů) [1]



Obr. 4 Výsledek plátkových testů s diamantovou masťou. Patrné zmenšení kontaktní alergie na nikel v přítomnosti diamantové masťou v porovnání se steroidem (Elocom)

Výzkum prášku nanokrystalického diamantu z hlediska tzv. „rozvinutého povrchu“ vrstvy nanokrystalického diamantu (NCD) potvrzuje celkovou bezpečnost aplikací medicínských implantátů s vrstvou NCD a rozšiřuje potenciální oblast nových aplikací s oporou o pozitivní bioaktivitu diamantového prášku s živým organismem.

#### Diskuse

Všechny výsledky výzkumu provedeného s diamantovým práškem vykazují, že jako biomateriál je velice biokompatibilní i pozitivně bioaktivní, což ho staví na první místo mezi biomateriály používané doposud.

Jedním z nejdůležitějších výsledků výzkumu dosažených na Polytechnice v Łódži je fakt, že diamantový prášek nevyvolává podráždění, ani alergickou reakci na kůži pacientů.

Diamantový prášek se charakterizuje novým typem bioaktivity biomateriálu spočívajícím v tom, že reakce probíhá v přítomnosti diamantu jako katalyzátoru, a ne substrátu. Mimo to se „nespotřebovává“ v probíhající chemické reakci a jeho pouhá přítomnost vyvolává její průběh. Tato vlastnost je spjata s antioxidačními vlastnostmi diamantového prášku.

#### ZÁVĚRY

Výzkum jednoznačně prokázal, že se jedná o materiál velmi biologicky aktivní, což způsobuje, že interakci s živým organismem pozitivně ovlivňuje toxické biochemické procesy na molekulární úrovni in vitro, mj. brzdí toxické procesy volných radikálů vedoucí k poškození buněčné stěny.

Mezi pozitivními vlivy diamantového prášku na lidský organismus je možno ještě vyjmenovat:

- V mechanismu heterogenní katalýzy diamantový prášek brzdí oxidační stres (peroxidace lipidů) in vitro.
- Způsobuje smetení volných radikálů a také brzdí oxidaci vícenenasycených mastných kyselin a souběžně vznik peroxidů lipidů.
- Během reakce oxidace lipidů je jediným antioxidantem, který nezmění stupeň oxidace.
- Ovlivňuje také životnost neutrofilů buzených FMLP.
- Je potenciálním inhibitorem zápalného procesu in vitro.
- Vrstva nanokrystalického diamantu (NCD) na kovových implantátech se chová jako „antialergická bariéra“.

#### Literatura

- [1] K. Bąkowiec: „Bioactivity of Diamond”, PhD Thesis, Technical University of Lodz, Poland, 2005 (in Polish).
- [2] G. Bartosz. **Druga twarz tlenu**. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1995.
- [3] Aida Yoshitomi and M. J. Pabst: „Neutrophil responses to lipopolysaccharide. Effect of Adherence on Triggering and Priming of the Respiratory Burst”, *The Journal of Immunology*, 146, 4, (1991) 1271-1276.
- [4] W. Kaczorowski, Carbon Coatings Manufactured by RF/MW PCVD method, PhD Thesis, Technical University of Lodz, Poland, 2005 (in Polish).
- [5] S. Mitura: „Znaczenie elektronów w procesie niskociśnieniowej syntezy diamentu”, **Zeszyty Naukowe Nr 666, Rozprawy Naukowe, z. 182**, Rozprawa habilitacyjna, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 1992.
- [6] Spitsyn B. V., Gradoboev M. N., Galushko T. B., Karpukhina T. A., Serebryakova N. V., Kulakowa I. I., and Melnik N. N.: Purification and functionalization of nanodiamond, Springer 2005.
- [7] V. Danilenko: Detonacyjna synteza diamentu, WN PŁ, Lodz, 2007.
- [8] M. Kieć-Świerczyńska „Alergia kontaktowa“ Oficyna wydawnicza MEDITON, Łódź 2005.



## Uhlíkové vrstvy a jejich aplikace v medicíně

*Uhlíkové vrstvy jsou charakteristické svými specifickými vlastnostmi. Vedle vysoké tvrdosti, nízkého koeficientu tření, dobré tepelné vodivosti musíme podtrhnout chemickou inertnost tohoto materiálu a vysokou korozní odolnost. Všechny uvedené vlastnosti ve spojení s vysokou biokompatibilitou umožňují úspěšnou aplikaci nanokrystalického diamantu (NCD) jako ochrannou vrstvu pro medicínské aplikace.*

**Klíčová slova:** Uhlíkové vrstvy, DLC vrstvy, NCD vrstvy.

### ÚVOD

Uhlíkové vrstvy, obsahující šest atomů uhlíku o elektronové konfiguraci  $\sigma$   $sp^3$ , jsou novým materiálem, známým teprve od roku 1981. Tyto vrstvy, podobně jako všechny uhlíkové povlaky vytvářené pomocí iontů, elektronů a fotonů, je možno označit za specifické modifikace uhlíku, které se odlišují od všech jiných známých alotropických modifikací. Modifikace uhlíku získávané za pomoci plazmy jsou charakterizovány širokým rozsahem různého objemu atomů uhlíku s elektronovou konfigurací vazby typu  $\sigma$   $sp^3$  a uhlíku o konfiguraci vazby typu  $\sigma$  i  $\Pi$  (čímž může formálně připomínat intermetalické fáze), a zároveň vykazují samozřejmě specifické fyzikální vlastnosti, např. malý součinitel tření, odolnost proti otěru nebo odolnost proti křehkému lomu.

### VLASTNOSTI UHLÍKOVÉ VRSTVY

První publikace týkající se vytváření uhlíkových vrstev pocházejí z počátku 70. let minulého století (Aisenberg a Chabot) [1]. Od té doby nepřetržitě probíhají pokusy o zdokonalení metod jejich nanášení - jak CVD (Chemical Vapor Deposition) tak i PVD (Physical Vapor Deposition).

Mezi novodobé metody CVD se řadí MW CVD (Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition) a RF CVD (Radio Frequency Chemical Vapor Deposition). Poslední z výše jmenovaných metod je mnoho let používána pro nanášení uhlíkových vrstev na Institutu biomedicínského inženýrství, katedře materiálového inženýrství, Polytechniky Łódz.

Vlastnosti uhlíkových vrstev velmi silně závisí na způsobu vytváření, důležitá je metoda a především parametry procesu. Při různých parametrech získáme různý poměr dvou základních fází

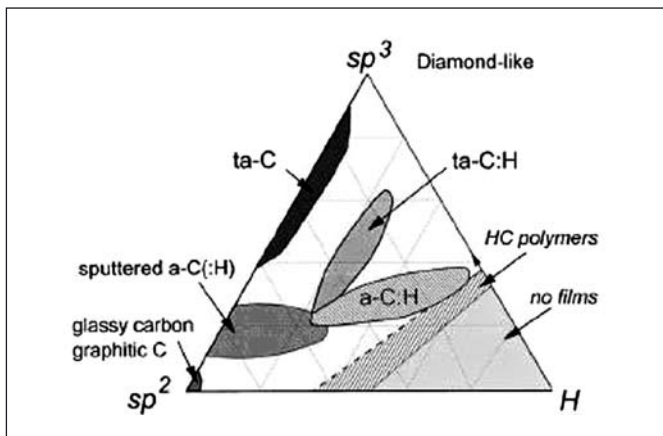
ve vrstvách:  $sp^3$  (diamantové) a  $sp^2$  (grafitové). Kromě toho mohou být uhlíkové vrstvy hydrogenizované anebo ne. Proto je též možné je klasifikovat v závislosti na obsahu vodíku a také podílu vazeb uhlík – uhlík o hybridizaci  $sp^3$  a  $sp^2$ . Grafické kritérium zobrazuje tzv. trojný fázový diagram (obr. 1), který byl poprvé použit Jacobem a Mollerem [2].

Diamantu podobný uhlík DLC (diamond – like carbon) je směsí amorfního nebo superdrobnokrystalického uhlíku, která obsahuje vazby  $ssp^2$  a  $ssp^1$  a převažují vazby  $\sigma$   $sp^3$ . Poměr jednotlivých fází v DLC vrstvách je následující: diamant ( $ssp^3$ ) cca 68 %, grafit ( $\sigma$   $sp^2$ ) cca 30 %, karbiny ( $\sigma$   $sp^1$ ) cca 2 % [2].

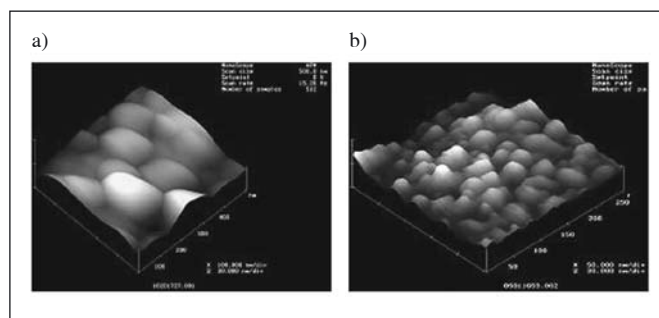
DLC velmi často vystupuje pod názvem amorfni uhlík s obsahem vodíku (amorphous carbon containing hydrogen; a – C:H), nebo nehydrogenizovaný uhlík (a – C).

Polykrystalické diamantové vrstvy se v závislosti na tom, zda jsou hydrogenizované či ne, označují následujícím způsobem: ta – C:H (tetrahedral amorphous carbon containing hydrogen), ta – C; nebo také obecně NCD (nanocrystalline diamond).

V NCD u téměř 100 % atomů uhlíku dochází k hybridizaci elektronů typu  $\sigma$   $sp^3$ . Nicméně v těchto vrstvách jsou rovněž přítomné jiné fáze, v tomto případě odborná literatura uvádí následující složení: diamant ( $\sigma$   $sp^3$ ) cca 95 %, grafit ( $\sigma$   $sp^2$ ) cca 5 % [2].



Obr. 1 Trojný fázový diagram klasifikující uhlíkové vrstvy v závislosti na obsahu vodíku a fází  $sp^3$  a  $sp^2$  [2]



Obr. 2 Obrázek metodou mikroskopie atomárních sil (AFM) vrstev a) NCD, b) DLC [3]

Fáze  $sp^3$  (diamantová) ve vrstvách garantuje chemickou neutralitu, vysokou tvrdost a s ní spjatou odolnost proti opotřebení a také dobrý odvod tepla. Fáze  $sp^2$  (grafitová) zajišťuje nízký koeficient tření a dobrou elektrickou vodivost. Díky těmto vlastnostem mají uhlíkové vrstvy široké spektrum použití v průmyslu, mimo jiné v medicínských aplikacích jako povlaky implantátů. To je možné díky dobré biokompatibilitě, chemické stabilitě a biostabilitě uhlíkových vrstev.

## UHLÍKOVÉ VRSTVY V MEDICÍNĚ

Vlastnosti uhlíkových vrstev velmi záleží na způsobu vytváření a především na parametrech procesu. Při jejich vhodné volbě je možno získat například vrstvy předcházející dosedání krevních destiček na povrch kardiologických implantátů (chlopně, stent) [4]. Na druhou stranu je možné vytvořit uhlíkové vrstvy, na které velmi dobře přiléhají kostní buňky, což je nezbytné pro získání trvalého spojení mezi kostí a implantátem (dílek endoprotézy, umělého zubu,...) [5].

V mnoha případech implantátů (kloub kyčle, kolene) je nutno vytvořit třecí spoj. Použití tradičních materiálů v takových aplikacích způsobuje opotřebení třecích elementů, vzniká vůle mezi spolupracujícími elementy, následuje ovlivnění pohybových činností a do lidského organismu se dostanou produkty opotřebení. Tyto problémy je možno vyřešit pokrytím implantátů uhlíkovými vrstvami, které jsou charakterizovány vysokou tvrdostí a odolností proti opotřebení třením [6].

Uhlíkové vrstvy se charakterizují také vysokou odolností proti korozi. Tímto předcházejí uvolňování iontů z povrchu ocelového implantátu a zmenšují riziko metalózy, choroby spojené s citlivostními reakcemi organismu. Většina ocelových implantátů je zhotovena z materiálů, které obsahují např. nikl, chrom, molybden. Z těchto prvků je obzvláště nikl silným alergenem a pokud se dostane do organismu, může vyvolat řadu nepříznivých reakcí, brzdí procesy hojení a v krajních případech může dojít až k odmítnutí implantátu [3].

Použití uhlíkových vrstev v medicíně má také ekonomický význam. Zkracují dobu rekonvalescence, předcházejí následným chirurgickým zákrokům a v krajních případech umožňují i plné uzdravení.

Využití uhlíkových vrstev jako bioneutrálních, opotřebení odolných povlaků na chirurgických nástrojích, se dokonale osvědčilo v operační praxi, dosahující velmi pozitivního hodnocení ze strany lékařů, kteří je používali. Avšak použití uhlíkových vrstev v konkrétních medicínských aplikacích vyžaduje zvládnutí technologií a také získání náležitých atestů.

## ZÁVĚR

V několika uplynulých letech byly na trh uvedeny nanotechnologie a nanomateriály. Jejich aplikací je celá řada, počínajíc motorizací, energetikou, přes informační a komunikační technologie, až po medicínu. Aplikace nanotechnologií v medicíně jsou velkou nadějí, speciálně v oblasti zobrazování a diagnostiky nemocí, jejich terapie a dopravě léků. Avšak existují některá rizika, hrozící převážně od nanočástic a nanotrubiček.

Uhlíkové vrstvy vynikají svými biokompatibilními účinky, ale to není jejich jediná vlastnost, skutečná síla uhlíku spočívá v jeho víceúčelovém využití.

## Literatura

- [1] S. Aisenberg, R. Chabot: Ion-beam deposition of thin films of diamondlike carbon. *J. Appl. Phys.*, 42 (1971), 2953.
- [2] W. Jacob, W. Moller, *Appl. Phys. Lett* 63 (1993), 1771.
- [3] K. Mítura, P. Niedzielski, G. Bartosz, J. Moll, B. Walkowiak, Z. Pawłowska, P. Louda, M. Kieć-Świerczyńska, S. Mítura: Interactions between carbon coatings and tissue. *Surface & Coatings Technology* 201 (2006), 2117–2123.
- [4] W. Okrój, M. Kamińska, L. Klimek, W. Szymański, B. Walkowiak: Blood platelets in contact with nanocrystalline diamond surfaces. *Diamond & Related Materials* 15 (2006), 1535–1539.
- [5] S. E. Rodil, R. Olivares, H. Arzate: Properties of carbon films and their biocompatibility using in-vitro tests. *Diamond and Related Materials* 12 (2003), 931–937.
- [6] G. Dearnaley, J. H. Arps: Biomedical applications of diamondlike carbon (DLC) coatings: A review. *Surface & Coatings Technology* 200 (2005), 2518 – 2524.

Ing. Štěpánka Tůmová<sup>a</sup>, Ing. Zbigniew Rożek<sup>a,b</sup>, prof. Ing. Petr Louda, CSc.<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Fakulta strojní, katedra materiálu, Technická univerzita v Liberci, Hálkova 6, 461 17 Liberec, Česká republika

<sup>b</sup> Institute of Materials Science and Engineering, Technical University of Lodz, Stefanowskiego 1/15, Poland, stepanka.tumova@tul.cz, zbynekrozek@seznam.cz, petr.louda@vslib.cz

## Významné životní jubileum Ing. Jana Kůra

Počátkem února roku 2007 oslavil člen Redakční rady časopisu *Jemná mechanika a optika* Ing. Jan Kůr své významné životní jubileum – 65 let.

Základní a střední školu absolvoval v Kyjově. Fakultu strojní VUT v Brně ukončil v roce 1964. Jeho prvním zaměstnavatelem byla Zbrojovka Vsetín, kde pracoval v konstrukci měřidel. Po roce odešel do Brna, kde nastoupil do vývoje měřicí techniky ve Výzkumném ústavu pro valivá ložiska. Působil v oddělení konstrukce měřidel, kde se stal vedoucím a později i vedoucím oddělení teoretického výzkumu měřidel.

VUVL se díky dobrým výsledkům stal vedoucím pracovištěm pro vývoj měřicí techniky pro ložiskový průmysl v rámci celé RVHP. Ing. Kůr úzce spolupracoval se sesterskými pracovišti v zemích tehdejšího východního bloku, navazoval v rámci možností kontakty se západními zeměmi a těsně spolupracoval s podniky zahraničního obchodu. V tu dobu vrcholí jeho patentová a publikační aktivita.



Po politických změnách se aktivně podílel na vzniku státního podniku MESING z části ústavu, později i na jeho privatizaci a přeměně na MESING s. r. o. a akciovou společnost. V současnosti je jedním z jednatelů a majitelů této akciové společnosti. Přispěl k tomu, že z relativně malé firmy původně vyrábějící hlavně dílenská a kalibrační měřidla, se v krátké době stal významným dodavatelem a exportérem složitých zakázkových měřicí techniky, zaměřené na stanice, automaty a kontrolně-technologické linky. Většina těchto zařízení je určena pro náročné odběratele z automobilového, ložiskového, textilního a plastikářského průmyslu.

Redakce i Redakční rada časopisu *Jemná mechanika a optika* u příležitosti jubilea Ing. Jana Kůra děkuje jubilantovi za jeho obětavou práci pro časopis *JMO* a do dalších let mu přeje hodně zdraví, životní pohodu a pracovní úspěchy.

(red.)



# Effect of plasma treatment on fine mechanical properties of PAN-based carbon fibers

*In the present work the surfaces of the polyacrylonitrile (PAN)-based carbon fibers were physically treated using cold plasma in argon and oxygen atmospheres, in order to modify and improve the fine mechanical properties of the carbon fibers used in the fiber reinforced polymer composites. The physical and morphological changes of the surfaces were investigated by tensile strength tests and scanning electron microscopy (SEM). It was found that the oxygen plasma treatments caused ablation of the carbon fiber surface, removing carbon atoms such as CO and CO<sub>2</sub> molecules. In addition, the argon plasma treatment eliminated defects on the fiber surface, reducing the size of critical flaws and thus increasing the fiber's tensile strength. A comparison of the methods applied provides a largely consistent image of the effect of plasma treatment on the fine mechanical properties.*

**Keywords:** PAN-based carbon fiber; Plasma treatment; Argon & oxygen gas flows; Tensile strength

## 1. INTRODUCTION

Polyacrylonitrile (PAN)-based carbon fibers are currently being applied as the reinforcement in both thermoset and thermoplastic matrix composites [1,2]. However, when applied without previous surface treatment, these fibers produce composites with low interlaminar shear strength (ILSS). Numerous methods have been developed to improve the fiber surface wettability or to increase the quantity of surface functional groups [3,4]. The interfacial bond between the carbon filaments and the resin matrix can be enhanced by enlarging the surface area, which provides more points of contact/anchorage between the fiber and the matrix, or by enhancing the physicochemical interaction between the components [4]. Oxidation methods consist of oxidizing the carbon fiber in a liquid or gas environment to form oxygen-containing functional groups such as carboxyl, carbonyl, lactone and/or hydroxyl groups on the surface of the fiber, while simultaneously increasing the surface area of the carbon fiber [5]. Several studies have attempted to generate strong adhesion between the fiber surface and matrix [3,6-8] to improve the stress transfer from the relatively weak and compliant matrix to the strong and stiff reinforcing fibers [6,10]. In this study, the surfaces of the carbon fibers were physically modified using cold plasma in argon and oxygen atmospheres. The treated and untreated (as-received) surfaces of the carbon fibers were subjected to detailed characterization. The physical aspects of the surfaces were examined by scanning electron microscopy (SEM) and tensile strength tests.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Carbon fiber

The carbon fiber studied in this experiment was a PAN (polyacrylonitrile)-based type, with 12 000 filaments per tow, manufactured by Tenax Fibers GmbH Co. The volumetric density for 12k carbon fibers was  $(1.77 \pm 0.02) \text{ gcm}^{-3}$  and their linear density  $(0.764 \pm 0.002) \text{ gm}^{-1}$ , respectively.

### 2.2. Plasma treatment

The plasma processing was carried out in a home-built inductively coupled cylindrical pulsed RF plasma reactor (Fig. 1). A continuous flow of oxygen and argon carrier gas was employed in the two distinct treatments. The carbon fiber samples were treated

in the chamber under a pressure of  $4.0 \times 10^{-1}$  mbar, and a current of 30 mA and 480V. The treatments in the argon atmosphere lasted 10 and 20 minutes, while those in the oxygen atmosphere lasted 2, 5 and 10 minutes. The literature reports typical plasma treatments of fibers of 1 to 30 minutes under a low pressure of  $10^{-2}$ - $10^1$  mbar [7]. Upon conclusion of the treatments, the samples were kept in a dryer in an argon atmosphere prior to their analysis.

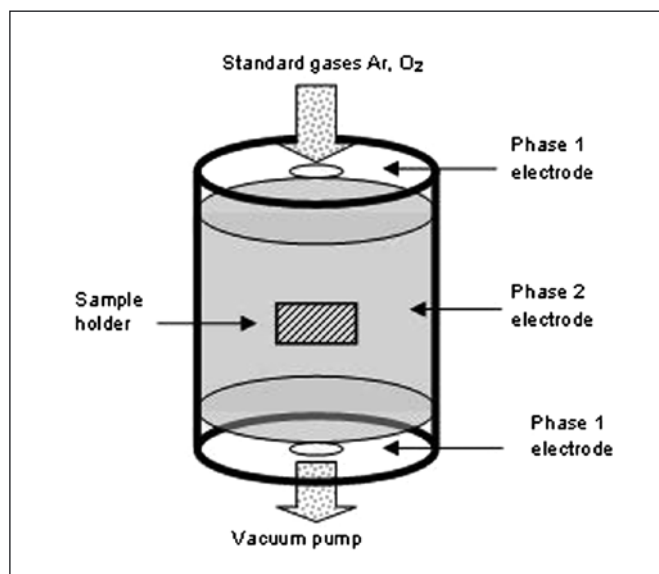


Fig. 1 Schematic of the pulsed RF plasma system

### 2.3. Mechanical properties via tensile strength tests

The mechanical properties of the untreated and treated carbon fiber samples (single filaments) were measured using an Instron Universal testing machine with a gauge length of 25 mm (Figure 2) and a crosshead speed of 2.5 mm/min, according to the ASTM D 3379-75 (Standard test method for tensile strength and Young's modulus for high-modulus single-filament materials) [8].

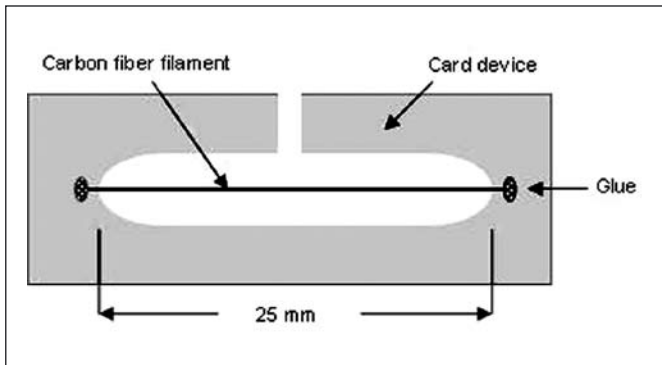


Fig. 2 Schematic of the cardboard fixture for single (carbon) filament testing

## 2.4. Surface characterization - Morphological analysis using SEM

Scanning electron microscopy (SEM) (JEOL, model 840) with 10,000 times magnification was employed to characterize the morphological changes on the fiber surfaces of untreated and treated carbon fibers. The samples were coated with a conducting material (gold) prior to examination.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1. Tensile strength tests

#### 3.1.1. Plasma treatment

Table 1 shows the average tensile strength values of sized carbon fibers untreated and treated, respectively, with argon and oxygen plasmas. It shows significant differences in the tensile strength of as-received carbon fibers and fibers subjected to argon plasma treatments for 10 and 20 minutes. The higher tensile strength of the sample treated by argon plasma for 10 minutes was attributed to the removal of the outermost layer of the carbon fiber surface. This procedure contributed to decrease the critical flaw size population that acts as a stress concentrator, contributing to reduce the fiber's strength [9]. The 20 minutes argon plasma treatment resulted in lower tensile strength than that of untreated fiber. This reduction was attributed to the longer treatment time (from 10 to 20 minutes) which led to the formation of deeper crevices and pitting on the carbon surface, thereby further reducing the fiber's tensile strength.

Table 1 also indicates that the tensile strength of carbon fibers treated with oxygen plasma decreased more than that of fibers treated with argon plasma. A comparison of the average tensile strength of treated and untreated samples reveals that this property decreased by 11.8% in the samples treated for 2 minutes and by 73.4% in those treated for 10 minutes. The carbon fiber's weight measured before and after argon plasma treatments indicated a post-treatment weight loss of around 1.2%, while losses of up to 4.9% were observed after oxygen plasma treatments. These results indicate that a progressive weight loss occurred with CO<sub>2</sub> evolution [10], suggesting that active site atoms on the fiber surface were oxidized to form oxygen-containing surface groups such as C-OH, C=O, COOH and finally CO<sub>2</sub> [6].

## 3.2. Surface characterization - SEM observations

The carbon fiber surfaces were observed by SEM and involved the following carbon fiber samples: as-received carbon fiber, fiber treated by argon plasma for 10 minutes and by oxygen plasma for 2 minutes. These samples were chosen for a more detailed analysis because these treatments heighten the probability of introducing polar groups and modifying the roughness of carbon fiber surfaces. Figure 3a shows a SEM image of an as-received carbon fiber sample. As expected, this fiber's relative smoothness was attributed to the wet spinning process employed to produce the polyacrylonitrile (PAN) filaments used as raw material in carbon fiber processing [10]. Figure 3b shows a micrograph representative of the carbon fiber treated with argon plasma for 10 minutes, indicating that the argon plasma treatment increased the superficial roughness. A comparison of the SEM findings and the tensile strength results

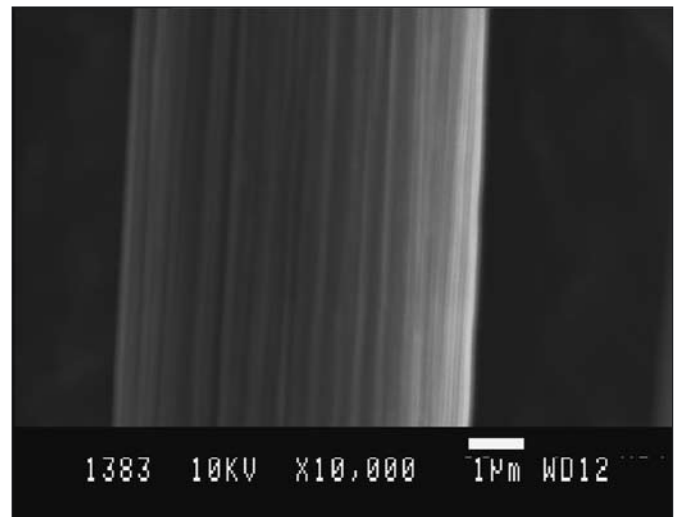


Fig. 3a

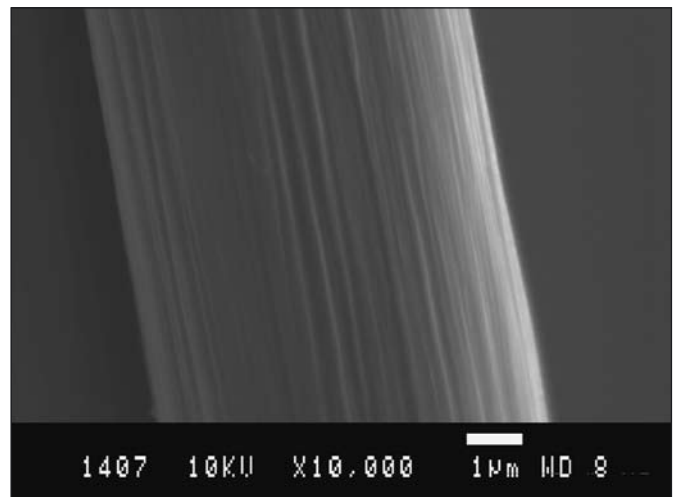


Fig. 3b

Table 1 Tensile strength ( $\sigma$ ) of carbon fiber samples untreated and treated with argon and oxygen plasmas

	Oxygen Plasma Treatment $\sigma$ [MPa]			Argon Plasma Treatment $\sigma$ [MPa]	
	2 minute	5 minutes	10 minutes	10 minutes	20 minutes
as-received fiber	1968 $\pm$ 438	1735 $\pm$ 510	1423 $\pm$ 431	523 $\pm$ 311	2468 $\pm$ 445
					1786 $\pm$ 493



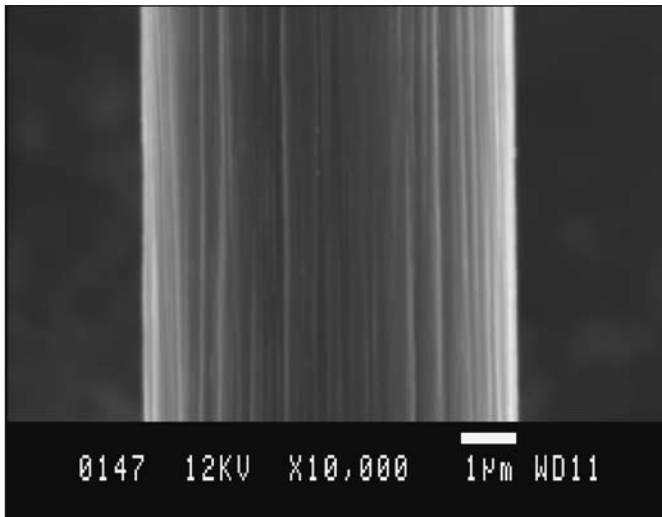


Fig. 3c

Fig. 3 SEM image of carbon fiber: a) untreated sized; b) argon plasma for 10 minutes, the flash-marked shows increased the superficial roughness; and c) oxygen plasma for 2 minutes

indicates that the roughness introduced on the fiber's surface by the argon plasma treatment did not negatively affect this mechanical property. On the contrary, these samples displayed significantly higher tensile strength values. The fiber treated with oxygen plasma (Figure 3c) displayed superficial morphological changes quite similar to those produced by the argon plasma treatment, and a striated pattern was observed along the fiber's axis. In this case, the striation depth was found slightly deeper than that observed in the argon plasma-treated fiber.

#### 4. CONCLUSIONS

In this work, for surface modification of PAN-based carbon fibers plasma surface treatment involved cold argon and oxygen plasma methods were carried out here. The results from SEM observation revealed that the carbon fibers treated with argon and oxygen plasma showed depth striations. The oxygen plasma method resulted in the removal of carbon atoms in the form of CO and CO<sub>2</sub> instead of increasing the number of polar groups on the carbon fiber surface. The results obtained from SEM investigation of the carbon fiber treated with argon plasma for 10 minutes, indicate that the argon plasma treatment increased the superficial roughness. A comparison of the SEM findings and the tensile strength results indicates that the roughness introduced on the fiber's surface by the argon plasma treatment did not negatively affect this mechanical

property. On the contrary, these samples displayed significantly higher tensile strength values. Finally, it can be conclude that cold plasma (argon gas flow) treatment may improve reliably the roughness and fine mechanical properties of carbon fibers.

#### Acknowledgments

This work was supported by the postdoctoral research grant of the Danish Framework Programme "Interface Design of Composite Materials" (STVF fund no. 26-03-0160). In particular, first author gratefully acknowledge Dr. B. F. Sorensen for his continuing interest and technical support in this work. Thanks are also due to Dr. J. B. Sorensen of the laboratory of the electron microscopy of Materials Department, Risø National Laboratory for preparing the samples and assistance during SEM examination.

#### References

- [1] Johnson, D. J., Structure and properties of carbon fibres. In *Carbon Fibers Filaments and Composites*, ed. J. L. Figueiredo, C. A. Bernardo, R. T. K. Baker & K. J. Hüttinger. Kluwer Academic, The Netherlands, 1990, pp. 119-146.
- [2] Diefendorf, R. J., and E. W. Tokarsky, *Polymer Eng. Sci.*, 15, 150 (1975).
- [3] Zielke, U., Hüttinger, K. J., Hoffman, W. P., Surface-oxidized carbon fibers: I. surface structure and chemistry. *Carbon*. 1996; 34(8):983-998.
- [4] Hull, D., Clyne, T. W.: An introduction to composite materials. 2nd edition. Melbourne: Cambridge University Press; 1996.
- [5] Fujimaki, H., et al. Process for the surface treatment of carbon fibers. U.S. patent. 4,009,305, 1977.
- [6] Yue Z. R., Jiang W., Wang L., Gardner S. D., Pittman Jr. C. U. Surface characterization of electrochemically oxidized carbon fibers. *Carbon*. 1999; 37(11):1785-1796.
- [7] Li Rongzhi, Ye Lin, Mai Y. W. Application of plasma technologies in fibre-reinforced polymer composites: a review of recent developments. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 1997; 28(1):73-86.
- [8] ASTM Standard test method for tensile strength and young's modulus for high-modulus single-filament materials. Philadelphia, PA: ASTM, 1982 (ASTM D 3379-75).
- [9] Rashkovan I. A., Korabel'nikov Yu. G. The effect of fiber surface treatment on its strength and adhesion to the matrix. *Composites Science and Technology*. 1997; 57(8):1017-1022.
- [10] Jenkins G. M. , Kawamura K. *Polymeric carbons: carbon fibre, glass and char*. 1st edition. Cambridge University Press: Cambridge, 1976.

\*Hamid Sarraf<sup>a,b</sup>, Petr Louda<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Danish Polymer Centre, Risø National Laboratory, Frederiksborg vej 399, P.O. 49, DK-4000, Roskilde, Denmark

<sup>b</sup> Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Liberec, Hálkova 6, 461 17 Liberec 1, Czech Republic

\*Corresponding author, e-mail address: sarraf\_20002000@yahoo.com

# Nanofotonické metody vzájemných přeměn optických záření a plazmonů v rozhraní dielektrika a kovu

*Článek je zaměřen k nanofotonice, která obecně studuje optické, elektrooptické a optoelektrické jevy z hlediska fotonů a fotonových proudů a jejich kontrolovaného ovládnutí v nanomateriálech a optických a elektronických nanosystémech. Týká se vztahu mezi elektromagnetickým (fotonovým) zářením a plazmony, jejichž vzájemné přeměny patří vedle šíření a detekce plazmonů k fundamentálním jevům plazmonové nanofotoniky. Po linearizované matematické reprezentaci plazmonů jsou v článku prezentovány příklady dvou základních konkrétních metod k účinné vzájemné přeměně (vazbě) optických záření a povrchových plazmonů u nanofotonického systému, tvořeného rozhraním mezi dielektrikem a kovem.*

## 1. ÚVOD

V posledních desetiletích došlo k výrazným pokrokům ve výrobě a výzkumu rozmanitě nanostrukturovaných funkčních materiálů (nanomateriálů), které poskytují nové popudy pro miniaturizaci zařízení v rámci integrované elektroniky, optiky a monolitické technologie. Jde o materiály, jejichž charakteristické strukturální rozměry (rozměry stavebních elementů) dosahují jen několika desítek nanometrů s jemností lepší než deset nanometrů. Vykazují specifické vlastnosti a vedly ke vzniku speciálních moderních výzkumných a aplikačních disciplín, k nimž například patří nanoelektronika, nanooptika včetně nanofotoniky, materiálová nanotechnologie, atd. (viz např. lit. prameny [1-3]).

Tento článek se vztahuje k nanofotonice, tj. k moderní disciplíně, která studuje optické, elektrooptické a optoelektrické jevy z hlediska fotonů a fotonových proudů a jejich kontrolovaného ovládnutí v nanomateriálech (fotonických metamateriálech) a v optických a elektronických nanosystémech. Na rozdíl od běžné fotoniky [4-8] je přihlédnuto k rozměrové redukci struktury materiálů směrem k nano a subnano stupnicím s efektem některých jejich nových význačných optických vlastností. Tyto vlastnosti mohou být studovány například na základě změn vzdáleností energetických hladin v energetických diagramech materiálů vlivem zmíněné rozměrové redukce (kvantových rozměrových efektů) v rámci kvantové nanofotoniky nebo na základě hromadných oscilací volných elektronů v nanomateriálech, které jsou excitovány elektrickou složkou interagujícího vnějšího elektromagnetického záření a tvoří tzv. plazmony v rámci plazmonové nanofotoniky [1-3,9-11].

Obecně lze uvažovat objemové plazmony, tj. prostřednictvím vzájemné elektromagnetické (elektrické) vazby šířící se (rozprostřené) spojitě lineárně polarizované polohové (fázové) volné dipólové oscilace koncentrace (shluků, klustrů) volných elektronů v daném celém objemu nanomateriálu, které jsou na počátku v excitační (zdrojové) oblasti excitovány (vybuzeny) vlivem odpovídající amplitudy okamžité elektrické složky interagujícího (dopadajícího) vnějšího elektromagnetického záření. Přičemž směr těchto oscilací má směr zmíněné elektrické složky. Jejich doba života je velmi krátká ( $\approx 10^{-15}$  s). Jde-li o oscilace jen povrchových volných elektronů, hovoří se o povrchových plazmonech.

Rozvoj nanofotoniky úzce souvisí s nezbytným rozvojem molekulární nanotechnologie (techniky výroby nanomateriálů a nanomateriálových systémů) a dokonalých laserových zdrojů a systémů o říditelných časově a prostorově koherentních tocích a vlnových rozsazích produkovaného excitačního elektromagnetického záření, zvláště optického záření (včetně světla), které efektivně interaguje s nanomateriálem o pečlivě zajištěných a určených vlastnostech.

Zatímco miniaturizace elektronických jevů směrem k nano a subnano stupnicím není podstatně omezena, minimální dimenze nanofotonických prvků a zařízení zpracovávajících optické signály je limitována optickou difrakcí do vlnových hodnot nepřesahujících asi polovinu dominantní vlnové délky interagujícího optického záření v daném materiálu a tudíž odpovídajících několika stovek nanometrů [4,12]. K překonání tohoto omezení slouží mimo jiné jednak použití materiálů optických prvků o velmi velkém absolutním indexu lomu [13], které v přiměřených strukturálních subrozměrech  $\approx 30$  nm bývají bohužel doprovázeny velkými ztrátami optické energie [14], a jednak využití převodu interagujících excitačních fotonů do elektromagnetických módů produkovaných plazmony (plazmonových elektromagnetických módů) o dimenzích vymezených dimenzemi plazmonového vlnovodu a nikoli jen vlnovou délkou interagujícího vnějšího optického (fotonového) pole [15]. Druhý zmíněný přístup je vhodně aplikovatelný na nanosystém obsahující rozhraní dielektrikum-kov [16]. Například při využití povrchových plazmonů k přeměně interagujícího excitačního optického záření v rozhraní dielektrikum-zlato (Au) je podle [13] potřebný minimální rozměr takového vlnovodu omezen jen zvolenou kombinací hloubek průniku těchto plazmonů rozhraním (které jsou v Au asi 0,1 nm) a charakteristického délkového rozsahu jednoho plazmonu, který bývá menší než 5 nm.

Obecně lze konstatovat, že plazmonové přístupy k nanofotonickým prvkům a zařízením je třeba přiměřeně přizpůsobit k jejich strukturám a pracovním funkcím. Po úvodní linearizované matematické reprezentaci (interpretaci) plazmonů a zavedení jejich charakteristických veličin a vztahů jsou v tomto článku popsány dva příklady typických konkrétních nanofotonických metod přeměny optického záření v povrchové plazmony a naopak v nanostrukturu typu rozhraní dielektrikum-kov. Takové v moderní praxi často se vyskytující přeměny patří spolu se šířením, detekcí a přístrojovým využitím plazmonů k fundamentům plazmonové nanofotoniky.

## 2. MATEMATICKÁ REPREZENTACE PLAZMONŮ

Matematická reprezentace plazmonů v nanomateriálu může vyplývat z úvah o translačním pohybu objemové koncentrace (objemové hustoty)  $\rho(\mathbf{r},t)$  volných elektronů o hmotnosti  $m$  a záporném elektrickém náboji  $-e$  na doplňujícím kladném prostorově a časově konstantním homogenním a izotropním pozadí  $\rho_0$ , který je důsledkem aplikovaného vnějšího elektrického pole o intenzitě  $\mathbf{E}(\mathbf{r},t)$  v místě  $\mathbf{r}(x,y,z)$  a v čase  $t$ . Jestliže se dále předpokládá, že tyto elektrony se chovají jako částice nestlačitelné ideální proudící kapaliny o postupné rychlosti  $\mathbf{v}(\mathbf{r},t)$ , pak například podle [2,17]



jejich pohyb splňuje řešení Newtonovy pohybové rovnice v přiměřeném lineárním tvaru

$$m \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -e\mathbf{E} \quad (1)$$

a rovnice kontinuity ve tvaru

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v}) = 0. \quad (2)$$

Přitom symbol

$$\nabla = \mathbf{x}^0 \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{y}^0 \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{z}^0 \frac{\partial}{\partial z} \quad (3)$$

představuje Hamiltonův vektorový diferenciální operátor (nabla operátor) v pravouhlé soustavě souřadnic  $(x,y,z)$  o jednotkových vektorech  $\mathbf{x}^0, \mathbf{y}^0$  a  $\mathbf{z}^0$  a též platí

$$\mathbf{r} = \mathbf{x}^0 x + \mathbf{y}^0 y + \mathbf{z}^0 z. \quad (4)$$

Postuluje-li se dále, že působící elektrické pole  $\mathbf{E}$  způsobuje jen excitaci (vybuzení) odchylky  $\delta\rho$  lokální koncentrace  $\rho$  volných elektronů od její konstantní rovnovážné hodnoty  $\rho_0$  podle lineární relace

$$\delta\rho = \rho - \rho_0, \quad (5)$$

lze v souladu s publikacemi [2,17] pro prostorovou změnu  $\delta\rho$  akceptovat platnost Poissonovy rovnice ve tvarech

$$\nabla \mathbf{E} = -4\pi e(\rho - \rho_0) = -4\pi e\delta\rho. \quad (6)$$

V důsledku setrvačnosti uvažovaných volných elektronů a působící vratné elektrické coulombovské síly do rovnovážného stavu  $\delta\rho = 0$  lze při předpokládaných malých odchylkách (5) a zanedbatelných tlumivých ztrátách v čase předpokládat, že tyto odchylky vykonávají volné netlumené harmonické oscilace ve směru veličiny  $\mathbf{E}$ , tj. reprezentují idealizovaný harmonický objemový plazmon OP. Jeho vlastní úhlovou frekvenci  $\omega_{\text{OP}} = 2\pi f_{\text{OP}}$  lze zjistit na základě výchozí rovnice

$$\frac{\partial \delta\rho}{\partial t} + \rho_0 \nabla \mathbf{v} = 0, \quad (7)$$

kteřá vyplývá z dosazení proměnné veličiny (5) do rovnice (2) a jejíž další časová derivace vede vzhledem ke vztahu (1) k relacím

$$\frac{\partial^2 \delta\rho}{\partial t^2} + \rho_0 \nabla \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = \frac{\partial^2 \delta\rho}{\partial t^2} - \rho_0 \nabla \frac{e\mathbf{E}}{m} = 0. \quad (8)$$

Následná substituce rovnice (6) do poslední relace (8) umožňuje napsat přiměřenou pohybovou rovnici jednoho objemového plazmonu ve tvaru

$$\frac{\partial^2 \delta\rho}{\partial t^2} + \frac{4\pi e^2 \rho_0}{m} \delta\rho = 0, \quad (9)$$

kteřá je analogií pohybové rovnice pro volné netlumené oscilace harmonického oscilátoru (viz např. [18]) a z níž plyne hledaná úhlová frekvence jednotlivých objemových plazmonů:

$$\omega_{\text{OP}} = \left( \frac{4\pi e^2 \rho_0}{m} \right)^{1/2}. \quad (10)$$

Uvedený linearizovaný postup a prezentované rovnice lze v podstatě aplikovat i na povrchové plazmony nahrazením objemových koncentrací volných elektronů plošnými nebo délkovými koncentracemi jen povrchových volných elektronů. Tyto plazmony tvoří dominantní základ následujících úvah. Byly důkladně posouzeny v publikaci [16]. Účelné je, že vedle rovnic typů (9) a (10) lze

k jejich charakterizování využít přiměřených disperzních vztahů, hloubek průniku a délkového rozsahu nebo doby života.

Disperzní vztahy pro jednotlivé povrchové plazmony ve studovaném rozhraní  $(x,y)$  nemagnetického dielektrika ( $j=2$ ) o reálné relativní elektrické permitivitě  $\epsilon_2$  a prostorově omezeného kovu ( $j=1$ ) o komplexní relativní elektrické permitivitě

$$\epsilon_1 = \epsilon_1' + i\epsilon_1'' \quad (11)$$

mají podle [16] pro schematický modelový náčrt na obr. 1 obecné tvary

$$k_{z_j} = k_{z_j}' + ik_{z_j}'' = \left[ \left( \frac{\omega}{c} \right)^2 \epsilon_j - k_x^2 \right]^{1/2}. \quad (12)$$

Vystihují úhlové vlnočty  $k_{z_j}$  diskutovaných povrchových plazmonů v jednotlivých uvažovaných prostředích ( $j=1,2$ ) pro směr  $z$  kolmý k rozhraní  $(x,y)$  v závislosti na komplexním úhlovém vlnočtu

$$k_x = k_x' + ik_x'' = \frac{\omega}{c} \left( \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2} \right)^{1/2}, \quad (13)$$

kteřý přísluší zvolenému směru  $x$  rozložení povrchových plazmonů excitovaných odpovídající složkou  $E_x$  elektrického pole  $\mathbf{E}$ . Přičemž písmeno  $i$  v relacích (11) až (13) označuje imaginární jednotku a  $\omega = 2\pi c/\lambda$  je reálná úhlová frekvence předpokládaného monofrekvenčního interagujícího elektromagnetického záření o skutečné vlnové délce  $\lambda = \lambda_0/n_2$  pro dané dielektrikum o absolutním indexu lomu  $n_2 = \epsilon_2^{1/2}$ ;  $c$  je skutečná fázová rychlost tohoto záření v daném dielektriku a  $\lambda_0 = 2\pi c_0/\lambda$  reprezentuje spektroskopickou ( $k$  vakuu nebo přibližně ke vzduchu vztáženou) vlnovou délku tohoto záření o postupné rychlosti  $c_0$ . Výrazy

$$\kappa = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \epsilon_2^{1/2} = \frac{\omega}{c_0} \epsilon_2^{1/2} \quad (14)$$

vystihující odpovídající disperzní vztah pro zmíněné záření o úhlovém vlnočtu  $\kappa$  ve zmíněném dielektriku. Dosazení výrazu (11) do relace (13) pak umožňuje vystihnout reálnou a imaginární složku veličiny  $k_x$  tvary

$$k_x' = \frac{\omega}{c} \left( \frac{\epsilon_1' \epsilon_2}{\epsilon_1' + \epsilon_2} \right)^{1/2}, \quad (15)$$

$$k_x'' = \frac{\omega}{c} \left( \frac{\epsilon_1' \epsilon_2}{\epsilon_1' + \epsilon_2} \right)^{1/2} \frac{\epsilon_1''}{2\epsilon_1'^2}, \quad (16)$$

Protože

$$\left( \frac{\omega}{c} \right)^2 |\epsilon_j| - |k_x|^2 < 1, \quad (17)$$

lze obě veličiny  $k_{z_1}$  a  $k_{z_2}$  vztahů (12) pokládat za čistě imaginární, tj.  $k_{z_j}' = 0$  [16]. To znamená, že sledované vlnové pole pro povrchové plazmony je evanescentní (prostorově tlumené). Odpovídající jeho prostorová redukce ve směru  $z$  kolmém k rozhraní  $(x,y)$  je tudíž přímo úměrné klesající exponenciální funkci typu  $\exp\left(-|k_{z_j}''||z|\right)$  a může tedy být charakterizovaná kladnými vzdálenostmi  $z_j$ , v nichž tato funkce v každém ze dvou prostředí ( $j=1,2$ ) klesne na hodnotu  $1/e$ . Tyto vzdálenosti, tvořící hloubky průniku povrchových plazmonů vzhledem k rozhraní  $z=0$ , vyhovují podle [16] relacím

$$z_1 = \frac{\lambda}{2\pi} \left( \frac{\epsilon_1' + \epsilon_2}{\epsilon_1'^2} \right)^{1/2}, \quad (18)$$

$$z_2 = \frac{\lambda}{2\pi} \left( \frac{\epsilon'_1 + \epsilon_2}{\epsilon_2^2} \right)^{1/2}. \quad (19)$$

Délkový rozsah (délka rozšíření) elektromagneticky vázaných povrchových plazmonů pro kladný směr  $x$  hladkého rozhraní  $(x,y)$  modelu na obr. 1 lze zavést předpokladem, že jejich intenzita, přímo úměrná klesající exponenciální funkci typu  $\exp(-2k_x''x)$ , je zredukována podílem  $1/e$ . Splňuje tedy vztah

$$l \triangleq l_j = \frac{1}{2k_x''}. \quad (20)$$

Přičemž v publikaci [16] se uvádí, že v případě stříbra Ag pro  $\lambda = 514,5$  nm lze dojít k délce  $l = 22$   $\mu\text{m}$  a při  $\lambda = 1,06$  nm až k hodnotě  $l = 500$   $\mu\text{m}$ .

Doba života povrchových plazmonů, která souvisí s veličinou (20), může být určena vztahem

$$\tau \triangleq \tau_j = \frac{l}{v_{pp}}, \quad (21)$$

kde  $v_{pp}$  je grupová rychlost jednoho povrchového plazmonu PP, tj. postupná rychlost šíření jeho extrému v uvažovaném směru  $x$ . Za předpokladu, že reálná úhlová frekvence  $\omega$  je nahrazena komplexní úhlovou frekvencí typu

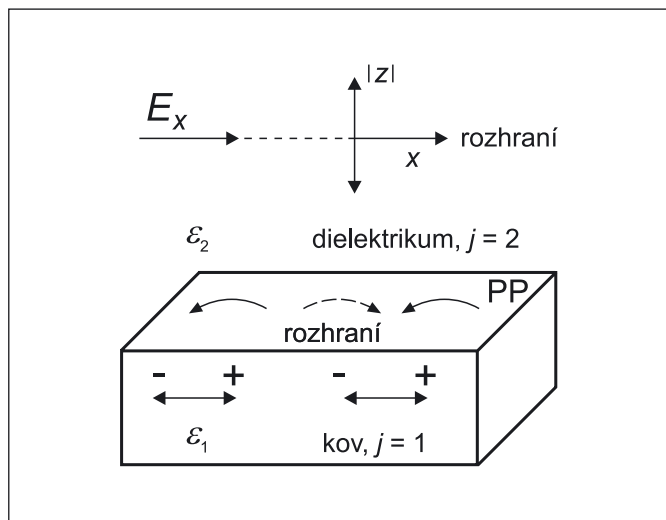
$$\Omega = \omega' + i\omega'', \quad (22)$$

lze podle [16] zavést obdobu veličiny  $\tau$  relací

$$\tau = \frac{2\pi}{\omega''}, \quad (23)$$

Přitom postupným využitím vztahů  $\omega'' = ck_x''$ , (16) a (15) lze psát

$$\omega'' = ck_x' \frac{\epsilon_1''}{2\epsilon_1'^2}. \quad (24)$$



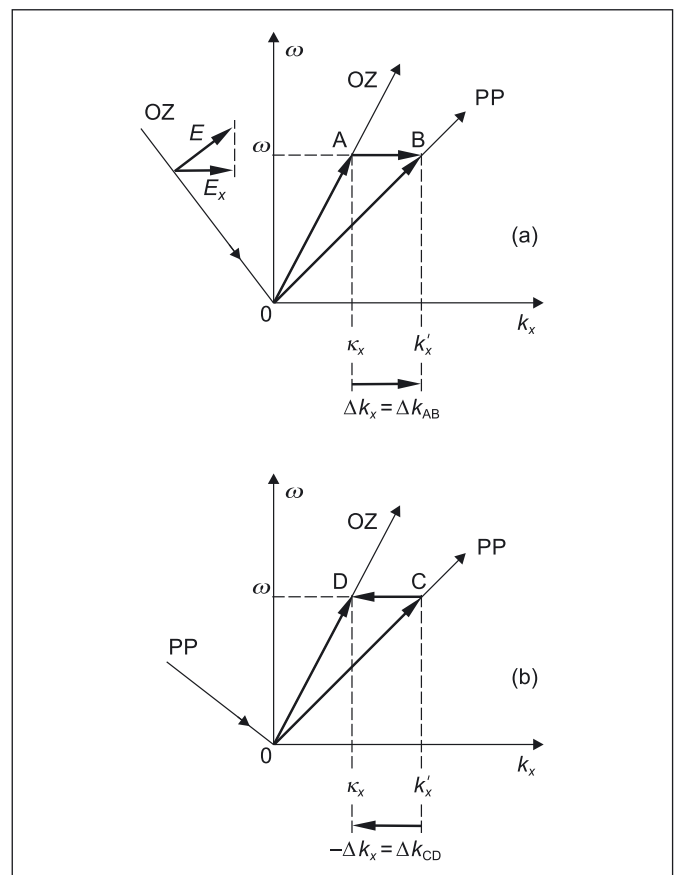
Obr. 1 Modelový náčrt části nanofotonického systému se dvěma jednorozměrnými dipólovými rozloženími povrchových plazmonů PP podél směru  $x$  rozhraní dielektrika a prostorově omezené kovové vrstvy. Počáteční krajní polohy složkou  $E_x$  elektrického pole  $E$  vnějšího interagujícího elektromagnetického záření excitovaných volných elektronových shluků v kovu jsou vyznačeny zápornými znaménky, jimi vyprázdňena (původní) místa jsou označena kladnými znaménky. Směry následných volných dipólových oscilací (posuvů) zmíněných shluků udávají vodorovné obousměrné šipky. Elektrická pole, doprovázející povrchové plazmony, jsou znázorněna orientovanými zakřivenými elektrickými indukčními čarami (čárkovaná indukční čára přísluší elektromagnetické vazbě mezi sousedními plazmony). Orientace zmíněných indukčních čar se změní v opačnou po každé půlperiodě volných plazmonových oscilací

Protože uvažované povrchové plazmony jsou sdruženy jak s interagujícím vnějším elektromagnetickým zářením, tak i s pohybem volných elektronů, bývá skutečné jejich zeslabení (tj. hodnoty  $l$  a  $\tau$ ) ještě ovlivněno hlavně tlumením tohoto záření vlivem jeho rozptylu, rozptylem elektronů vedoucím k ohmickým ztrátám a též tlumením vyplývajícím z kvality rozhraní [19]. Pro miniaturizaci nanofotonických systémů s povrchovými plazmony je důležité přihlídnout ke způsobu jejich vzniku vlivem optického záření, k minimalizaci ztrát jejich přenosem a též ke způsobu jejich zpětné přeměny v optické záření. Vzájemné přeměny povrchových plazmonů a optických záření v rozhraní dielektrika a kovu jsou obsahem následujících úvah.

### 3. PŘÍKLADY NANOFOTONICKÝCH METOD VZÁJEMNÝCH PŘEMĚN OPTICKÝCH ZÁŘENÍ A PVRCHOVÝCH PLAZMONŮ V ROZHŘANÍ DIELEKTRIKA A KOVU

Pro nanofotoniku, která obecně studuje optické prvky a optické signálové procesy v domněle nanometrických stupnic k dosažení jejich miniaturizace, je v rámci působení diskutovaných povrchových plazmonů hlavním cílem vystihnout odpovídající procesy, lišící se od přístupu klasické fotoniky. Jak již bylo konstatováno, fundamentální je přeměna (konverze) optického záření na povrchové plazmony a jejich zpětná přeměna na optické záření v rozhraní dielektrikum-kov.

Vektorové nákrasy principu vzájemné přeměny optického záření OZ a povrchového plazmonu PP v modelovém nanofotonickém uspořádání podle obr. 1 jsou v přiměřeně pravoúhlé souřadné soustavě  $(k_x, \omega)$  uvedeny na obr. 2. Tyto přeměny, vyplývají z odlišnosti reálného disperzního vztahu typu (14) pro toto záření a reálného disperzního vztahu typu (15) pro plazmon, lze názorně vystihnout pomocí odpovídajících složkových změn  $\Delta k_x$ . Dopadající optické záření na rozhraní  $(x,y)$  základního vlnovodového uspořádání podle obr. 1, jehož reálný úhlový vlnovek je  $\kappa$  a reálná úhlová frekvence je  $\omega$ , vyžaduje kladný příspěvek



Obr. 2 Vektorové nákrasy principu přeměny optického záření OZ na povrchový plazmon PP (a) a zpět (b) pro směr  $x$  v rozhraní dielektrikum – kov nanofotonického systému podle obr. 1

$$\Delta k_x = \Delta k_{AB} = k'_x - \kappa_x \quad (25)$$

k jeho přeměně na povrchový plazmon o reálném úhlovém vlnočtu  $k_x = k'_x$ . Obráceně změně povrchového plazmonu v optické záření přísluší ztráta (záporný příspěvek)

$$-\Delta k_x = \Delta k_{CD} = \kappa_x - k'_x \quad (26)$$

Přitom k dosažení těchto přeměn (vazeb) může účinně konkrétně sloužit například metoda (technika) mřížkové nebo hranolové vazby [2,16].

Metoda mřížkové vazby přísluší nanofotonickému uspořádání podle obr. 1, kde dielektrikum o reálné relativní permivitě  $\epsilon_2$  má tvar rovnoměrné pravouhlé mřížky o kladné mřížkové konstantě (prostorové nanopériodě)  $a$ . Vlnový vektor interagujícího optického záření OZ o velikosti  $\omega/c$ , působícího v rozhraní  $(x,y)$  dielektrické mřížky a kovu pod úhlem dopadu  $\Theta$  vzhledem ke směru  $z$  kolmice k rozhraní, lze rozdělit na složku  $(\omega/c)_z$  kolmou k rozhraní a na složku  $(\omega/c)_x$  podél rozhraní podle vektorového nákresu na obr. 3. Příslušné velikosti složkového vlnového vektoru pro vzniklý povrchový plazmon PP splňují relaci typu

$$k_x = \frac{\omega}{c} \sin \Theta \pm v g, \quad (27)$$

kde  $v$  je kladné celé číslo ( $v = 1, 2, \dots$ ) a

$$g = \frac{2\pi}{a} \quad (28)$$

je úhlové vyjádření převrácené hodnoty  $1/a$  mřížkové konstanty  $a$  (velikosti reciprokého mřížkového vektoru). Účinné vazby (párování) mezi optickým zářením a povrchovým plazmonem je dosaženo při splnění nezbytné podmínky

$$k_x = k'_x = \frac{\omega}{c} \sin \Theta_0 \pm \Delta k_x = \frac{\omega}{c} \left( \frac{\epsilon'_1 \epsilon_2}{\epsilon'_1 + \epsilon_2} \right)^{1/2} = k_{pp}, \quad (29)$$

kde  $\epsilon'_1$  je reálná složka komplexní relativní permivity (11) kovové podložky nanosystému podle obr. 1 a je aplikován tvar (15). To znamená, že musí existovat takový optimální účinný úhel dopadu  $\Theta = \Theta_0$  interagujícího optického záření, při němž součet nebo rozdíl odpovídající složky

$$\kappa_x = \left( \frac{\omega}{c} \right)_x = \frac{\omega}{c} \sin \Theta = \frac{\omega}{c} \sin \Theta_0 \quad (30)$$

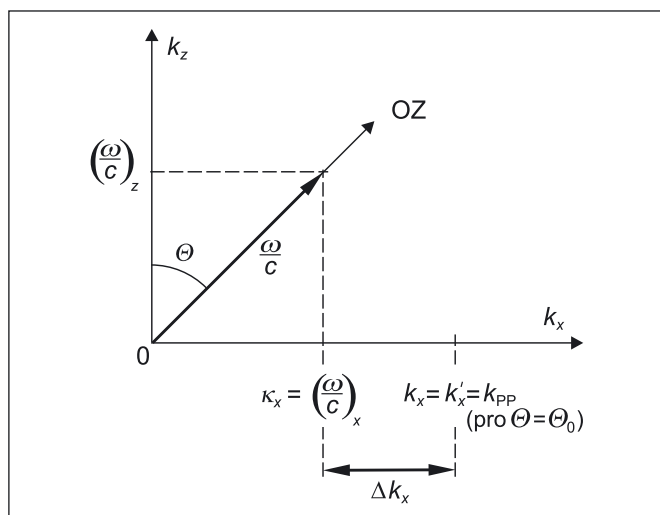
pro úhlový vlnočet  $\omega/c$  optického záření a celistvého násobku

$$\Delta k_x = v g \quad (31)$$

veličiny (28) jsou rovny hodnotě  $k'_x = k_{pp}$  plazmonového vlnového vektoru, dané relací (15). Přitom přídavek typu (25) k hodnotě (30) pro optické záření produkuje povrchový plazmon, kdežto ztráta typu (26) hodnoty (15) pro povrchový plazmon vede k jeho zpětné přeměně v optické záření.

Při metodě hranolové vazby, kdy nanofotonické uspořádání je tvořeno kovovou vrstvou tloušťky  $d$  o reálné složce  $\epsilon'_1$  komplexní relativní permivity (11) v obložení (sendviči) polokulového (hemisférického) dielektrického hranolu o reálné relativní permivitě  $\epsilon_2$  a dielektrika o reálné relativní permivitě  $\epsilon_3$  podle obr. 4, hodnota  $\omega/c = (\omega/c_0) \epsilon_2^{1/2}$  vlnového vektoru optického záření OZ, dopadajícího z vakua (vzduchu) na rozhraní hranol-kov pod úhlem dopadu  $\Theta$  vzhledem ke kolmici  $z$  k rozhraní, se změní na hodnotu

$$\kappa_x = \left( \frac{\omega}{c_0} \epsilon_2^{1/2} \right)_x = \frac{\omega}{c_0} \epsilon_2^{1/2} \sin \Theta \quad (32)$$

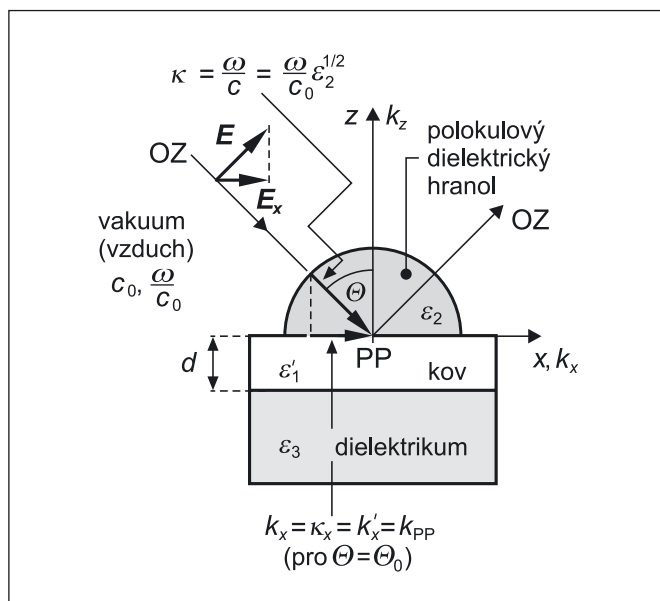


Obr. 3 Vektorový nákres k vysvětlení metody mřížkové vazby pro účinnou přeměnu optického záření OZ v povrchový plazmon PP a zpět v rozhraní dielektrická mřížka – kov

pro směr  $x$  rovnoběžný s rozhraním. Přitom účinné vazby (párování) mezi tímto zářením a povrchovým plazmonem PP se dosáhne při splnění rovnosti vztahů (32) a (15) pro  $\Theta = \Theta_0$ :

$$k_x = \kappa_x = k'_x = \frac{\omega}{c_0} \epsilon_2^{1/2} \sin \Theta_0 = \frac{\omega}{c} \left( \frac{\epsilon'_1 \epsilon_2}{\epsilon'_1 + \epsilon_2} \right)^{1/2} = k_{pp}. \quad (33)$$

Dále lze konstatovat, že pro určité konečné hodnoty tloušťky  $d$  kovové vrstvy existuje pravděpodobnost, že plazmonové evanescenční pole pro rozhraní  $\epsilon_2 / \epsilon'_1$  se zdvojnásobí do spodního rozhraní  $\epsilon'_1 / \epsilon_3$  [16].



Obr. 4 Strukturální a vektorový nákres k vysvětlení metody hranolové vazby pro účinné párování optického záření OZ a povrchového plazmonu PP v rozhraní polokulový dielektrický hranol – kov

#### 4. ZÁVĚR

V článku je ukázán možný linearizovaný způsob odvození pohybové rovnice a vzorce pro úhlovou frekvenci plazmonů, tj. hromadných oscilací volných elektronů v nanomateriálové struktuře vlivem excitační elektrické složky interagujícího vnějšího elektromagnetického (optického) záření, na základě Newtonovy



pohybové rovnice volného elektronu a rovnice kontinuity pro koncentraci volných elektronů. Dále jsou prezentovány veličiny charakteristické pro speciálně uvažované povrchové plazmony (oscilace povrchových volných elektronů) v rozhraní dielektrikum-kov, reprezentované jejich disperzními vztahy, hloubkami průniku a délkovým rozsahem nebo dobou života. Na základě schematických modelových náčrtů zmíněného nanostrukturovaného rozhraní a na podkladě vhodných vektorových diagramů pro úhlové vlnočty je nejdříve uveden obecný princip možných vzájemných přeměn (vazeb) optického záření a povrchového plazmonu, vyplývající z odlišnosti jejich disperzních vztahů, a potom jsou popsány dvě užitečné konkrétní metody pro účinnou realizaci těchto přeměn. Jedná se o metodu mřížkové vazby a o metodu hranolové vazby.

Článek vznikl v rámci spolupráce na řešení Výzkumného záměru FZÚ AV ČR číslo AVOZ 10100522.

#### Literatura

- [1] Guozhong C., *Nanostructures and Nanomaterials*. World-Scientific Publ., London 2004.
- [2] De Los Santos H. J., *Principles and Applications of Nano-MEMS Physics*. Springer – Verlag, Dordrecht 2005.
- [3] Busch K., Powell A., Röthig C., Schön G., Weissmüller J. (Eds.), *CFN Lectures on Functional Nanostructures*, Vol. 1. Springer – Verlag, Berlin 2005.
- [4] Saleh B. E. A., Teich M.C., *Fundamentals of Photonics*. J. Wiley and Sons Inc., New York 1991.
- [5] Gibs H. M., Khitrova G., Peryghambarian N., *Nonlinear Photonics*. Springer – Verlag, Ijmuiden 1990.
- [6] Gupta M. C. (Ed.), *Handbook of Photonics*. CRC Press, New York 1997.
- [7] Pospíšil J., *Základy fotonové optiky I – Vlastnosti fotonů a fotonového proudu*. Vyd. UP, Olomouc 1999.
- [8] Pospíšil J., *Základy fotonové optiky II – Emise a absorpce fotonů*. Vyd. UP, Olomouc 1999.
- [9] Kerker M., *The Scattering of Light and other Electromagnetic Radiation*. Academic Press, New York 1969.
- [10] Bohren C. F., Huffman D. R., *Adsorption and Scattering of Light by Small Particles*. J. Wiley and Sons. Inc., New York 1983.
- [11] Kreibeg U., Vollmer M., *Optical Properties of Metal Clusters*, Vol. 25. Springer – Verlag, Berlin 1995.
- [12] Maier S. A., Kik P.G., Sweathock L.A. et al., Energy transport in metal nanoparticle plasmon waveguides. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. 777, 2003, pp. T7.1.1-T7.1.12.
- [13] Dickson R.M., Lyon L.A., Unidirectional plasmon propagation in metallic nanowires. *J. Phys. Chem. B*, 104, 2000, pp. 6095-6098.
- [14] Takahara J., Yamagishi S., Taki H. et al., Guiding of a one-dimensional optical beam with nanometer diameter. *Optics Lett.*, Vol. 22, 1997, No. 7, pp. 475-477.
- [15] Lamprecht B., Krenn J. R., Schider G. et al., Surface plasmon propagation in microscale metal stripes. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 79, 2001, No. 1, pp. 51-53.
- [16] Raether H., *Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings*. Springer – Verlag, New York 1988.
- [17] Rodriguez S., *Electron Theory of Solids*. Lectures on Solids, Dept. of Physics, Pardue Univ. 1987-1988.
- [18] Pospíšil J., *Mechanické a elektromagnetické kmity a vlny*. Vyd. UP, Olomouc 1991.
- [19] Klar T., Perner M., Grosse S. et al., Surface-plasmon resonances in single metallic nanoparticles. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 80, 1998, No. 19.

Prof. RNDr. Ing. Jaroslav Pospíšil, DrSc., RNDr. Jan Hrdý, PhD, a Jan Hrdý, jr., katedra experimentální fyziky PřF Univerzity Palackého a Společná laboratoř optiky Univerzity Palackého a FZÚ AV ČR, Tř. 17. listopadu 50a, 772 09 Olomouc. Tel.: 585 634 283, E-mail: pospis@prfnw.upol.cz

## Technická fakulta České zemědělské univerzity v Praze pořádá významnou mezinárodní konferenci

### TAE 2007 (Trends in Agricultural Engineering)

ve dnech 12. – 14. září 2007 v prostorách Technické fakulty v Praze 6 – Suchbátka. Letošní konference navazuje na tradici dvou úspěšných předchozích konferencí TAE 1992 a TAE 1999. Jednací jazykem bude angličtina a z konference bude vydán sborník příspěvků rovněž v anglickém jazyce. Veškeré informace včetně způsobu přihlášení, vloženého a zpracování příspěvků jsou na internetové adrese: <http://tea2007.tf.czu.cz/>

#### Conference Topics:

- Precision Farming
- Renewable Energy Sources
- Fuels for the Future
- Physical Methods in Agriculture
- Materials and Manufacturing Technologies for Agriculture
- Information and Controlling Technology

#### Invited papers:

- Naoki Sakurai (Japan): Non-destructive and Destructive Methods for Quality Evaluation of Soft Agricultural Products by Acoustic Vibration
- Richard Godwin (United Kingdom): Recent Advantages in Precision Farming - Sensors and Traceability
- Dmitry S. Strebkov (Russia): Renewable Energy Technologies for Rural Areas
- Jozef Horabik, Krystyna Konstankiewicz (Poland): Physical methods in assessment of quality of agromaterials
- Osman Yaldiz (Turkey): From Agricultural Waste Management to Energy Production; Circular Economy and CO<sub>2</sub> Trading in Agriculture

*doc. Ing. Martin Libra, CSc.  
Technická fakulta ČZU v Praze*

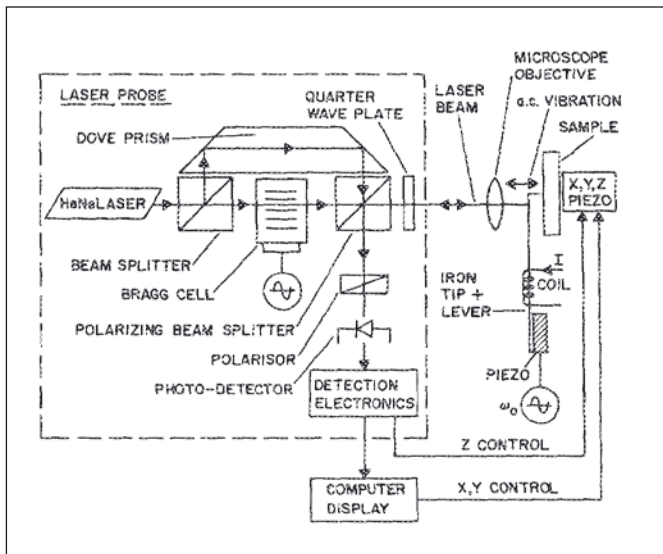
# Mikroskopie magnetických sil

Mikroskopie založené na sondě skenující povrch (SPM) zaznamenaly v průběhu posledních dvaceti let masivní rozvoj. Jednotlivé techniky jako skenující tunelovací mikroskopie (STM), mikroskopie atomárních sil (AFM), mikroskopie magnetických sil (MFM) a další pouze potvrdily svou jedinečnost v rámci dosahovaných rozlišení na atomové úrovni. A právě mikroskopie magnetických sil představuje jednu z nejelegantnějších metod studia magnetických vlastností povrchů při vysokém rozlišení a nenáročném přípravě vzorku.

**Klíčová slova:** magnetické materiály; mikroskopie magnetických sil; nanostruktury

## 1. ÚVOD

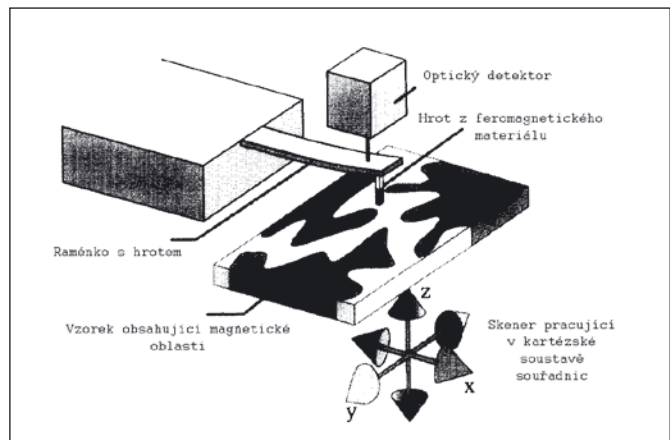
V roce 1986 byla navržena technika spojující STM a profilmetrii, kterou autoři G. Binnig, C. F. Quate a Ch. Gerber [1] nazvali mikroskopii atomárních sil (AFM), a při které bylo dosaženo laterálního rozlišení 3 nm a vertikálního rozlišení méně než 1 nm. O rok později se do popředí zájmu dostává metodika, při které se k dosažení obrazu využívá magnetické síly vzniklé interakcí mezi zmagnetovaným povrchem vzorku a zmagnetovaným hrotem [2], později nazývaná jako mikroskopie magnetických sil - Magnetic Force Microscopy (MFM).



Obr. 1 Experimentální uspořádání měřicího zařízení MFM použitého pro mapování magnetických interakcí dle [2]

Do té doby bylo předloženo pouze několik alternativ studia magnetických vlastností povrchů vzorků. Přehledné uspořádání technik založených na magnetických interakcích je možno nalézt např. v [24]. Zmíňme optické techniky založené na Kerrově efektu [3], při kterých však dosahované prostorové rozlišení nepřesáhlo 0,5  $\mu\text{m}$ , nebo přístup založený na využití elektronového svazku v tzv. Lorentzovské mikroskopii [4]. Atomové rozlišení však dosaženo nebylo.

Princip, kterého MFM využívá, je odvozený od metody AFM, kdy lze říct, že MFM je AFM se sondou v podobě magnetického hrotu. S ohledem na dlouhodobé působení magnetických sil, vyvolaných vzorkem na zmagnetovaný hrot, jde o měření, které probíhá v nekontaktním režimu. Princip měření je patrný z obr. 2.



Obr. 2 Princip MFM - Pružné raménko s hrotem registruje změny stavu raménka v závislosti na interakci mezi magnetickým polem vzorku a hrotem z feromagnetického materiálu

Raménko zakončené ostrým magnetickým hrotem je senzorem působící síly. Jakmile je sonda v dostatečné vzdálenosti od povrchu vzorku, obvykle jde o desítky až stovky nanometrů, vlivem magnetických interakcí mezi hrotem a vzorkem dochází ke změnám polohy raménka, které bývají většinou detekovány optickou cestou. Výsledný obraz magnetického pole vzniká skenováním sondy nad povrchem vzorku. Rozměry skenované oblasti se pohybují od 1 - 200  $\mu\text{m}$ .

## 2. TEORIE MFM

MFM využívá dvou základních detekčních režimů, každý pro specifický typ magnetických interakcí:

- statický režim (DC),
- dynamický režim (AC).

### 2.1 Statický režim

V tomto režimu raménko přenáší působení magnetické síly mezi vzorkem a hrotem jako výchylku, která pak může být detekčním zařízením měřena. Za výsledný obraz bude přímo zodpovědná síla vychylující raménko.

### 2.2 Dynamický režim

Tento režim udržuje raménko blízko své rezonanční frekvence. Raménko lze chápat jako harmonický oscilátor, pro jehož rezonanční frekvenci můžeme psát

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{\text{ef}}}{m}}, \quad (1)$$

kde  $m$  vyjadřuje efektivní hmotnost hrotu a raménka a  $k_{ef}$  chápeme jako efektivní konstantu pružnosti materiálu. Efektivní konstanta pružnosti je tvořena dvěma příspěvky

$$k_{ef} = k - \frac{\partial F}{\partial z}, \quad (2)$$

kde  $k$  je konstanta pružnosti raménka. Přiblížíme-li hrot blíže k povrchu vzorku, magnetické síly působící na hrot se vlivem změny vzdálenosti budou také měnit, což dokumentuje člen  $\partial F/\partial z$ . Toto silové působení hrotu můžeme chápat jako přídavnou konstantu pružnosti raménka, ale v případě velkých výchylek raménka způsobí neharmoničnost oscilací. V případě malých výchylek se tento příspěvek nebude měnit a model harmonického oscilátoru může být zachován

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k - \frac{\partial F}{\partial z}}{m}}. \quad (3)$$

Můžeme si tedy ukázat, že  $\partial F/\partial z$  změní rezonanční frekvenci raménka na

$$f = f_0 \sqrt{1 - \frac{\frac{\partial F}{\partial z}}{k}}, \quad (4)$$

kde  $f_0$  je volná rezonanční frekvence raménka v případě, že nedochází k žádné interakci mezi hrotem a vzorkem.

Existují dva způsoby měření změny rezonanční frekvence raménka:

(i) **Měření amplitudy** – raménko osciluje s předem nastavenou frekvencí (bývá větší než volná rezonanční frekvence). Změna rezonanční frekvence vede ke změně oscilační výchylky raménka a následné detekci signálu. Raménka, u nichž dochází k pomalému tlumení oscilací, pro tato měření nejsou vhodná.

(ii) **Měření rezonanční frekvence** – oscilace raménka probíhají přesně na rezonanční frekvenci  $f$  pomocí amplitudového zesilovače zpětné vazby. Změny v rezonanční frekvenci jsou detekovány přímo FM demodulátorem. Bohužel i v tomto případě může být interpretace dat zavádějící.

### 2.3 Magnetická interakce

Jak již bylo naznačeno výše, MFM zobrazuje změny magnetické síly ve vzorcích z magnetických materiálů. Důležitou úlohu zde hraje vzdálenost mezi magnetickou sondou a vzorkem. Využijeme opět jistou podobnost s AFM, a to v případě, že se hrot dostane do oblastí (vzdáleností) působení krátkodosahových sil. Magnetické síly se zde již neuplatní v takové míře a ve výsledném obraze bude převládat topografie vzorku - analogie nekontaktní AFM.

Budeme-li však pracovat ve vzdálenostech připadajících dalekodosahovému působení sil, začne působit efekt magnetické síly a výsledný obraz bude obrazem magnetického pole.

Přiblížením zmagnetizovaného hrotu do vnějšího magnetického pole vzorku vzniká magnetický potenciál  $E$ :

$$E = -\mu_0 \int_V \mathbf{M}_h \cdot \mathbf{H}_{vz} dV_h. \quad (5)$$

MFM detekuje magnetickou sílu nebo gradient magnetické síly zprostředkávající magnetické interakce mezi hrotem a vzorkem. Působící síla může být vyjádřena

$$\mathbf{F} = -\nabla E = \mu_0 \int_V \nabla (\mathbf{M}_h \cdot \mathbf{H}_{vz}) dV_h, \quad (6)$$

kde integrujeme přes celý objem hrotu,  $\mathbf{M}_h$  je magnetizace hrotu a  $\mathbf{H}_{vz}$  je intenzita magnetického pole vzorku. V poslední době bylo také věnováno mnoho úsilí kvantitativním teoretickým výpočtům týkajícím se kontrastního mechanismu měnění se magnetického

pole v závislosti na tvaru hrotu [5, 6], velikosti povlaku hrotu a magnetické interakci hrot - vzorek [7]. V rámci co největšího zjednodušení teoretických výpočtů se zavádějí nejrůznější aproximace, např. dipólová [8] a modely [9] pro hroty užívané v MFM. Jsou navrhovány počítačové analýzy obrazů vytvořených v MFM pro jednotlivé feromagnetické nanočástice [10]. Porovnávají se dosahované MFM signály jednotlivých nanočástic železa s koloidními clustery a hledají se kvantitativní závislosti mezi jejich obrazy (samostatné nanočástice vykazují zřetelnější signál oproti clusterům) [11].

### 2.4 Reciprocita v mikroskopii magnetické síly

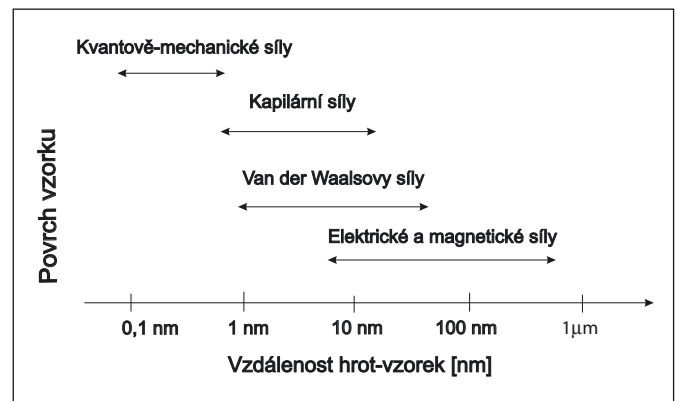
Má-li hrot komplikovanější tvar a složitou magnetickou strukturu, Wright a Hill [12] přišli s myšlenkou teoretický výpočet převést na výpočet magnetické síly, působící na povrch vzorku místo na hrot, tzv. reciprocitu. Podle Newtonova zákona akce a reakce síla působící na vzorek musí být stejně velká jako síla působící na hrot, ovšem v opačném směru. Výsledná síla je vyjádřena

$$\mathbf{F} = \mu_0 \int_V \nabla (\mathbf{M}_{vz} \cdot \mathbf{H}_h) dV_{vz}, \quad (7)$$

kde integrujeme přes celý objem vzorku. Výhoda takového přístupu spočívá v tom, že plocha vzorku přes který provádíme integraci, je vymezena pouze oblastmi, kde prochází magnetické pole hrotu. Z rovnice (7) také plyne, že na hrot, který nemá žádné rozptylové pole, nepůsobí žádná magnetická síla. Nutno však také hned dodat, že hrot z magneticky měkkého materiálu je při měření okamžitě polarizován vzorkem a vzniká gradient magnetického pole. Nevýhodu autoři vidí v zeslabení signálu MFM hrotu.

### 2.5 Nemagnetické interakce

Síly působící mezi hrotem a vzorkem však nejsou pouze magnetické povahy. Mívají i odlišný původ, který do sebe zahrnuje elektrostatické interakce, van der Waalsovy interakce, krátkodosahové i kapilární síly. Během MFM měření se vzdálenost hrotu a vzorku mění řádově mezi desítkami až stovkami nanometrů, což je rozmezí, ve kterém hrají nejdůležitější roli již zmiňované síly magnetické, dále pak elektrostatické, van der Waalsovy, kapilární i kvantově-mechanické (viz obr. 3).



Obr. 3 Oblasti působení jednotlivých sil

#### • Elektrostatické síly

Tyto síly se podobně jako síly magnetické nejvíce uplatňují ve vzdálenostech přesahujících 10 nm (tzv. dalekodosahové síly). Detekce elektrostatických sil se provádí v kontaktním [13] nebo nekontaktním režimu [14]. První zmiňovaná metoda spočívá v přiblížení hrotu k povrchu nevodivého vzorku do vzdálenosti působení přitažlivých van der Waalsových sil, které zprostředkují kontakt hrotu a vzorku. Vzájemným třením se indukuje povrchový náboj. Po oddálení hrotu se měří gradient elektrostatického pole. Výsledná obrazová kontura je pik v místě výskytu náboje. V druhém případě je vzorek umístěn na elektrodu, která je spojena se zdrojem napětí



(bias voltage). Hrot je napojen na vysokonapěťový pulsní generátor (25 ms, 100 V), který na povrchu vzorku vytvoří oblasti s kladným nebo záporným povrchovým nábojem. Regulací zdroje napětí lze monitorovat oblasti s povrchovým nábojem nebo bez něj.

Elektrostatická síla se dá vyjádřit jako

$$F_{el} = \frac{\partial C}{\partial z} U_{hv}^2, \quad (8)$$

kde  $C$  je elektrická kapacita mezi hrotem a elektrodou a  $U_{hv}$  je přivedené napětí.

#### • Van der Waalovy síly

Vliv van der Waalových sil bývá nejmarkantnější v rozmezích jednotek až desítek nanometrů. Jde o typ elektromagnetických dipól-dipólových interakcí probíhajících mezi atomy. Její původ úzce souvisí s tzv. Lennard-Jonesovou silou (potenciálem). Tento potenciál tvoří ve své podstatě dvě interakce: přitažlivá van der Waalova síla a odpuzivá Pauliho síla. Odpuzivá část Lennard-Jonesova potenciálu v sobě zahrnuje Pauliho vylučovací princip, způsobený překrytím vlnových funkcí elektronů dvou interagujících atomů [15]. Van der Waalovy síly velice silně závisí na tvaru interagujících součástí. Např. integrací přes všechny dipóly sférického hrotu s poloměrem  $R$  a při vzdálenosti mezi hrotem a vzorkem  $z_0$  dostáváme vztah pro působící van der Waalovu sílu

$$F_{vdw} = \frac{AR}{6z_0^2}. \quad (9)$$

$A$  je Hamakerova konstanta, jejíž hodnota silně závisí na použitém materiálu a pohybuje se v řádu  $10^{-19}$  J.

#### • Kapilární síly

Za normálních podmínek je každý vzorek pokryt tenkou několika-nanometrovou vrstvičkou. Většinou to bývá voda a další příměsi. Takovýto tenký film bude při měření v interakci s hrotem ovlivňován přitažlivou silou van der Waalovy interakce (vzdálenost 2 nm). Jakmile hrot protne tuto vrstvičku, objeví se charakteristický kapilární meniscus. Vznikají silně přitažlivé kapilární síly, které hrot táhnou směrem k povrchu vzorku. Dle [16] je vhodné opatřit hrot hydrofóbní vrstvičkou např. (poly-dimethylsiloxan PDMS). Docílí se toho např. prostým přeskenováním křemíkové destičky s PDMS. Takto upraveným hrotem byly zkoumány kapilární interakce a další vlastnosti povrchových sil nejrůznějších povrchů, např. oxidy křemíku, monovrstvy alkyků či perfluoralkylů.

## 2.6 Vnější magnetické pole

Mikroskopie magnetické síly je však také schopna využít pracovní režim na bázi vnějšího magnetického pole [17].

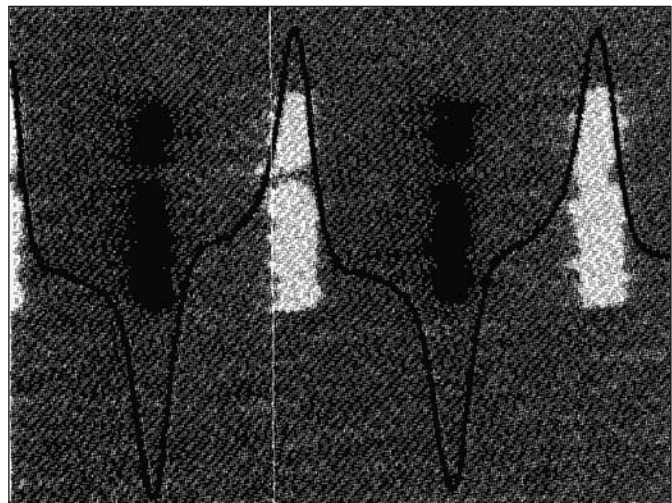
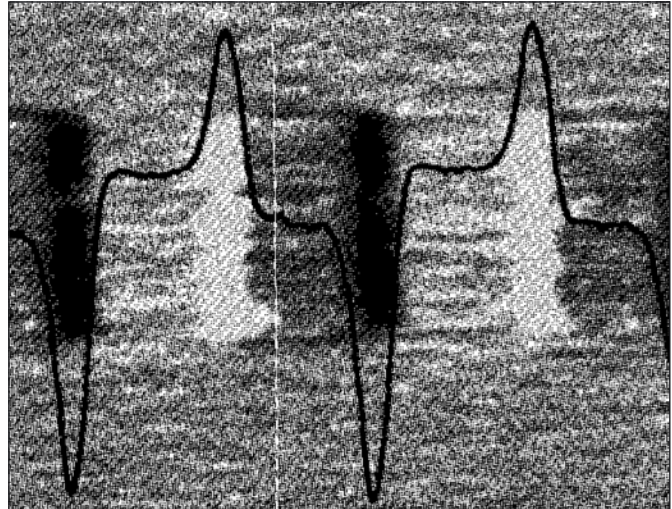
Myšlenka zavádět vnější magnetické pole do MFM souvisí se snahou minimalizovat neuspořádanost magnetických domén hrotu ovlivňovaných rozptylovým magnetickým polem vzorku. Vnější pole je generováno elektromagnetem, který je umístěn pod vzorkem. Důsledek působení vnějšího pole, které je silnější než rozptylové magnetické pole generované vzorkem, je usměrnění magnetických domén hrotu do jednoho směru. V případě zkoumání médií pro magnetický zápis s podélnou strukturou vnější pole neovlivňuje uspořádání magnetických domén vzorku (média) a dokonce ani neovlivňuje pořizovaný obraz, vytvořený magnetickou interakcí hrotu a vzorku.

Pro jednoduchost se hrot uvažuje jako jednoduchý konstantní magnetický dipól jehož směr je kolmý k povrchu vzorku. Pro magnetickou sílu pak platí

$$F_{mag} = \mu_0 \int_{hrot} M_h \frac{\partial H_z}{\partial z} dV, \quad (10)$$

kde  $M_h$  je magnetizace hrotu,  $H_z$  je složka intenzity rozptylového magnetického pole ve směru kolmém k povrchu vzorku a  $\mu_0$  je

permeabilita vakua. Lze říci, že měřená magnetická síla závisí pouze na parciálním členu, vyjadřujícím rozptýlené magnetické pole vzorku. Projev vnějšího magnetického pole, které je v oblasti mezi hrotem a vzorkem homogenní, je zanedbatelný a nebude detekován.



Obr. 4 Porovnání MFM obrazů periodických stop magnetického média s podélnou strukturou. Obrázek nahoře bez vnějšího magnetického pole, obrázek dole s vnějším magnetickým polem. Při použití vnějšího magnetického pole dochází ke zřetelnější obrazové symetrii související s uspořádáním magnetických domén hrotu [18]

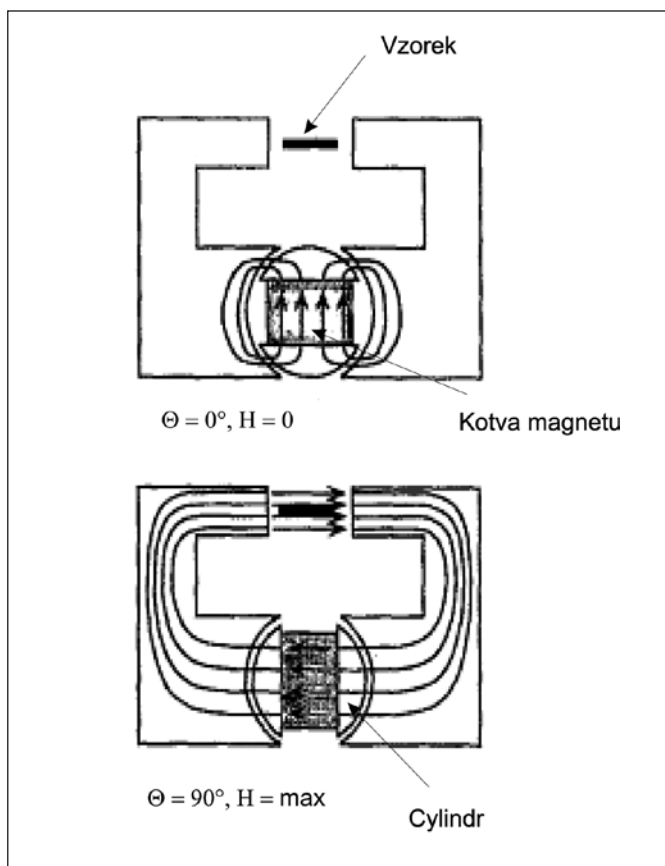
Implementace vnějšího magnetického pole do MFM probíhá v těsné blízkosti povrchu vzorku, kdy je toto magnetické pole generováno za pomoci solenoidu. Velká nevýhoda spočívá v zahřívání cívky a možném ovlivnění stability celé metodiky. Proto se pro tyto účely začaly používat permanentní magnety [19]. Autoři použili permanentní magnet prvků vzácných zemin (neodym-železo-borid) opatřený cylindrem (viz obr. 5). Magnetické pole je odkloněno ve směru vzorku nebo prochází pouze cylindrem díky otočné kotvě magnetu.

## 3. DETEČNÍ REŽIMY V MFM

Stejně jako ve většině SPM i v MFM je signál z detektoru veden zpětnou vazbou do aktivní jednotky skeneru. Tento pracovní režim se nazývá režimem konstantního signálu (amplitudy, frekvence). Další pracovní režimy se jmenují režim konstantní vzdálenosti a proměnné výchylky. Měření výše zmíněných technik může být provedeno v DC i AC.

#### • Režim konstantní frekvence

V režimu stálého frekvenčního posuvu je obraz generován pomocí předem nastavené konstantní frekvence, tj.,



Obr. 5 Cylindrická kotva sestává z magnetu a dvou měkkých železných plátů. Je-li kotva v pozici  $\theta = 0^\circ$  (horní obrázek), magnetický tok je odkloněn ve směru znázorněném indukčními čarami. Je-li kotva v pozici  $\theta = 90^\circ$  (dolní obrázek), magnetické pole prochází vzorkem v paralelním směru [19]

$$F_{\text{celk}} = F_{\text{mag}} + F_{\text{cl}} + F_{\text{vdW}} = \text{konst.} \quad (11)$$

Obraz v podstatě reprodukuje jako konturu magnetického gradientu. Magnetická síla mezi sondou a vzorkem může být přitažlivá či odpuzivá. Pro správnou funkci MFM je třeba, aby funkční závislost magnetické síly na vzdálenosti mezi hrotem a vzorkem byla monotónní. Uvažujeme-li rovný povrch vzorku, je téměř vždy výsledný obraz odrazem magnetické interakce. U jiných povrchů se však za obrazový vjem již považuje jakási konvoluce magnetického kontrastu a topografie, což pro nás právě ideální není. Jistou možností, jak částečně oddělit topografii a magnetický kontrast, je přiložit stejnosměrné napětí a jako zpětnovazební sílu využít gradient elektrostatické síly.

#### • Režim dvojího skenování

Jistou lepší alternativou se zdá být metoda založená na dvojím skenování. Topografie vzorku je zde zobrazena pomocí pokleповého režimu s využitím oscilační amplitudy raménka jako kontrolního (referenčního) signálu (zpětné vazby) [20]. Magnetický kontrast pak jednoduše docílíme přeskenováním již naměřeného topografického signálu pomocí fázového posunu nebo frekvence raménka v jisté předem stanovené výšce od povrchu vzorku.

#### • Režim konstantní vzdálenosti

Obraz získávaný na základě tohoto pracovního režimu je závislý na frekvenčním signálu stejném jako při režimu konstantní frekvence s tím rozdílem, že skenování probíhá velmi rychle. Nutno také dodat, že jako pozůstatek první zmínovaného pracovního režimu zde opět do jisté míry splývá magnetický kontrast a topografie (zejména u nerovných povrchů vzorků). Proto se uspořádání měřicího režimu poněkud liší. Místo toho, abychom se snažili o znázornění

povrchu vzorku (topografie), sonda skenuje povrch v předem nastavené výšce, zatímco se sledují pouze změny frekvenčního posunu raménka. Nevyhnutelný sklon vzorku je kompenzován elektronicky. Nulové nebo velice malé předpětí vyvažuje magnetické odchylky jak vzorku, tak hrotu při pořizování dat. Takovéto uspořádání minimalizuje příspěvky elektrostatických sil k celkovému kontrastu. Ukazuje se, že tento režim dosahuje také nejlepších poměrů signál-šum při poměrně vysoké rychlosti skenování.

### 3.1 Separace topografie a magnetického signálu

V rámci dosažení co nejlepšího rozlišení magnetického obrazu je nutno s MFM hroty pracovat co možná nejbližší povrchu vzorku. Při snižování vzájemné vzdálenosti hrotu a vzorku však nabývají na intenzitě nemagnetické interakce přispívající tak k šumu MFM signálu. Výsledkem je splývání topografického kontrastu a magnetického obrazu. Kvantitativní výsledky mohou být interpretovatelné pouze z čistých MFM obrazů a nikoli topografie. Vzhledem k tomu, že rozložení magnetických dipólových momentů vzorku prakticky nelze předpokládat stejně tak, jako povahu magnetických domén vzorku, je velice obtížné nalézt univerzální popis působící magnetické síly v závislosti na pracovní vzdálenosti hrotu a vzorku [21].

Existuje celá řada experimentů, které vedou k uspokojivé separaci topografického kontrastu od magnetického signálu. Ve většině případů jde o modulaci magnetické nebo nemagnetické části signálu. O modulaci magnetické části signálu hovoříme převážně tehdy, využíváme-li účinky vnějšího pole.

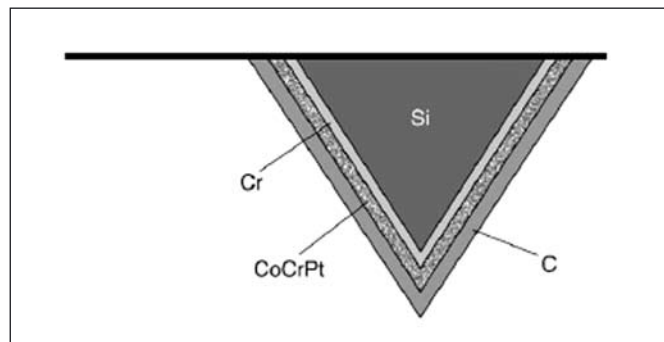
Jiný přístup [22] spočívá ve stabilizaci vzdálenosti hrotu a vzorku za pomoci tzv. konstantní coulombovské síly (elektrostatická interakce). Přivedené napětí mezi hrot a vzorek udržuje vzdálenost konstantní. Výchyly raménka budou v tomto případě pouze odrážet magnetické interakce a dochází k úplné separaci topografie a magnetického obrazu.

Jistou možností je skenování topografie vzorku nejprve v jednom řádku (rastru) a následně přeskenování magnetického signálu na téže linii nebo obdobně skenovat dokonce jednotlivé pixely. Nároky na stabilitu měřicího zařízení jsou však velmi vysoké.

### 4. HROTY POUŽÍVANÉ V MFM

V rámci stále rostoucích požadavků na rozlišení dosahované technikami mikroskopie magnetické síly, je nutno stále hledat další vylepšení vlastností skenujících prvků - hrotů. Materiál, ze kterého je hrot vyroben, musí mít co největší magnetický moment pro dosažení co nejlepšího signálu. Pro tento účel by bylo ideální sestavit hrot z materiálu o jedné magnetické doméně a získat tak maximální hodnotu magnetického momentu a tím pádem malé rozptylové pole a dobrou citlivost.

V poslední době se stává velice atraktivní studium magnetických materiálů pomocí vnějších magnetických polí, které jsou dostatečně silné, aby došlo ke změně magnetizace vzorku a tedy celého obrazového mechanismu během měření [24]. Osvědčilo se hroty vyrábět z magneticky tvrdých materiálů pro jejich značnou odolnost vůči vnějšímu poli nebo naopak z velice měkkých magnetických materiálů, které pak nevykazují žádné hysterezní smyčky.



Obr. 6 Schematické znázornění raménka a nanesených vrstev magnetických materiálů, které pokrývají křemíkový hrot [29]



Jedny z prvních publikovaných AFM technik využívaly ke snímání působících sil ramének pokrytých kovovými fóliemi (Au), na nichž byl nalepen diamantový hrot [1]. K mapování magnetických sil se používaly kobaltové nebo niklové drátky [25]. Na wolframové drátky byly naprašovány nebo galvanicky nanášeny tenké vrstvy feromagnetik [26]. V poslední době se spíše využívá křemíkových nebo křemík-nitridových hrotů (viz obr. 6) pokrytých vhodnou vrstvou magneticky aktivních látek (Co,  $\text{Co}_{71}\text{Pt}_{12}\text{Cr}_{17}\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ ) [27, 28].

#### 4.1 Hroty z magneticky měkkých materiálů

Směry magnetických momentů takovýchto hrotů vždy podléhají vlivu přiloženého vnějšího magnetického pole. Hrot bude vždy ovlivňován přitažlivými silami a vytvořený obraz bude vždy odrazem absolutní hodnoty rozptylového magnetického pole [30]. Jejich nevýhoda spočívá ve ztrátě informace o polaritě rozptylového pole. Byla zaznamenána i výroba sférických magnetických hrotů, např. [31].

Ideálním měkkým magnetickým hrotem by se stala superparamagnetická částice, protože magnetický moment superparamagnetického hrotu by se přizpůsoboval měnícímu se magnetickému poli.

#### 4.2 Hroty z magneticky tvrdých materiálů

Během skenování by se hodnoty magnetizace u tohoto typu hrotu neměly měnit, což nám umožňuje získat informaci o směru působícího rozptylového pole vzorku. Na druhou stranu není možné vyrobit hroty, které by byly schopny udržet směr magnetického momentu konstantní při vysokých vnějších polích na neomezeně dlouho. Vzhledem ke směru působícího vnějšího magnetického pole mohou nastat dva efekty

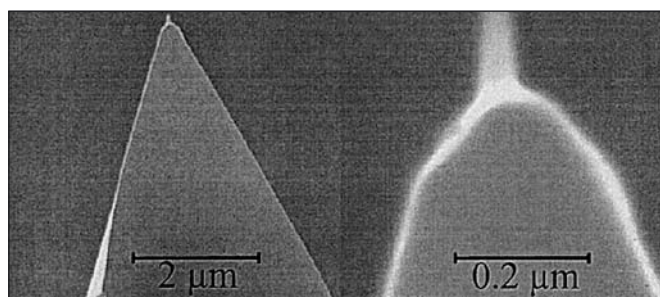
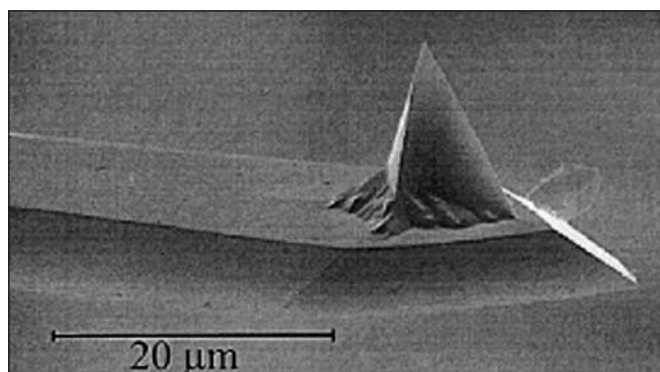
- směr působení vnějšího magnetického pole je rovnoběžný se směrem magnetického momentu hrotu (největší vliv na změny magnetického dipólu hrotu – se změnou směru magnetického momentu hrotu se mění i kontrast dosaženého magnetického obrazu)
- směr působení vnějšího magnetického pole není rovnoběžný se směrem magnetického momentu hrotu (se zvyšujícím se celkovým příspěvkem působících polí se snižuje schopnost měnit dipólový moment hrotu).

### 5. ZDOKONALENÉ HROTY POUŽÍVANÉ V MFM

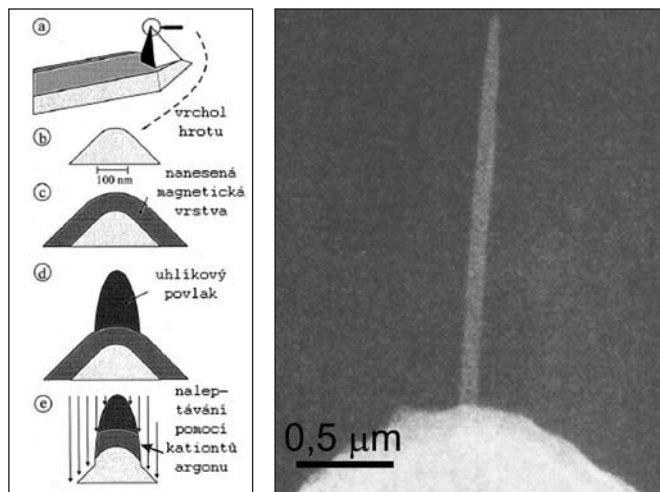
Jak již bylo několikrát řečeno, rozlišení MFM úzce souvisí s magnetickými vlastnostmi hrotu, který je vystaven rozptylovému magnetickému poli vzorku a také jejich vzájemnou vzdáleností. V rámci tohoto požadavku je tedy velice žádoucí co nejvíce snížit velikost magneticky citlivé části hrotu a s celou sondou se pohybovat co nejbližší povrchu měřeného vzorku.

Literatura nabízí poměrně široké spektrum přístupů, které dostatečně dobře suplují nároky na vhodnou miniaturizaci a výrobu magnetických hrotů. Zmíníme ty nejdůležitější: EBD - electron beam deposition [34], FIB - focused ion beam milling [36] a MWNT - multiwalled nanotubes [37].

Efektivní měřicí rozpětí sondy (magneticky citlivá část) je omezeno na malou částici z magnetického materiálu, která je umístěna na vrchol (špičku) sondy [33]. Konečná část hrotu se pokrývá 50 - 100 nm tenkou vrstvou magnetického filmu odpovídajícího materiálu (CoCr). V dalším kroku se přemístí takto upravený nosník do vzorkové komory skenovacího elektronového mikroskopu (SEM), přičemž je elektronový svazek zaměřen přesně na vrcholek a ozařuje jej zhruba 10 - 15 minut. Vzhledem k rozkladu zbytkových uhlovodíků (chápeme jako příměs či nečistotu) na povrchu koncové části hrotu vlivem silného proudu elektronů se dále vytváří tenká vrstva uhlíku. V dalším kroku se povrchová uhlíková maska leptá pomocí kationtů  $\text{Ar}^+$ . Čas potřebný k leptání a proud iontů jsou nastaveny tak, že odkrytý magnetický materiál je úplně odstraněn z nosníku, zatímco středová část uhlíkového hrotu není zcela vyleptána. Výsledkem celého postupu je koncová část nosníku, v němž je obnažena drobná magnetická částice (viz obr. 8 - kroky a - e).



Obr. 7 Horní obrázek je pořízen v režimu SEM a znázorňuje běžně používaný hrot AFM před EBD. Dolní obrázek je pořízen ve stejném režimu a znázorňuje speciálně upravený hrot pro MFM měření po EBD [32]



Obr. 8 V levém obrázku je schématické znázornění přípravy hrotů pomocí EBD - kroky a - e [33, 34]. Na pravém obrázku je hotový hrot [35], obrázek pořízen metodou SEM

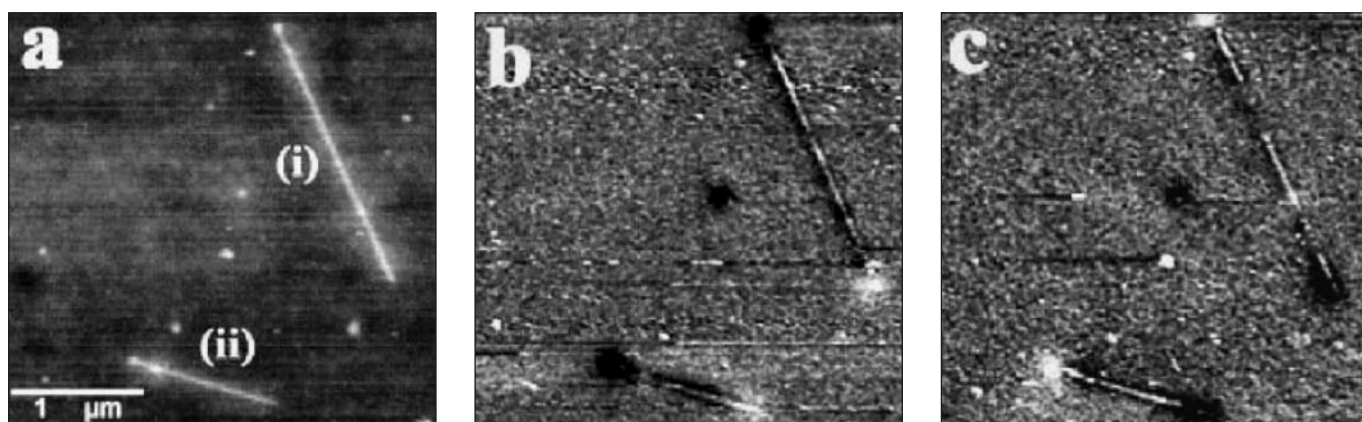
### 6. APLIKACE V MFM

Mikroskopie magnetické síly se dnes již stává běžnou experimentální mikroskopickou technikou využitelnou v mnoha oblastech výzkumné činnosti. Mezi nejznámější aplikace patří studium magnetického zápisu [25], výzkum v oblasti pevných látek, např. [38], a supravodivosti [39], ale i další čistě nano-biologické či chemické disciplíny. Věnujme se poněkud vědecky zanedbávanější oblasti využití MFM, kterou je studium magnetických nanočástic.

S pomocí MFM byly provedeny nové studie nanodrátků [40], např.  $\text{Fe}_3\text{B}$ , které naznačují, že jde o feromagnetika s jedno-domenovou strukturou, čímž potvrzují jejich uplatnění v podobě magnetických kompozitů, hrotů MFM nebo vhodných komponentů pro magnetický zápis.

Velice zajímavou aplikací se stává i studium magnetotaktických bakterií (např. [41]). V buňkách magnetotaktických bakterií mineralizují tzv. magnetozomy. Jde o částice magnetitu,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nebo

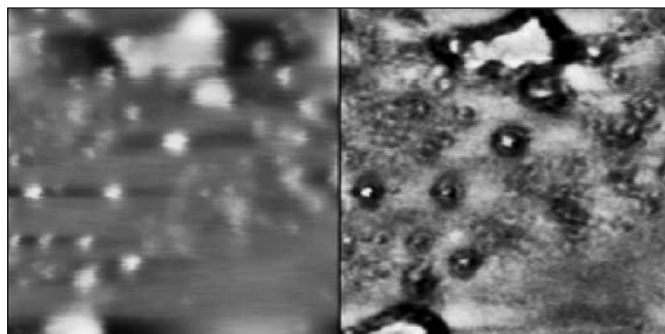




Obr. 9 Obrázek  $\text{Fe}_3\text{B}$  nanodrátů pořízený technikou AFM (a) a stejný obrázek pořízený technikou MFM (b). Poslední obrázek pořízený technikou MFM po obrácení směru magnetizace hrotu (c). Obrácení magnetizace hrotu se projeví změnou polohy světlých a tmavých konců nanodrátů [40]

$\text{Fe}_3\text{S}_4$  s jednou magnetickou doménou pokryté lipid-proteinovou membránou. Lineární řetězec magnetozomů je orientován podél osy symetrie buňky a vytváří tak permanentní magnetický dipól.

Další studie [45] se týkají využití magnetických nanočástic a MFM jako efektivního a citlivého detekčního zařízení např. pro streptavidin. Došlo k navázání magneticky aktivní nanočástice na streptavidin a pomocí MFM k její lokalizaci - výhled do budoucna jako dokonalé magnetické markery pro bio-detekci.



Obr. 10 Porovnání obrazů pořízených technikou AFM (vlevo) a MFM (vpravo) izolovaných magnetozomů a jejich clusterů zmagnetovaných kolmo vzhledem k povrchu vzorku. Světlé a tmavé skvrny v MFM obraze reprezentují odpudivé (bílé) nebo přitažlivé (tmavé) oblasti

V neposlední řadě se MFM využívá jako vynikající detekční zařízení pro potvrzení přítomnosti antirakovinných látek v lidských buňkách postižených leukémií [46]. Oligonukleotidy pokryté nanočásticemi oxidů železa byly vkomponovány blízko postižených buněk a pomocí topografie a MFM se sledovala morfologie např. apoptózy (programovaná buněčná smrt) nádorových buněk.



Obr. 11 Obrázky pořízené technikou MFM. Nanočástice jsou ve tkáni znázorněny jako tmavé oblasti [46]

## 7. ZÁVĚR

V průběhu několika posledních let se mikroskopie magnetické síly vyvinula z čistě výzkumného nástroje na široce používanou mikromagnetickou zobrazovací metodiku. Tato adaptabilní měřicí technika vede k obsáhlému zobrazování nejrůznějších magnetických vzorků bez náročných příprav. Největší překážka tkví v korektní a kvantitativní interpretaci dat. Přesto vše je mikroskopie magnetické síly velice užitečným nástrojem v oblastech mikro- či nano-magnetismu.

*Tento příspěvek vznikl za podpory grantu centra výzkumu práškových nanomateriálů č. KAN 101630651 a č. 1M0512.*

## Literatura

- [1] Binnig G., Quate C. F., Gerber Ch., Atomic force microscope, *Physical Review Letters*, **56**, 930–933, 1986.
- [2] Martin Y., Wickramasinghe H. K., Magnetic imaging by „force microscopy“ with 1000 Å resolution, *Appl. Phys. Lett.*, **50**, 1455–1457, 1987.
- [3] Argyle B. F., Terrenzio E., Magneto-optic observation of Bloch lines, *Journal of Applied Physics*, **55**, 2569, 1984.
- [4] Suits J. S., Geiss R. H., Lin C. J., Rugar D., Bell A. E., Lorentz microscopy of micron-sized laser-written magnetic domains in TbFe, *Appl. Phys. Lett.*, **49**, 419, 1986.
- [5] Wadas A., Hug J., Models for the stray field from magnetic tips used in magnetic force microscopy, *Journal of Applied Physics*, **72**, 203–206, 1992.
- [6] Wadas A., Grutter P., Theoretical approach to magnetic force microscopy, *Physical Review B*, **39**, 12013–12017, 1989.
- [7] Bryant P., Schultz S., Fredkin D. R., Modeling the behavior of the magnetic force microscopy, *Journal of Applied Physics*, **69**, 5877–5879, 1991.
- [8] Hartmann U., The point dipole approximation in magnetic force microscopy, *Physics Letters A*, **137**, 475, 1989.
- [9] Tomlinson S. L., Farley A., N., Micromagnetic model for magnetic force microscopy tips, *Journal of Applied Physics*, **81**, 5029–5031, 1997.
- [10] Ovchinnikov D. V., Bukharev A. A., The computer analysis of MFM images of separate ferromagnetic nanoparticles, *Scanning tunneling microscopy/spectroscopy and related techniques: 12th International Conference STM'03, AIP Conference Proceedings*, **696**, 634–641, 2003.
- [11] Pedreschi F., Sturm J. M., O'Mahony J. D., Flipse C. F. J., Magnetic force microscopy and simulations of colloidal iron nanoparticles, *Journal of Applied Physics*, **94**, 3446–3450, 2003.

- [12] Wright C. D., Hill E. H., Reciprocity in magnetic force microscopy, *Appl. Phys. Lett.*, **67**, 433–435, 1995.
- [13] Terris B. D., Stern J. E., Rugar D., Mamin H. J., Contact electrification using force microscopy, *Physical Review Letters*, **63**, 2669–2672, 1989.
- [14] Terris B. D., Stern J. E., Rugar D., Mamin H. J., Localised charge force microscopy, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **8**, 374–377, 1990.
- [15] Stifter T., Marti O., Bhushan B., Theoretical investigation of the distance dependence of capillary and van der Waals forces in scanning force microscopy, *Physical Review B*, **62**, 13667–13673, 2000.
- [16] Malotky D. L., Chaudhury M. K., Investigation of capillary forces using atomic force microscopy, *Langmuir*, **17**, 7823–7829, 2001.
- [17] Gomez R. D., Burke E. R., Mayergoyz I. D., Magnetic imaging in the presence of external magnetic fields: Technique and applications, *Journal of Applied Physics*, **79**, 6441–6446, 1996.
- [18] Madabhushi R., Gomez R. D., Mayergoyz I. D., Magnetic biasing and MFM image reconstruction, *IEEE Transaction On Magnetics*, **32**, 4147–4149, 1996.
- [19] Proksch R., Runge E., Hansma P. K., Foss S., Walsh B., High field magnetic force microscopy, *Journal of Applied Physics*, **78**, 3303–3307, 1995.
- [20] San Paulo A., Garcia R., Tip-surface forces, amplitude, and energy dissipation in amplitude-modulation (tapping mode) force microscopy, *Physical Review B*, **64**, 1–4, 2001.
- [21] Zhu X., Magnetic force microscopy studies of submicron and nanoscale magnet arrays, PhD thesis, Mc Gill University, Montreal, 2002.
- [22] Schonenberg C., Alvaro S. F., Lambert S. E., Sanders I. L., Separation of magnetic and topographic effects in force microscopy, *Journal of Applied Physics*, **67**, 7278–7280, 1990.
- [23] Dan Dahlberg E., Proksch R., Magnetic microscopies: the new additions, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **200**, 720–728, 1999.
- [24] Babcock K. L., Elings V. B., Shi J., Awschalom D. D., Dugas M., Field-dependence of microscopic probes in magnetic force microscopy, *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 705–707, 1996.
- [25] Rugar D., Mamin H. J., Guethner P., Lambert S. E., Stern J. E., McFadyen I., Yogi T., Magnetic force microscopy: General principles and application to longitudinal recording media, *Journal of Applied Physics*, **68**, 1169–1183, 1990.
- [26] den Boef A. J., Preparation of magnetic tips for a scanning force microscope, *Appl. Phys. Lett.*, **56**, 2045–2047, 1990.
- [27] Grutter P., Rugar D., Mamin H. J., Castillo G., Lin C.-J., McFadyen I. R., Valletta R. M., Wolter O., Bayer T., Greschner J., Magnetic force microscopy with batch-fabricated force sensors, *Journal of Applied Physics*, **69**, 5883–5885, 1991.
- [28] Sueoka K., Sai F., Parker K., Arnoldussen T., Study of magnetic characteristic of tips for magnetic force microscopy, *J. Vac. Sci. Technol.*, **12**, 1618–1622, 1994.
- [29] Matteucci G., Frost B. G., Medina F. F., Study of the field around magnetic force microscopy probes using electron holography, *Ultramicroscopy*, **99**, 95102, 2004.
- [30] Grutter P., Rugar D., Mamin H. J., Castillo G., Lambert S. E., Lin C. - J., Valletta R. M., Wolter O., Bayer T., Greschner J., Batch fabricated sensors for magnetic force microscopy, *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 1820–1822, 1990.
- [31] Lemke H., Goddenhenrich T., Bochem H. P., Hartmann U., Heiden C., Improved microtips for scanning probe microscopy, *Rev. Sci. Instrum.*, **61**, 2538–2541, 1990.
- [32] Koblischka M. R., Hartmann U., Recent advances in magnetic force microscopy, *Ultramicroscopy*, **97**, 103112, 2003.
- [33] Leinenbach P., Memmert U., Schelten J., Hartmann U., Fabrication and characterization of advanced probes for magnetic force microscopy, *Applied Surface Science*, **144**, 492–496, 1999.
- [34] Jumpertz R., Leinenbach P., van der Haart A. W. A., Schelten J., Magnetically refined tips for Scanning Force Microscopy, *Microelectronic Engineering*, **35**, 325–328, 1997.
- [35] Akama Y., Nishimura E., Sakai A., Murakami H., New scanning tunneling microscopy tip for measuring surface topography, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **8**, 429–433, 1990.
- [36] Vasile M. J., Grigg D., Griffith J. E., Fitzgerald E., Russell P. E., Scanning probe tip geometry optimized for metrology by focused ion beam ion milling, *J. Vac. Sci. Technol.*, **9**, 356–93572, 1991.
- [37] Dai H., Hafner J. H., Rinzler A. G., Colbert D. T., Smalley R. E., Nanotubes as nanoprobe in scanning probe microscopy, *Nature*, **384**, 147–150, 1996.
- [38] Folks L., Woodward R. C., The use of MFM for investigating domain structures in modern permanent magnet materials, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **190**, 28–41, 1998.
- [39] Coffey M. W., Magnetic force microscopy of superconductors, *International Journal of Engineering Science*, **36**, 1493–1509, 1998.
- [40] Li Y., Tevaarwerk E., Chang R. P. H., Ferromagnetic iron boride (Fe<sub>3</sub>B) nanowires, *Chem. Mater.*, **18**, 2552–2557, 2006.
- [41] Proksch R. B., Schaffer T. E., Moskowitz B. M., Dahlberg E. D., Bazyliniski D. A., Frankel R. B., Magnetic force microscopy of the submicron magnetic assembly in a magnetotactic bacterium, *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 2582–2584, 1995.
- [42] Ginger D. S., Zhang H., Mirkin Ch. A., The evolution of dip-pen nanolithography, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **43**, 30–45, 2004.
- [43] Richter J., Mertig M., Pompe W., Monch I., Schackert H. K., Construction of highly conductive nanowires on DNA template, *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 536–538, 2001.
- [44] Nyamjav D., Kinsella J. M., Ivanisevic A., Magnetic wires with DNA cores: A magnetic force microscopy study, *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 093107-1–093107-3, 2005.
- [45] Amemiya Y., Tanaka T., Yoza B., Matsunaga T., Novel detection system for biomolecules using nano-sized bacterial magnetic particles and magnetic force microscopy, *J. Biotechnology*, **120**, 308–314, 2005.
- [46] Shen H., Long D., Zhu L., Li X., Dong Y., Jia N., Zhou H., Xin X., Sun Y., Magnetic force microscopy analysis of apoptosis of HL-60 cells induced by complex of antisense oligonucleotides and magnetic nanoparticles, *Biophysical Chemistry*, **122**, 1–4, 2006.

Mgr. Aleš Hendrych, katedra experimentální fyziky, PřF UP, Tř. 17. listopadu 50, Olomouc, 772 07, tel.: 585 634 294, e-mail: Ales.Hendrych@seznam.cz

Doc. RNDr. Roman Kubínek, CSc., katedra experimentální fyziky, PřF UP, Tř. 17. listopadu 50, 772 07, Olomouc, tel.: 585 634 285, e-mail: kubinek@prfnw.upol.cz

Mgr. Milan Vůjtek, Ph.D., Centrum pro výzkum nanomateriálů, Šlechtitelů 11, Olomouc, tel.: 585 634 950, e-mail: milan.vujtek@upol.cz.

# Měření a analýza nerovností povrchů kovových materiálů vytvořených abrazivním vodním paprskem

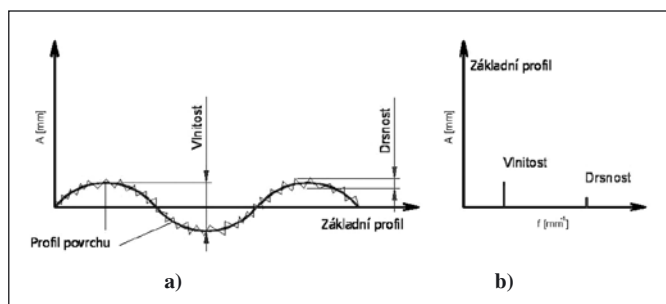
*Příspěvek se věnuje studiu kvality povrchů vytvořených abrazivním vodním paprskem s cílem zvýšit kvalitu povrchu. K měření nerovností povrchů byla použita bezkontaktní optická stínová metoda. Bylo odvozeno kritérium hodnocení drsnosti a vlnitosti řezné stěny vhodné také pro automatizované, tzv. on-line řízení. Jde o bezrozměrný statistický parametr C pro určitý materiál obrobku, jehož diskrétní hodnota může v automatizačním systému zpětné vazby přispět k optimalizaci postupové rychlosti řezné hlavy, tedy toho technologického parametru, který má největší vliv na jakost povrchu.*

## 1. ÚVOD

Několik posledních desetiletí ve vědě, výzkumu i praxi je charakterizováno rozvojem tzv. nekonvenčních technologií obrábění materiálů mezi něž se dosud řadí i různé technologie obrábění vysokorychlostním kapalinovým paprskem, zejména pak vysokorychlostním kapalinovým paprskem s přísadou abrazivních látek. Vysoká rychlost vytékajícího proudu vody s příměsí abraziva umožňuje obrábět intenzivně, ekonomicky a přitom ekologicky širokou škálu průmyslových materiálů od papíru, lepenky, dřeva, plastu, korku, stavebních hmot a hornin až po kovy a jejich slitiny. Jde tedy v obráběcím průmyslu o vysoce aktuální technologii právě pro její univerzálnost, ekologičnost a bezpečnost [1 až 8]. Zatímco technologie vlastního obrábění vysokorychlostním paprskem je již hardwarově i softwarově, kromě specifických případů, do značné míry vyřešena, technickým problémem stále zůstává způsob kontroly kvality povrchu obrobků ploch s kontinuálním řízením při výrobě.

### 1.1. Normované parametry profilu povrchu

Mezi nejpoužívanější parametry patří  $Ra$  – střední aritmetická úchylka profilu a  $Rq$  – střední kvadratická úchylka profilu. Podle norem ČSN EN ISO 4287 a ČSN EN ISO 4288 se rozlišuje základní profil, profil vlnitosti a profil drsnosti (viz obr. 1a) [8, 9].



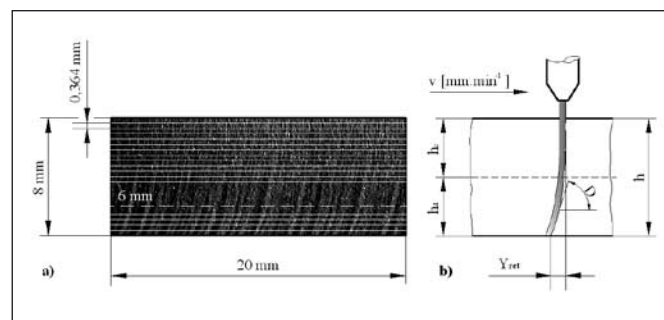
Obr. 1 Výškové fluktuace profilu povrchu ad a) a jeho amplitudově-frekvenční spektrum ad b)

Dá se říci, že základní profil je ideálně hladký povrch. Profil vlnitosti je charakterizován nízkými frekvencemi a vysokými amplitudami nerovností povrchu  $A$  (mm). Profil drsnosti je charakterizován vysokými frekvencemi a nízkými amplitudami nerovností povrchu [10 až 12]. Na obr. 1a vidíme, že na vlnitost je superponována drsnost povrchu. Pro tento profil povrchu je zde uvedena amplitudově-frekvenční charakteristika (viz obr. 1b), kde vidíme, že základní profil povrchu je totožný s osou  $A$ , vlnitost

se objevuje v oblasti nízkých prostorových frekvencí a drsnost povrchu se objevuje v oblasti vysokých prostorových frekvencí. Toto je však jen modelová situace, skutečné povrchy mají daleko složitější amplitudově-frekvenční spektra. Proto se při hodnocení povrchu často provádí amplitudově-frekvenční dekompozice na jednotlivé spektrální úrovně (viz obr. 3a).

### 1.2. Navržené hlavní geometrické parametry profilu povrchů vytvořených technologií abrazivního vodního paprsku

Jako hlavní parametry geometrie řezné stěny jsme navrhli drsnost povrchu  $Ra$ , zpoždění řezné stopy  $Y_{rel}$  a deviační úhel  $D$  a hloubku řezu  $h$  (obr. 2). Dle Hashishe [13] lze na každém povrchu vysledovat tzv. kritickou hloubku  $h_c$ , kde oblast nad touto kritickou hloubkou je tzv. řeznou oblastí a pod ní je tzv. deformační oblastí (viz obr. 2). Řeznou oblast považujeme za kvalitní a deformační za nekvalitní. Tato kritická hloubka je závislá na technologických parametrech, zejména na postupové rychlosti řezné hlavy  $v$ .



Obr. 2 Fotografie povrchu řezné stěny ad a) (zvětšeno 12 x) a navržené hlavní parametry profilu povrchu ad b)

Označení parametrů  $h_c$  a  $h_d$  byly převzaty od Hashishe [13]. Použití těchto parametrů umožňuje rozlišení kvalitní řezné oblasti od nekvalitní deformační oblasti, což je důležité hodnocení řezu pro odběratele.

## 2. VÝSLEDKY ZÍSKANÉ STÍNOVOU METODOU POMOCÍ CCD KAMERY

Tato metoda již byla prezentována v minulém čísle tohoto časopisu [14]. Na každém materiálu a straně vzorku jsme provedli měření ve 22 (obr. 2) vodorovných liniích. Prezentace metodiky je v dalším výkladu uvedena na příkladu oceli AISI 309. Z každé



měřicí linie jsme získali signál, který byl dále zpracováván pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT). Touto transformací se získala jeho amplitudově-frekvenční spektra. Jak již bylo dříve zmíněno na modelovém případě (obr. 1), budeme hledat v daných spektrech oblasti, kde se koncentruje vlnitost a kde drsnost. Jak jsme již poznamenali, spektrum vlnitosti se bude objevovat v oblasti nízkých frekvencí a budou jí odpovídat vysoké amplitudy nerovností povrchu, naopak drsnost se bude objevovat v oblasti vysokých frekvencí s malými amplitudami povrchových nerovností. Jak vidíme z vykonaných experimentů, s rostoucí hloubkou  $h$  řezu klesá kinetická energie paprsku a tím rostou nerovnosti povrchu, tj. rostou jejich výškové amplitudy a současně se snižují jejich prostorové frekvence. Je to způsobeno tím, že se mění mechanismus úběru materiálu, a to z převládajícího tahového a smykového napětí na tlakové napětí. U vzorků vytvořených abrazivním vodním paprskem (AWJ) můžeme říci, že s rostoucí hloubkou  $h$  převládají nízké prostorové frekvence nerovností povrchu (tedy vlnitost) ve srovnání s vysokými prostorovými frekvencemi (tedy drsností povrchu). Tuto skutečnost jsme ověřili ve 22 ekvidistantních měřících (obr. 2) vodorovných liniích o délce 20 mm, kde jsme měřili  $RMS_s$  amplitudu nerovností povrchu v šesti různých frekvenčních pásmech, a to 0 - 2,5 mm<sup>-1</sup> ( $RMS_s(1.)$ ), 2,5 - 5 mm<sup>-1</sup> ( $RMS_s(2.)$ ), 5 - 10 mm<sup>-1</sup> ( $RMS_s(3.)$ ), 10 - 15 mm<sup>-1</sup> ( $RMS_s(4.)$ ), 15 - 20 mm<sup>-1</sup> ( $RMS_s(5.)$ ), 20 - 25 mm<sup>-1</sup> ( $RMS_s(6.)$ ) (viz obr. 3a). Takto volené frekvenční intervaly simulovaly „cut-off“ kontaktního profilometru pro provedení dekompozice topografie povrchů na její jednotlivé subsložky.

Výsledky získané z vodorovných linií jsou uvedeny v grafu průběhu  $RMS_s$  nerovností v závislosti na hloubce  $h$  (obr. 3b). Obr. 3b vznikl následujícím způsobem: z provedených 22 měřících linií bylo získáno 22 signálů a z těchto signálů pomocí FFT bylo obdrženo 22 amplitudově-frekvenčních spekter. Každé spektrum je reprezentováno parametrem  $RMS_s$ , což je výstupní signál, který

vyhodnocujeme pomocí stínové metody. Tento parametr je lineárně vázán k parametru  $Ra$  (vztah (1)) a je v jednotkách a.u. (auxiliary unites), což jsou pomocné jednotky. Vztah mezi  $RMS_s$  a  $Ra$  je dán následujícím empirickým vztahem (1):

$$RMS_s = k \cdot Ra, \quad (1)$$

kde  $k$  – je konstanta závislá na materiálu (např. pro oceli  $k = 20$ ).

Dá se říci, že celková hodnota  $RMS_s$  reprezentuje jeden signál, který je zpracován FFT a je definován jedním bodem. Těchto spekter je 22 a tedy i 22 bodů je zaneseno do grafu jako funkce hloubky  $h$  (mm) podle obr. 3b. Amplitudově-frekvenční spektrum obr. 3 je dále empiricky rozděleno pro kovové materiály na reprezentativní frekvenční pásma za účelem získání informace o poměrném zastoupení vlnitosti ku drsnosti. Tedy pro amplitudově-frekvenční spektrum, které jsme rozdělili na 6 frekvenčních pásem, získáváme taktéž pro každou jednu oblast 22 bodů, které jsou zaneseny do obr. 3b. Pro vysoké prostorové frekvence nerovností povrchu je tato veličina prakticky nezávislá na hloubce  $h$ . Pro nízké prostorové frekvence nerovností povrchu  $RMS_s$  s hloubkou rostou.

Celkovou hodnotu  $RMS_s$  nerovností povrchu ve vodorovné měřící linii zjistíme následovně:

$$RMS_s = \sqrt{[RMS_s(1.)]^2 + [RMS_s(2.)]^2 + [RMS_s(3.)]^2 + [RMS_s(4.)]^2 + [RMS_s(5.)]^2 + [RMS_s(6.)]^2}, \quad (2)$$

kde  $RMS_s(1.) - RMS_s(6.)$  jsou  $RMS_s$  nerovností určené ve výše zmíněných frekvenčních oblastech.

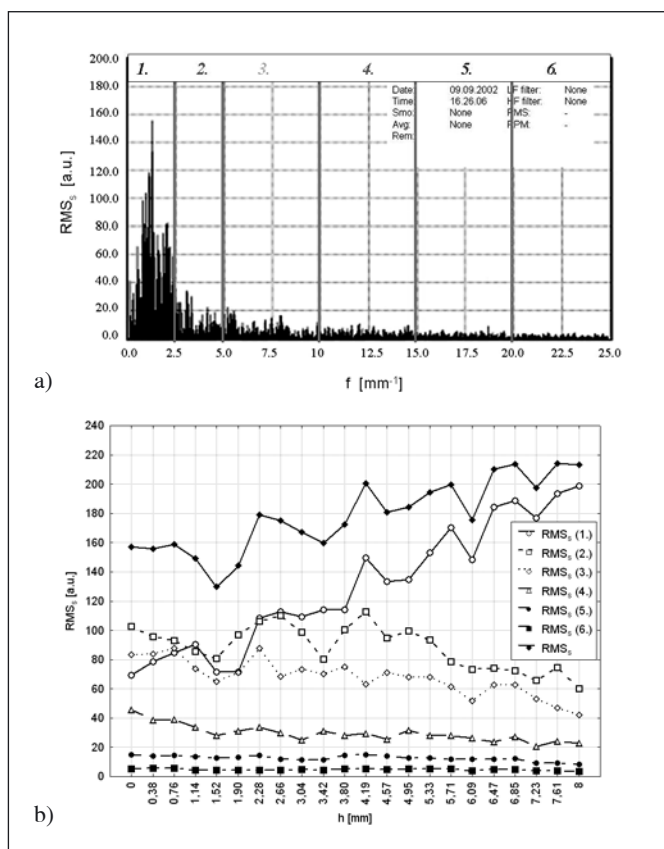
Z hlediska popisu šíření a degradace AWJ paprsku směrem do hloubky řezu  $h$  a podle naměřených hodnot  $RMS_s$  je možno sledovat následující jev, a to existenci iniciační zóny, což je zóna vzniklá v materiálu prvním kontaktem s AWJ paprskem. Tato iniciační zóna je charakterizována prudkým nárůstem hodnot  $RMS_s$  a  $Ra$ , po překonání celkového odporu materiálu v iniciační zóně nastane prudký pokles hodnot  $RMS_s$  a  $Ra$ , což je způsobeno odporem materiálu vůči pronikajícímu proudu AWJ.

### 3. NÁVRH KVANTITATIVNÍHO KRITÉRIA PRO HODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHU GENEROVANÉHO ABRAZIVNÍM VODNÍM PAPSREM

Námi realizovaná řada statistických a analytických studií naměřených výsledků na různých materiálech vede k závěru, že rozdělení charakteristických výškových a podélných rozměrů drsnosti, resp. vlnitosti do jednotlivých zón ve směru rostoucí hloubky řezu vykazuje jisté zákonitosti. Protože s těmito rozměry povrchu řezné stěny funkčně přímo souvisí většina důležitých topografických a mechanických parametrů, platí i pro tyto další parametry stejné zákonitosti v jejich rozdělení. Jde zejména o drsnost povrchu  $Ra$ , retardaci (zpoždění stopy paprsku od kolmého směru při dělení materiálu) a deviaci stopy řezu (úhel zakřivení stopy), jakož i o hodnoty oscilačních a napětově-deformačních parametrů materiálu povrchové vrstvy řezné stěny a jejich vývoj do hloubky řezu. Kvantitativním kritériem pro rozřídění řezu do zón s různou kvalitou povrchu může být námi zvolený parametr  $C$ , který definujeme následovně (3):

$$C = \frac{RMS_s(1.)}{RMS_s}, \quad (3)$$

Tento parametr  $C$  je konstantou pro danou horizontální měřící linii. Hodnota  $C$  je tedy podíl  $RMS_s(1.)$  – (oblast vlnitosti) ku celkovému  $RMS_s$  naměřenému v každé měřené linii (viz obr. 4a

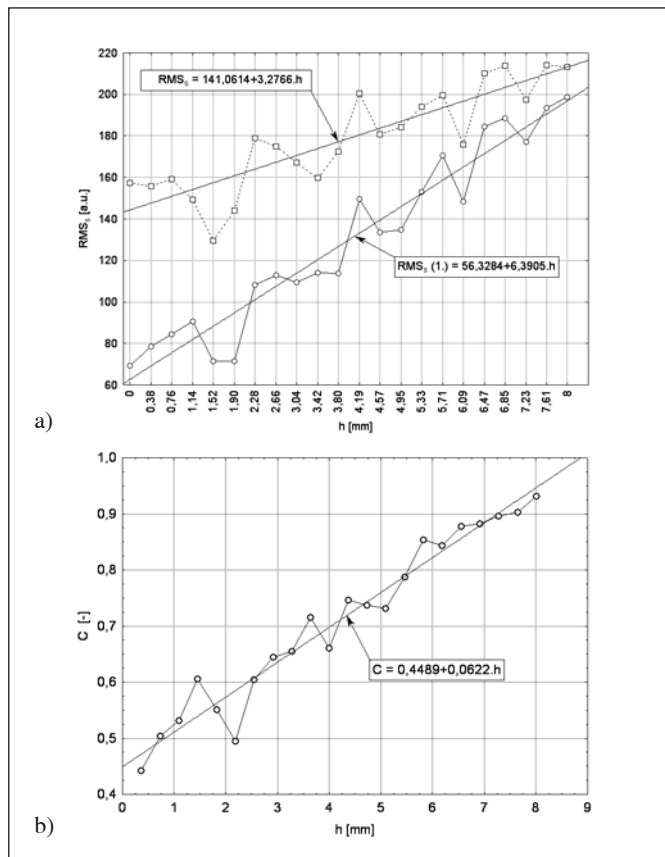


Obr. 3 (ad a) Amplitudově-frekvenční spektrum studovaného povrchu získané z jedné vodorovné měřící linie o délce 20 mm v hloubce 6 mm od povrchu (ad b) průběh  $RMS_s$  nerovností povrchu v jednotlivých frekvenčních pásmech

a vztah (2)). Je nutno rozlišit parametr  $C$ , který je konstantou pro danou měřicí linii a funkci  $c$ , což je distribuční funkce hodnot ( $C_1 - C_{22}$ ) ve vztahu k hloubce  $h$  (4):

$$c = f(C_1 - C_{22}, h), \quad (4)$$

Průběh parametru  $C$  v závislosti na hloubce  $h$  je znázorněn na obr. 4b. U tohoto poměru můžeme hovořit o dvou extrémech. V případě, že se  $C$  blíží k nule, jde o povrch, u kterého dominuje drsnost nad vlnitostí. Pokud se  $C$  blíží k 1, jedná se o povrch, u kterého vlnitost dominuje nad drsností. Skutečné povrchy se pohybují v rozmezí  $0,3 \div 0,95$ .



Obr. 4 Závislost  $RMS_s$  na hloubce  $h$  ad a) a závislost hodnoty  $C$  na hloubce  $h$  ad b)

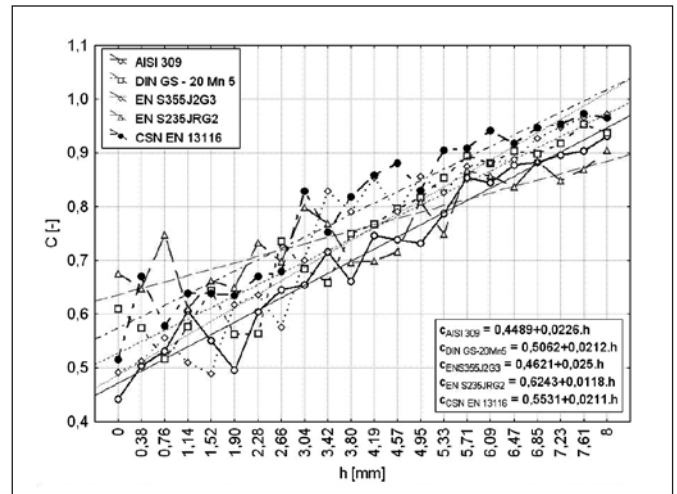
#### 4. ZHODNOCENÍ SOUBORU MĚŘENÝCH VZORKŮ PODLE NAVRŽENÉ METODIKY

Na obr. 5 je možno pro jednotlivé materiály (AISI 309, EN Fe 510 DD1, EN Fe 360 BFN a DIN GS - 20 Mn 5) při rychlosti posuvu řezné hlavy  $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  sledovat, jak se mění  $C$  v závislosti na hloubce  $h$ . Na obr. 6 můžeme tytéž závislosti sledovat pro stejné materiály při rychlosti posuvu řezné hlavy  $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ .

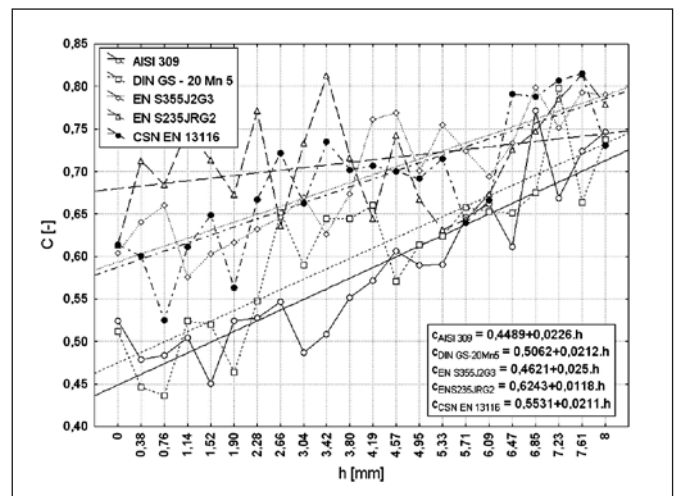
Na obr. 6 lze pozorovat, že pro nejtvrdší materiál, kterým je ocel ČSN EN 13 116 roste parametr  $C$  nejrychleji, pro nejměkčí materiál ocel EN S235JRG2 nejpomaleji.

Z obr. 5 a 6 je zřejmé, že statistický parametr  $C$  dobře reaguje na změny související se změnou mechanismu namáhání materiálu na povrchu řezné stěny. Z technologického hlediska se dá říci, že při rychlosti posuvu  $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  se materiál chová jako plastičtější, než je tomu u rychlosti  $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Kvantitativně lze míru zplastičení materiálu vlivem poklesu postupové rychlosti AWJ svazku vyjádřit poměrem příslušných hodnot parametru  $C$  podle následujícího vztahu:

$$\Delta P_{Cv} = \frac{C(200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1})}{C(50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1})}. \quad (3)$$



Obr. 5 Závislost  $C$  na hloubce  $h$  pro různé oceli při rychlosti posuvu řezné hlavy  $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$



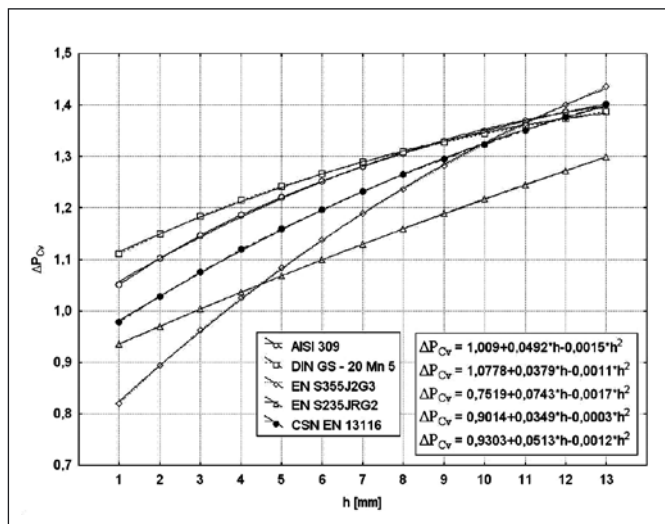
Obr. 6 Závislost  $C$  na hloubce  $h$  pro různé oceli při rychlosti posuvu řezné hlavy  $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Tento poměr potom současně vyjadřuje míru, resp. stupeň změny (alterace) pružnosti materiálu v řezu a taktéž jeho tažnosti. Toto jsou základní předpoklady pro dosažení menší drsnosti povrchu řezné stěny i pro dosažení větší hloubky řezu v daném materiálu. Pro názornost uvádíme tab. 1, kde  $\Delta P_{Cvmax}$  vyjadřuje teoretický nárůst plasticity materiálu vlivem snížení postupové rychlosti posuvu řezné hlavy z  $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  na  $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Nárůst relativního zplastičení materiálu současně představuje pokles drsnosti povrchu a prodloužení hloubky řezu. Na obr. 7 uvádíme závislost  $\Delta P_{Cv}$  na hloubce  $h$  pro různé materiály. Pro názornost je zde uvedena ke každé křivce regresní rovnice. Jak je patrné z obr. 7 dostáváme polynommické funkce druhého řádu. Vypočtením extrému

Tab. 1 Změna plasticity materiálu vlivem rychlosti posuvu řezné hlavy

Materiál	$E$ [MPa]	$h_{\max 50}$ [mm]	$h_{\max 200}$ [mm]	$\Delta P_{Cvmax}$
ČSN 11 375	123820	57,2	29,8	1,9
ČSN 42 2712	133140	20,9	13,7	1,5
ČSN 11 503	160120	20,4	13,5	1,5
ČSN 17 251	173000	15,4	11,1	1,4
ČSN 13 116	188950	16,2	11,6	1,4

těchto funkcí určíme teoretickou maximálně dosažitelnou hloubku  $h_{\max}$  pro tento materiál při daném technologickém režimu. V tab. 1 jsou tímto způsobem výpočtu predikovány teoreticky dosažitelné hloubky materiálu  $h_{\max 50}$  a  $h_{\max 200}$  pro obě uvedené rychlosti a studované materiály. Takovýmto způsobem lze postupovat pro odvození optimální postupové rychlosti  $v_{\text{opt}}$  řezné hlavy a jí odpovídající optimální dořezané hloubky  $h_{\text{opt}}$  pro daný typ materiálu.



Obr. 7 Závislost  $\Delta P_{Cv}$  na hloubce  $h$  pro různé materiály při rychlosti posuvu řezné hlavy  $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

## 5. ZÁVĚR

Pro hodnocení povrchu vytvářeného technologií abrazivního vodního paprsku (AWJ) s cílem zvýšit efektivnost této technologie jsme navrhli využití parametru  $C$ , což je statistický parametr získaný dekompozicí hodnot  $RMS_s$  podle pásem prostorových frekvencí povrchu. Tento parametr vyjadřuje relativní obsah vlnitosti k celkovému obsahu všech nerovností v jednotlivých profilech povrchu měřených v různých hloubkách řezu kolmo na původní rovinu řezu (viz vztah (1)). Parametr  $C$  se mění v závislosti na materiálu a technologických parametrech, zejména na postupové rychlosti řezné hlavy. Jde o diskretní parametr, kterým lze kontrolovat a řídit postupovou rychlost řezné hlavy v závislosti na požadované jakosti řezné stěny. Parametr  $C$  bude možno využít pro zpětnou vazbu v automatizovaném řezném procesu, tedy při on-line řízení řezání různých materiálů technologií AWJ. Z provedených analýz plyne, že parametr  $C$  a i další zavedený parametr  $\Delta P_{Cv}$  reagují dobře na změnu postupové rychlosti řezné hlavy  $v$  i na materiálové parametry. Mohou tak sloužit pro predikci maximální hloubky, které lze dosáhnout při daných technologických parametrech řezání a taktéž pro odvození teoretického vztahu pro volbu optimální postupové rychlosti  $v_{\text{opt}}$  řezné hlavy a predikci optimální hloubky  $h_{\text{opt}}$  pro daný

materiál. Obou hodnot  $C$  a  $\Delta P_{Cv}$  lze tedy dobře využít pro kontrolu vytváření řezné stěny a zvýšení její jakosti a tedy i pro zlepšení výkonu a celkové ekonomiky obráběcího procesu technologií AWJ.

## Poděkování

Práce vznikla za podpory interního grantu IGS-HGF VŠB TUO-2007 (25 %), VEGA 1/4157/07 (25 %), MŠMT č. MSM6198910016 (25 %) a MSM 0021630518 (25 %).

## Literatura

- [1] Bumbálek, B., Odvody, V., Ošťádal, B.: Drsnost povrchu. Praha, SNTL 1989.
- [2] Mlčoch, L., Slimák, I.: Řízení kvality a strojírenské metrologie. Praha, SNTL 1987.
- [3] Pernikář, J., Tykal, M., Vačkář, J.: Jakost a Metrologie. Brno, Akademické vydavatelství CERM 2001.
- [4] Vlado M., Kollerová M.: Zvyšovanie úžitkových vlastností pásov z plynulo odlievaných brám. Hutnické listy, 1989, 4, s. 258 - 265.
- [5] Kollerová M., Vlado M.: Vplyv teplotného a deformačného faktoru v procese valcovania plynulo odlievaných brám na distribúciu sulfidických vtrúsenín a jadrové segregácie. Hutnické listy, 1990, 6, s. 387 - 391.
- [6] Krajný, Z.: Vodný lúč v praxi WJM. Mračko – Bratislava, 1998.
- [7] Kadnár, M., Rusnák, J.: Teoretický výpočet hrúbky mazacieho filmu pri elasto-hydrodynamickom mazaní. In: sborník z medzinárodnej vedeckej konferencie poriadanej počas konania 11. medzinárodného strojárkeho veľtrhu v Nitre, Nitra, 2004, s. 55 - 58.
- [8] ČSN EN ISO 4287.
- [9] ČSN EN ISO 4288.
- [10] Valíček, J., Držík, M., Ohlídal, M., Mádr, V., Hlaváč, L. M.: Optical method for surface analyses and their utilization for abrasive liquid jet automation. In Proceedings of the 2001 WJTA American Waterjet Conference, M. Hashish (ed.), WJTA, Minneapolis, Minnesota, 2001, p. 1 - 11.
- [11] Valíček, J., Držík, M., Ohlídal, M., Hlaváč, L. M.: Application of optical methods for analyses of surfaces made by abrasive liquid jet. In METAL 2001 – Proceedings of the 10th International Metallurgical and Materials Conference, TANGER spol. s.r.o., Ostrava, 2001, paper 104, p. 1 - 7.
- [12] Valíček, J., Louis, H., Schenk, A., Držík, M., Hlaváč, L. M., Chlpič, J.: Utilization of the optical methods for analyses of cutting edges. BHR Group, 2004, p. 487 - 501.
- [13] Hashish, M.: Modeling Study of Metal Cutting with Abrasive Waterjets. Trans. of the ASME, Journal of Eng. Mat&Tech, Vol. 106, No. 1, 1984.
- [14] Valíček, J., Hloch, S.: Optická identifikace topografie povrchu obrobeného abrazivním vodním paprskem. In: Jemná mechanika a optika. Vol. 51, No. 11-12 (2006), p. 320 - 322. ISSN 0447-6441.

Ing. Jan Valíček, Ph.D., Institut fyziky, Hornicko geologická fakulta, VŠB Technická Univerzita Ostrava, Tř. 17. listopadu 15/2171, 708 33 Ostrava – Poruba, tel.: +420-59-7323 128, fax.: +420-59-6918 589, e-mail: valicek.jan@vsb.cz

Ing. Sergej Hloch, Ph.D., Katedra prevádzky technologických systémov, Fakulta výrobných technológií, TU v Košiciach so sídlom v Prešove, Štúrova 31, 080 01 Prešov, Slovenská republika, tel.: +421-51-77-23504, fax.: +421-51-77-33453, e-mail: hloch.sergej@fvt.sk

Doc. RNDr. Miloslav Ohlídal, CSc., Odbor optiky a přesné mechaniky, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2, 616 96 Brno, tel.: +420-541-142820, fax.: +420-541-142842, e-mail: ohlidal@fme.vutbr.cz

Petr Hlaváček, Institut fyziky, Hornicko geologická fakulta, VŠB Technická Univerzita Ostrava, Tř. 17. listopadu 15/2171, 708 33 Ostrava – Poruba, tel.: +420-59-7323 128, fax.: +420-59-6918 589, e-mail: shlas@seznam.cz

Mgr. Kateřina Páleníková, Odbor optiky a přesné mechaniky, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2, 616 96 Brno, tel.: +420-541-142820, fax.: +420-541-142842, e-mail: katannpal@email.cz



# Chytrý senzor pozná formát digitální fotografie

Nový drobný optomechanický senzor společnosti Osram, dceřiné společnosti firmy Siemens, pozná, zda je nakloněn vertikálně, nebo horizontálně. Jím vybavený digitální fotoaparát by proto například mohl „vědět“, kdy snímek vzniká na výšku či na šířku. Pokud by byl fotoaparát vybaven odpovídajícím softwarem, mohl by snímky ihned uložit ve správné orientaci a uživatel by nemusel fotoaparát otáčet, aby snímek viděl správně. Navíc by uživatel neotrávil spoustu času otáčením snímků na monitoru poté, co si fotografie přehrál na počítač. Nový orientační senzor byl vyvinut firmou Osram, která jej nedávno předvedla na mnichovském veletrhu Electronica. Senzor je zejména vhodný pro použití v mobilních přístrojích, například v mobilních telefonech, MP3 přehrávačích a digitálních fotoaparátech.

Nový senzor s označením SFH 7710 je malý, energeticky nenáročný komponent s digitálním výstupem. Senzor měří 4,4 x 4,4 mm a je 1,8 mm vysoký. K provozu potřebuje napájení 2,5 V a velmi malý proud ( $I_{\text{mean}}$  v průměru 50  $\mu\text{A}$ ), tak pro baterii fotoaparátu či mobilního telefonu nepředstavuje velkou zátěž.

Senzor používá drobnou kovovou kuličku a světelnou závoru. Kulička o průměru menším než jeden milimetr se může volně pohybovat přednastavenou cestou a její pozici ovlivňuje pouze gravitační síla. Světelná závoru je zablokovaná, pokud se kulička nachází na jednom konci cesty. Její přemisťování na druhý konec umožňuje signálům dostat se k přijímači světelné závoru. Digitální signál zpracovává software fotoaparátu, který snímek při ukládání do paměti otočí do správné pozice. Fotografie se proto na displeji fotoaparátu automaticky objeví ve správném formátu. Senzor je navržen tak, aby se vešel do velmi malých přístrojů, a dokáže určit, zda je nakloněn doprava nebo doleva. K pokrytí obou těchto směrů jsou zapotřebí dva senzory, tři stačí k určení, jak přesně je přístroj orientován trojrozměrně.

Více informací o optometrickém senzoru SFH 7710 naleznete na [www.osram-os.com](http://www.osram-os.com).

Siemens patří mezi největší globální elektrotechnické a elektronické koncerny. Společnost zaměstnává téměř 475 000 odborníků, kteří vyvíjejí a vyrábějí produkty, navrhují a instalují komplexní řešení na míru dle požadavků zákazníků a nabízejí širokou paletu



služeb dle jejich individuálních potřeb. Siemens nabízí svým zákazníkům ve 190 zemích inovativní technologie a komplexní know-how. Společnost byla založena před 159 lety a působí v oblastech informace a komunikace, automatizace a pohony, energetika, doprava, zdravotnictví a osvětlení. V obchodním roce 2005/2006 (skončil 30. září 2006) firma Siemens dosáhla obratu 87 miliard EUR a čistého zisku 3,1 miliardy EUR.

Zastoupení společnosti Siemens AG v České republice bylo obnoveno v roce 1990. V současné době patří Siemens s více než 15 800 zaměstnanci mezi největší zaměstnavatele v ČR. V obchodním roce 2005/2006 vykázala skupina podniků Siemens v České republice obrat 58,6 miliard Kč. Siemens v České republice působí v těchto hlavních oblastech: automatizace a řízení, doprava, energetika, informace a komunikace, osvětlení a zdravotnictví.

Více informací najdete na internetových adresách <http://www.siemens.com> a <http://www.siemens.cz>.

(mp)

## Správa o Stavebných veľtrhoch Brno

Úspech na medzinárodnom veľtrhu osvetľovacej techniky, elektroinštalácií a systémovej integrácie budov v areáli výstavniska Veľtrhy Brno, a. s. prináša predovšetkým dialóg s potenciálnymi zákazníkmi a optimálne pracovné podmienky pre vystavovateľov. Účelové prepojenie veľtrhov IBF (medzinárodný stavebný veľtrh), SHK BRNO (medzinárodný veľtrh technických zariadení budov), ELEKTRO (kontakt na adrese [mmach@bv.cz](mailto:mmach@bv.cz)) a URBIS INVEST (medzinárodný veľtrh investícií, financií, realít a technológií pre mestá a obce), ako aj konferencia Svetlo a osvetlenie s medzinárodnou účasťou s názvom Prezentácia modernej osvetľovacej techniky najvyššej akosti na veľtrhu ELEKTRO 2007 sú dôkazom významného postavenia Stavebných veľtrhov Brno 2007 v Českej a Slovenskej republike. V ponuke príspevkov konferencie sú: Počítačový program DIALux 4.3 pre návrh osvetlenia; Meracie prístroje pre meranie fotometrických údajov svetelných zdrojov a svietidiel predstavuje firma TechnoTeam; Elektronická revolúcia v oblasti napájania svetelných zdrojov; Nielen informácie o výrobnom programe spoločnosti BRILUX, ale aj praktické skúsenosti z osvetlenia pozemných komunikácií; Neobyčajné efekty osvetlenia Moskvy s využitím dlhoročných skúseností spoločnosti SvetoServiS; Núd-

zové osvetlenie – nedeliteľná súčasť inštalácie verejných budov a nakoniec nové trendy osvetľovacej techniky. Medialní partneri konferencie so zahraničnou účasťou sú Elektrotechnika v praxi, Jemná mechanika a optika, Phil (doteraz AURA), Osvětlení INFO a ElektriKa.cz. **Konferencia Svetlo a osvetlenie sa bude konať 20. apríla 2007** v Kongresovom centre Brno, a. s. od 9,00 do 14,00 hod. Ďalšie zaujímavé informácie o Stavebných veľtrhoch Brno nájdete online na stránke [www.bvv.cz/elektro](http://www.bvv.cz/elektro).

Brno je známe tým, že je hlavným mestom veľtrhov a veľtržná správa spoločnosti Veľtrhy Brno, a. s. je lídrom nielen v Českej republike, ale aj v rámci stredo európskeho regiónu (z výsledkov uvedených na [www.vystavy.sk](http://www.vystavy.sk) a [www.veletrhyavystavy.cz](http://www.veletrhyavystavy.cz)). Na výstavnisku v Brne sa každoročne predstaví asi 12 300 firiem a areál navštívi okolo 1,1 mil. odborných návštevníkov. Vo výstavnom centre sa organizuje dovedna 48 veľtržných podujatí (ktoré sú auditované podľa jednotlivých kritérií), z toho je 24 veľtrhov dokázateľne jednotkou v rámci stredo európskeho regiónu. Už niekoľko rokov je majoritným vlastníkom výstavniska Veľtrhy Brno, a. s. spoločnosť Messe Düsseldorf ([www.messe-duesseldorf.de](http://www.messe-duesseldorf.de)). Z uvedeného je na prvý pohľad zrejmé, že v spoločnosti Veľtrhy Brno, a. s. pôsobia motivovaní a kvalifikovaní manažéri.

Ponuka kvalitních výstavních služeb pro vystavovatele a návštěvníky odborných veletrhů v areálu výstavního centra Veletrhy Brno, a. s. sa porovnáva s kvalitou popredných veľtržných centier v starých členských krajinách EÚ. Každý pavilón na výstavisku v Brne jednoznačne spĺňa požadované technické, bezpečnostné a prevádzkové parametre, ako aj parametre komfortu. Významnú úlohu pri komunikácii vystavovateľov s návštevníkmi a novinármi zohráva tlačové centrum (dpokorny@bv.v.cz).

Výstavisko Veletrhy Brno, a. s. má výhodnú geografickú polohu v strede Európy. Dopravné spojenia k veľtržnému centru tvoria pre osobné autá diaľnica a cesty I. triedy, autobusové a vlakové spojenia a medzinárodné letisko s pravidelnou medzinárodnou

prevádzkou. Parkoviská vo výstavnom centre a mimo výstavného areálu a dopravné spojenia v rámci mesta s MHD umožňujú ľahký a pohodlný prístup na výstavisko v Brne. Počet a kvalita ubytovacích zariadení v blízkosti výstavníka, historické pamiatky, divadlá a iné zaujímavosti tiež priaznivo ovplyvňujú počet vystavovateľov a návštevníkov, ich spokojnosť a pochopiteľne vernosť horeuvedeným veľtrhom, ktoré sa budú konať pod jednou strechou v dňoch **17. až 21. apríla 2007.**

*Prof. Ing. Pavol Horňák, DrSc.  
odborný garant konferencie*

## Mikrosystémová technologie na HANNOVER MESSE



Na svetově největším výstavišti, v zemi s největším exportem, se bude konat ve dnech 16. až 20. dubna 2007 na světě největší průmyslový veletrh HANNOVER MESSE 2007. Pod heslem **Svět inovačních technologií v srdci Evropy** se souběžně představí 13 mezinárodních vedoucích a odborných veletrhů. Ústředními tématy jsou průmyslová automatizace, technika pohonů, fluidní technika, energetika, subdodávky, služby a technologie budoucnosti. Je očekáváno přes 6150 vystavovatelů z 68 zemí na 204 000 m<sup>2</sup> užité výstavní plochy a 200 000 návštěvníků.

Veletržní správa Hannover Messe AG rozdělila celé veletržní dění podle významu a počtu vystavovatelů do samostatných specializovaných veletrhů, které rozmístila do všech 27 výstavních hal výstaviště:

- **INTERKAMA+** – největší přehlídka automatizace v Evropě
- **Factory Automation** – výrobní automatizace
- **MDA** – pohony a automatizace
- **Energy** – energetické hospodářství, energetika a obnovitelné zdroje energie
- **Industrial Building Automation** – technická zařízení budov
- **ComVac** – stlačený vzduch a vakuová technika
- **Surface Technology mit Powder Coating Europe** – úprava povrchů, pokovování a práškové nanášení
- **Pipeline Technology** – technologie dálkových potrubí
- **Subcontracting** – dodávky a dohody
- **Digital Factory** – integrované výrobní procesy
- **Industrial Facility Management & Services** – průmyslový servis a služby
- **MicroTechnology** – mikrosystémová technika
- **Research & Technology** – výzkum a technologie

Veletrhy představí podniky z celého světa, meziodvětvové technické inovace, aktuální trendy a nejnovější know-how pro všechny významné průmyslové obory. Budou zde představeny nejen nejnovější výrobky, nýbrž obzvláště jejich propojení a vzájemná

souhra. Prezентuje kompletně nové technologie a celé průmyslové technologické řetězce. Návštěvníci naleznou řešení úkolů téměř ze všech průmyslových oborů v jedinečné výstavní rozmanitosti.

Pro veletrh bylo letos za partnerskou zem vybráno Turecko s velkým tržním a růstovým potenciálem, velkou inovační silou a rozmanitými výkony v průmyslu. Z této země je očekáváno asi 6000 návštěvníků. Až 200 vystavovatelů obsadí více než 5000 m<sup>2</sup> užité výstavní plochy. V jejich výstavním programu má být ukázkový výběr technologických inovací z různých průmyslových odvětví. Zvláštní pozornost bude zaměřena například na výzkum a vývoj, automatizaci spojitých technologických procesů, automatizaci budov, energetické a ropovodní technologie.

HANNOVER MESSE je každý rok významným mezinárodním místem setkání představitelů s rozhodovacími kompetencemi z průmyslu, vědy, ekonomiky a politiky. I letos bude nejlepší příležitostí pro přímé kontakty a přenos znalostí mezi uživateli technologií, vystavujícími firmami a vývojáři z celého světa. K tomu se nabízejí stovky mimořádných akcí, tematické výstavní oblasti, informační fóra, kongresy a odborné přednášky v rámci jednotlivých vedoucích a odborných veletrhů.

Významné veletržní akce „World Energy Dialogue“ letos podruhé doprovází fórum Energy. Vysoce odborné mezinárodní diskuzní fórum pro experty z oblasti energetiky se uskuteční 17. až 19. dubna 2007 na výstavišti v zasedacím centru Convention Center. Stěžejními tématy konference bude energetická efektivnost a udržitelnost zásobování energií v budoucnosti pomocí vyvážené směsice energií.

Další zajímavé informace o dění na výstavišti lze najít na internetových stránkách [www.hannovermesse.de](http://www.hannovermesse.de). Zájemci o návštěvu veletrhu si mohou zakoupit v předprodeji vstupenky a katalogy za zvýhodněné ceny u výhradního zastoupení Deutsche Messe AG Hannover v ČR, Ing. Eva Václavíková, Myslbekova 7, 169 00 Praha 6, tel./fax: 220 510 057, e-mail: [info@hf-czechrepublic.com](mailto:info@hf-czechrepublic.com).

(jpe)

# CONTENTS

---

<b>Corrosion resistance testing of diamond layers deposited on magnesium alloys by PACVD method</b> (M. Gołabczak, S. Mitura).....	63
<b>Carbon nanostructures produced using MW/RF plasma</b> (W. Kaczorowski) .....	64
<b>Diamond bioactivity</b> (K. Bakowicz-Mitura) .....	67
<b>Application of diamond-like films in medicine</b> (Š. Tůmová, Z. Rožek, P. Louda).....	69
Diamond-like films exhibit specific properties, high hardness, low friction coefficient, good thermal conductivity and especially chemical inactivity and excellent corrosion resistance. All these characteristics of nanocrystalline diamond (NCD) including its high bio-activity allow its successful use as a protection layer in medicine applications. Key words: Diamond-like films, DLC layers, NCD layers	
<b>Considerable anniversary of Ing. Jan Kůra</b> (red.) .....	70
<b>Nanophotonical methods of the mutual conversions of optical radiations and surface plasmons in a dielectric-metal interface</b> (J. Pospíšil, J. Hrdý, J. Hrdý, jr.).....	74
The article is directed to the nanophotonics dealing with optical, electrooptical and optoelectrical phenomena under standpoint of photons and photon flows and their control in nanomaterials and optical and electronical nanosystems. It deals with relationship between the electromagnetic (photonic) radiation and plasmons which mutual conversions belong to fundamental phenomena of the plasmon nanophotonics, together with propagation and detection of plasmons. After linearized mathematical representation of plasmons, the article presents examples of two basic concrete methods for effective mutual conversion (coupling) of the optical radiations and surface plasmons in the nanophotonical system formed by a dielectric-metal interface.	
<b>TAE 2007 (Trends in Agricultural Engineering)</b> (M. Libra).....	78
<b>Magnetic force microscopy and its aptitude for nano-magnetic studies</b> (A. Hendrych, R. Kubínek, M. Vůjtek).....	79
The last two decades mark a huge progress of the scanning probe microscopy (SPM). Specific techniques, like scanning tunneling microscopy (STM), atomic force microscopy (AFM), magnetic force microscopy (MFM) etc. merely approved their uniqueness in achieving a submicron resolution. The magnetic force	

microscopy represents one of the most elegant methods to study surface magnetic properties with high resolution and easily prepared specimen. The present paper is lightning up some recent MFM-related studies performed in the field of nano-magnetic imaging and bioapplications.

**Measurement and analysis of the roughness of metal material surfaces generated by the abrasive waterjet** (J. Valíček, P. Hlaváček, S. Hloch, M. Ohlídal, K. Páleníková)..... 86  
Paper deals with a study of surface quality produced by abrasive water-jets with the aim to increase the quality of the surfaces. To measure surface irregularities, a contact-less optical shadow method was used. A criterion for the evaluation of cut wall value, suitable also for automated on-line control, was derived. It is a dimensionless statistical parameter C for a certain material of workpiece, the discrete value of which may contribute to the control of traverse speed of a cutting head, in the automated system of feedback.

**Smart sensor identifies a format of digital photo** (mp) ..... 90

**Information about civil engineering fairs in Brno**  
(P. Horňák) ..... 90 |

**Micro-system technology in HANNOVER MESSE**  
(jpe)..... 91 |

---

## ANOTACE

---

**Vliv plazmového obrábění na mechanické vlastnosti uhlíkových PAN vláken** (H. Sarraf, P. Louda)..... 71  
V této práci jsou fyzikálně zkoušeny povrchy polyakrylonitrilových (PAN) vláken pomocí chladného plazmatu v argonové a kyslíkové atmosféře s cílem modifikovat a zdokonalit mechanické vlastnosti uhlíkových vláken používaných ve zpevněných polymerových kompozitech- Fyzikální a morfologické změny povrchů byly zkoušeny na pevnost v tahu a pomocí rastrovací elektronové mikroskopie (SEM). Bylo zjištěno, že obrábění kyslíkovým plazmatem způsobilo ablaci povrchu uhlíkového vlákna odstraněním uhlíkových atomů v molekulách CO a CO<sub>2</sub>. Argonové plazma kromě toho eliminovalo defekty na povrchu vlákna snížením velikosti kritických vad a tím způsobilo zvýšení pevnosti v tahu. Srovnání použitých metod poskytuje široce konzistentní obraz vlivu plazmového obrábění na mechanické vlastnosti.

**Klíčová slova:** Polyakrylonitrilová (PAN) uhlíková vlákna, plazmové obrábění, průtok plynného argonu a kyslíku, napětí v tahu

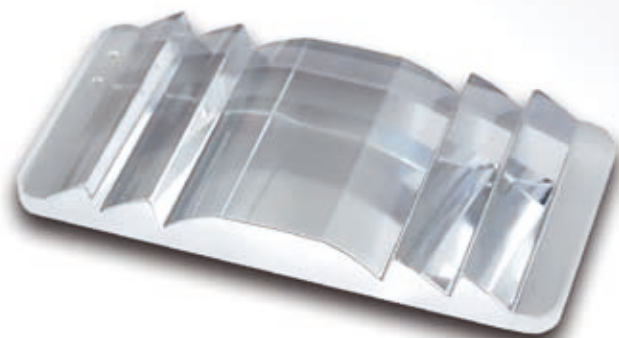




# Více než sklo! More than glass!

Váš partner při zavádění nových technologií, nápadů a myšlenek ve sklářství.

1. .... ASFÉRIČKÉ ČOČKY PRO SVĚTELNÉ APLIKACE
2. .... FINÁLNĚ LISOVANÉ ČOČKY
3. .... SKLENĚNÉ HRANOLY PRO OSVĚTLOVACÍ ÚČELY
4. .... ČOČKY PRO LED a OPTOELEKTRONIKU
5. .... TECHNICKÉ LISOVANÉ SKLO
6. .... REKLAMNÍ SKLENĚNÉ PŘEDMĚTY



**Jablonec nad Nisou**

GPS : 50°44'46.1" - 15°10'3.0"

**EcoGlass, s.r.o.**

Arbesova 66a

466 04 Jablonec nad Nisou

Czech republic

GPS : 50°44'46.1" and 15°10'3.0"

Tel.: +420 483 316 821

Fax: +420 483 306 513

Web: [www.ecoglass-optic.com](http://www.ecoglass-optic.com)



## WORLD OF ELECTROTECHNICS AND ELECTRONICS

Elektronické prvky a moduly - Zařízení pro výrobu a rozvod elektrické energie - **Elektroinstalační technika** - Vodiče a kabely - **Pohony a výkonová elektronika** - Měřicí a zkušební technika - **Automatizační, řídicí a regulační technika** - Osvětlovací technika - **Elektrotepelná technika** - Síťové služby - **Radiokomunikační technika** - Výpočetní technika - **Zvuková a obrazová technika** - Stroje, zařízení, nářadí a pomůcky pro elektroniku a elektrotechniku - **Elektronické prvky a moduly** - Zabezpečovací technika - **Systémová technika budov** - **Elektroinstalační technika** - Vodiče a kabely - **Pohony a výkonová elektronika** - Měřicí a zkušební technika - **Automatizační, řídicí a regulační technika** - Osvětlovací technika - **Elektrotepelná technika** - Zabezpečovací technika a systémová technika budov - **Telekomunikace** - Síťové služby - **Radiokomunikace**

# AMPER

15. mezinárodní veletrh elektrotechniky a elektroniky

**27. - 30. 3. 2007** 9:00 - 17:00

Pražský veletržní areál Letňany

[www.amper.cz](http://www.amper.cz)

Zájem firem z oblastí elektrotechniky a elektroniky o navazování kontaktů a vytváření nových obchodních příležitostí na území České republiky již několik let trvale roste. Obdobně roste i veletrh AMPER a zvláště v posledních letech se stal skutečně významnou událostí. Vystavovatelé se na veletrhu podobného rozsahu chtějí představit v celé šíři záběru sortimentu firmy a prezentovat kreativitu i sílu spolu s obchodním a výrobním potenciálem. Již nyní jsou překonané úspěchy roku 2006. Čistá veletržní plocha přesáhla rozlohu 19 000m<sup>2</sup>, což znamená také nutnost vybudování další veletržní haly, která doplní rozlohu Pražského veletržního areálu v Letňanech o plochu nejméně 2 800m<sup>2</sup>. Necháme se překvapit, zda 15. ročník spojený s bohatým doprovodným programem, který je stejně jako veletrh určen především široké odborné veřejnosti, způsobí významnější nárůst návštěvnosti. Věříme ale, že AMPER bude jednotkou úspěchu všech vystavovatelů i návštěvníků. Těšíme se na Vás!