

9

2008

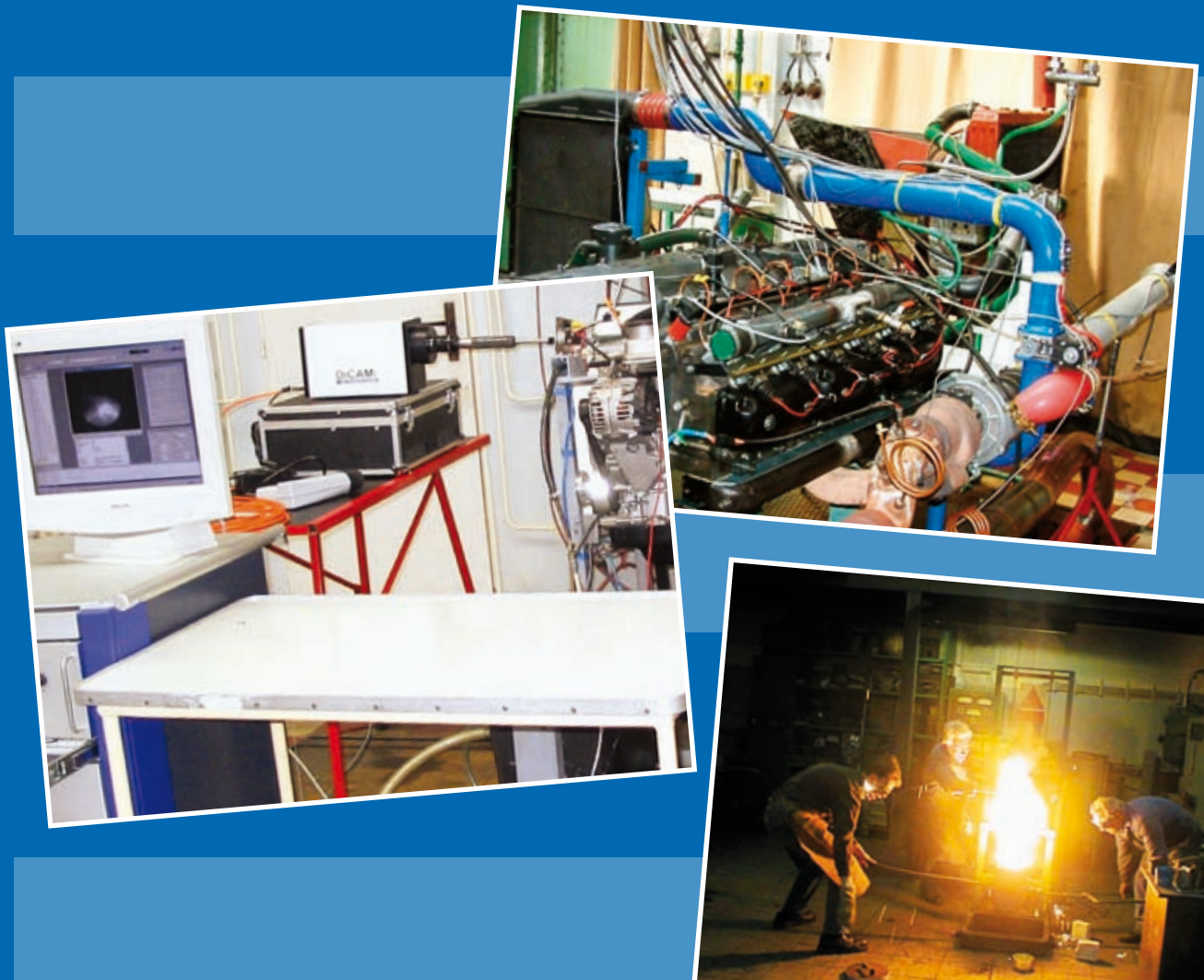
JMO

JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA FINE MECHANICS AND OPTICS

Technická univerzita v Liberci, Studentská 2, 461 17 Liberec

LIBEREC

■ 55. výročí Strojní fakulty TU v Liberci





**Fakulta
strojn**

Technická univerzita v Liberci

FAKULTA STROJNÍ TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

<http://www.fs.tul.cz/>

Katedra energetických zařízení – KEZ

<http://www.kez.tul.cz>

Mechanika tekutin a termodynamika, energetické stroje, zařízení pro tepelnou techniku, solární energetiku, klimatizaci, ochranu životního prostředí, obnovitelné energetické zdroje, energetické využití odpadu, numerické modelování v dynamice tekutin i v přenosu tepla a hmoty.

Katedra aplikované kybernetiky – KKY

<http://www.kky.tul.cz>

Informační technologie v oblasti programování u operačních systémů. Předměty v oblasti spojitého, diskrétního a logického řízení, identifikace technologických procesů, řešení průběžnými metodami, identifikace on-line a metody identifikace off-line.

Katedra mechaniky, pružnosti a pevnosti – KMP

<http://www.kmp.tul.cz>

Technická mechanika, tj. statika, kinematika, dynamika, pružnost a pevnost. Řeší výzkumné úkoly v dynamice (vibroizolace, automobilové podvozky a sedačky), mechanice pryžových kompozitů (tlumiče) a biomechanice (mechanika kůže, cév).

Katedra materiálů – KMT

<http://www.kmt.tul.cz>

Disciplíny materiálového inženýrství. Teorie nauky o materiálu v bakalářském studiu, v magisterském studiu jsou prohlubovány teoretické znalosti materiálových věd včetně aplikací studovaných materiálů v průmyslové praxi. Doktorské studium a výzkum jsou zaměřeny na nanopovrchové úpravy, perspektivní slitiny a kompozitní materiály.

Katedra obrábění a montáže – KOM

<http://www.kom.tul.cz>

Technologie obrábění, montáže, metrologie, projektování technologických postupů i procesů a v oblasti inovačního inženýrství. Výzkum teoretických aspektů procesu obrábění a jejich aplikace, monitorizace obrábění, hodnocení nástrojů a procesů metodami využívajícími akustickou emisi, vývoj inteligentního rezného nástroje.

Katedra vozidel a motorů – KVM

<http://www.ksd.tul.cz>

Teorie i konstrukce motorových vozidel a motorů, použití alternativních paliv (vodík, LPG, zemní plyn), vizualizace a indikace spalování, měření výfukových emisí a výkonových parametrů spalovacího motoru, stabilita a směrové řízení vozidla, měření vibrací a hluku.

Katedra strojírenské technologie – KSP

<http://www.ksp.tul.cz>

Technologické procesy tváření, slévání, svařování a zpracování plastů, aplikace a inovace v praxi především v automobilovém průmyslu. Konstrukce strojů a forem pro technologické procesy, v oblasti navrhování výrobků a aplikace plastů, kompozitů a kovů.

Katedra sklářských strojů a robotiky – KSR

<http://www.ksk.tul.cz>

Aplikace C-technologií, pneumatických pohonů, robotiky a manipulační techniky se zaměřením na technologii, konstrukci a projektování strojů pro sklářský průmysl. Orientace na sklářský průmysl: numerické simulace tvarování skloviny, robotizovaná manipulace s výrobky a aplikace nových metod zpracování průmyslových dat.

Katedra částí a mechanismů strojů – KST

<http://www.kst.tul.cz>

Obecná konstrukce strojů a zařízení. Konstruování, tvorba technické dokumentace, počítačová podpora konstruování. Řízené a neřízené dynamické soustavy, vibroizolace strojů a strojních zařízení, výzkum a vývoj pneumatických pružin, výpočty a optimalizace strojních součástí a mechanismů.

Katedra textilních a jednoúčelových strojů – KTS

<http://www.kts.tul.cz>

Stavba strojů a mechanismů, počítačová a experimentální podpora konstrukce strojů, teorie a stavba textilních strojů. Optimalizace strojů s uplatněním mechatronických prvků a řízených pohonů, zkoumání dynamických vlastností mechanismů s extrémním dynamickým zatížením.

Katedra výrobních systémů – KVS

<http://www.kvs.tul.cz>

Konstrukce výrobních strojů, automatizace, 3D modelování a digitalizace, navrhování a modelování servosystémů, hydraulických prvků a systémů. Projektování výroby počítačovou simulací a virtuální realitou, 3D animace, průmyslové inženýrství, logistika, simulační hry, plánování výroby, návrh pracovišť, řízení lidí.

REDAKČNÍ RADA

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

Členové: RNDr. Ing. Ján BARTL, CSc., ÚM SAV, Bratislava, prof. RNDr. Dr. Zdeněk BOUCHAL, UP, Olomouc, Ing. Igor BREZINA, Bratislava, prof. Ing. Pavol HORNÁK, DrSc., STU, Bratislava, prof. RNDr. Miroslav HRABOVSKÝ, DrSc., SLO UP a FZÚ AV ČR, v.v.i., Olomouc, RNDr. Vladimír CHLUP, Olomouc, RNDr. Lubomír JASTRABÍK, CSc., FZÚ AV ČR, v.v.i., Praha, RNDr. Pavel KLENOVSKÝ, Český metrologický institut, Brno, Ing. Jiří KRŠEK, VUT, Brno, doc. RNDr. Vojtěch KŘESÁLEK, CSc., UTB, Zlín, Ing. Jan KŮR, Mesing, spol. s r.o., Brno, prof. RNDr. Bohumila LENCOVÁ, CSc., ÚPT AV ČR, v.v.i., Brno, prof. 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, RNDr. František MÁČA, CSc., FZÚ AV ČR, v.v.i., Praha, 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, RNDr. Dagmar SENDEŘÁKOVÁ, Ph.D., UK, Bratislava, RNDr. Petr SCHOVÁNEK, SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, 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, v.v.i.: Jan ŘÍDKÝ, CSc.

Odpovědný zástupce vydavatele: prof. RNDr. Miroslav HRABOVSKÝ, DrSc.

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: eva.pelcova@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.

Vychází: 10x ročně (z toho 2 čísla jako dvojčísla)

Předplatné: Celoroční 420,- Kč/rok. Ceny jsou jednotné pro Československou 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 2008

JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA

VĚDECKO-TECHNICKÝ ČASOPIS
ROČNÍK 53 9/2008

OBSAH

55 LET EXISTENCE FAKULTY STROJNÍ (P. Louda) 231

Vliv způsobu chlazení na zbytková napětí v povrchové vrstvě broušených součástí (J. Jersák, Z. Pala, N. Ganev) .. 232

Zkušenosti s REM a EDX analýzou při studiu materiálů (V. Reicheltová)..... 237

Systém objektivního off-line hodnocení vlnitosti plochého skla (V. Hotař) 240

Využití endoskopické vizualizační techniky při výzkumu spalovacích motorů (J. Blažek)..... 242

Broušení čelními stěnami rotujících kotoučů - přenášený moment (R. Vrzala, I. Petriková) 245

Analýza destrukce diamantových brusných kotoučů (A. Popov) 247

Geometrické aspekty drsnosti povrchu klasických a netradičních technologií (J. Valíček, J. Rusnák, M. Müller, P. Hrabě, M. Kadnár, S. Hloch, M. Kušnerová)..... 249

Damascenská ocel – středověký kompozit z pohledu současnosti (M. Polák)..... 253

Z technické knihovny (I. Brezina) 255

Bližší informace o poslání časopisu, pokyny pro autory, obsah časopisu apod. je uveden na internetu:

<http://www.fzu.cz/struktura/casopisy/jemnam/jemname.php>

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.), Pavol HORNÁK - 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.), Pavel KLENOVSKÝ - Czech Metrology Inst., Brno (Czech Rep.), Jiří KRŠEK - Tech. Univ., Brno (Czech Rep.), Vojtěch KŘESÁLEK - Tomas Bata Univ. in Zlín (Czech Rep.), Jan KŮR, Mesing, spol. s r.o., Brno (Czech Rep.), Bohumila LENCOVÁ - Inst. of Scientific Instruments of Czech Academy of Science, Brno (Czech Rep.), Martin LIBRA - Czech Univ. of Agric. Praha (Czech Rep.), Miroslav LIŠKA - Tech. Univ., Brno (Czech Rep.), Zdeněk LOŠŤÁK - Meopta-optika, s.r.o., Přerov (Czech Rep.), Petr LOUDA - Tech. Univ., Liberec (Czech Rep.), František MÁCA, Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Praha (Czech Rep.), Vladimír MATELA - Meopta-optika, s.r.o., Přerov (Czech Rep.), Monika MÍČHALOVÁ, PHILIPS Slovakia s.r.o., Bratislava (Slovak Rep.), Miroslav MILER - 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.), Dagmar SENDEŘÁKOVÁ - Comenius Univ., Bratislava (Slovak Rep.), Petr SCHOVÁNEK - Joint Lab. of Optics of Palacky Univ. and Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Olomouc (Czech Rep.), Karel STUĐNOVSKÝ - 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: Jan ŘÍDKÝ

Editor: Miroslav HRABOVSKÝ

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: eva.pelclova@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 2008

FINE MECHANICS AND OPTICS

SCIENTIFIC-TECHNICAL JOURNAL
VOLUME 53 9/2008

CONTENTS

**55 YEARS OF FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING,
TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC (P. Louda) 231**

**The Effect of Cooling Process on Residual Stresses
in a Surface Layer of Ground Components
(J. Jersák, Z. Pala, N. Ganev)..... 232**

**Experience with REM and EDX analyse at study materials
(V. Reicheltová)..... 237**

**Objective off-line method for evaluation of flat glass
corrugation (V. Hotař) 240**

**USING ENDOSCOPIC VISUALIZATION EQUIPMENT AT THE
COMBUSTION ENGINES RESEARCH (J. Blažek) 242**

**Grinding of Friction Discs Front Faces - Transmitted
Torque (R. Vrzala, I. Petriková)..... 245**

**Analysis of the diamond grinding wheels destruction
(A. Popov) 247**

**Geometrical aspects of surface roughness in classical and
unconventional technology (J. Valíček, J. Rusnák, M. Müller,
P. Hrabě, M. Kadnár, S. Hloch, M. Kušnerová)..... 249**

**Damascus steel – medieval composite from the view of
nowadays (M. Polák) 253**

From technical library (I. Brezina) 255

For further information about the journal intention, instructions for authors, contents etc. please refer to <http://www.fzu.cz/struktura/casopisy/jemname.php>.

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

55 LET EXISTENCE FAKULTY STROJNÍ

Historie

Fakulta strojní jako přímý následovník Vysoké školy strojní v Liberci, jež byla založena na základě výnosu Ministerstva školství ČR ze dne 03. 09. 1953, je nejstarší fakultou Technické univerzity v Liberci. Výuka na VŠS byla zahájena 01. 10. 1953. Toto datum je současně datem vzniku první vysokoškolské instituce v severních Čechách. Mezi pedagogy fakulty pracovala řada vědeckých osobností, které po sobě zanechaly významnou stopu v podobě nových odborných poznatků a především zapálených pokračovatelů své práce, tedy svých studentů a asistentů. Fakulta vždy byla významným partnerem průmyslové sféry v regionu a k tomuto svému těsnému sepětí s regionem se hrdě hlásí. Právě propojení akademického prostředí s průmyslovou praxí je nezbytnou podmínkou inovačního růstu „podještědské kotliny“.



Přítomnost

K dnešnímu dni, tj. za 55 let své existence, „vyprodukovala“ nejprve VŠS a následně FS více než 8 500 absolventů. Absolventů, kteří svým vysokým počtem reprezentují značný odborný potenciál v průmyslové praxi i akademickém prostředí nejen ve zdejším regionu, ale v celé ČR a mnozí též v zahraničí. Je jistě společným zájmem nás všech, aby se jejich počet i nadále zvyšoval.

Současný trh práce pocítuje značný nedostatek kvalifikovaných techniků a tato skutečnost se může stát omezujícím faktorem dalšího růstu průmyslové výroby v ČR. Samozřejmě deficit techniků na trhu práce nás nemůže vést ke snižování nároků na kvalitu našich studentů, už proto, že konkurenční prostředí, jež nás obklopuje, zavazuje k odpovědnému pohledu do budoucnosti, tedy jak co nejlépe přizpůsobit výuku strojních inženýrů podmínkám moderní průmyslové výroby ve společném evropském prostoru, v němž se nacházíme. V současné době studuje na FS více než 2000 posluchačů, to je nejvíce v celé historii fakulty.



Budoucnost

Fakulta předpokládá i do budoucna svůj další rozvoj s výrazným zřetelem na vědeckou složku aktivit svých pedagogických pracovníků s významnými publikačními výstupy. Nezbytným předpokladem růstu vědeckovýzkumné kapacity bude stále intenzivnější zapojování studentů doktorských a magisterských studijních programů do výzkumných projektů na katedrách. Internacionalizace vědeckých i pedagogických aktivit je nezbytnou podmínkou pro mezinárodně uznávanou instituci, jakou liberecká strojní fakulta rozhodně chce být. Perspektiva studia na fakultě v sobě obsahuje velmi zajímavou tvůrčí práci strojního inženýra stejně jako i jistotu uplatnění na trhu práce.

Závěr

Fakulta strojní dnes představuje významnou vědeckovýzkumnou instituci libereckého regionu s dosahem daleko přesahujícím jeho hranice. Do dalších let je třeba fakultě přát řadu trpělivých a moudrých mistrů, jakož i mnoho zvědavých a vědychtivých žáků. A též vedle štěstí také co nejméně negativních a nemoudrých zásahů „zvenčí“.

Petr Louda

Vliv způsobu chlazení na zbytková napětí v povrchové vrstvě broušených součástí

Technologické procesy a pracovní podmínky při obrábění ovlivňují vlastnosti povrchové vrstvy strojních součástí. Tato vrstva následně ovlivňuje kvalitu strojních dílů, především z hlediska jejich odolnosti při dynamickém namáhání, tedy přímo určuje životnost a spolehlivost dané součásti. Cyklicky (tepelně nebo mechanicky) je namáhána celá řada exponovaných součástí. Jedná se často např. o součásti motorů, energetických zařízení, dopravních prostředků, obráběcích strojů, formy apod. Odrazem podmínek, za kterých funkční plocha vzniká, je tzv. integrita povrchu. Tato hodnota míru působení technologických metod na jakost obrobené plochy ve vztahu k funkčním požadavkům na celý výrobek. Důležitým parametrem integrity povrchu je stav napjatosti povrchové vrstvy. Příspěvek prezentuje výsledky měření zbytkového napětí v povrchové vrstvě součástí, které byly za jinak konstantních řezných podmínek broušeny buď bez použití chladicího média, nebo byla použita procesní kapalina Cimtech A31F, případně bylo k chlazení použito proudu ochlazeného vzduchu.

Klíčová slova: broušení, chlazení, povrchová vrstva, zbytková napětí, rtg difrakce

1. ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ V POVRCHOVÉ VRSTVĚ

Technologie obrábění představují zpravidla finální operaci při výrobě strojních součástí. V převažující míře se obrábění realizuje jako proces odebrání třísky nebo se jedná o některou z nekonvenčních metod obrábění. Až na výjimky jsou procesy obrábění kovových součástí doprovázeny jak deformačními, tak i teplotními ději [1]. Pro obrábění součástí s vysokou rozměrovou přesností a vysokou jakostí obrobeného povrchu se ve strojírenské výrobě nejčastěji používá broušení. Právě při této technologii může v relativně tenké povrchové vrstvě docházet k výraznému ovlivnění vlastností, zatímco v převažující části objemu součásti se změny neprojeví. Tento aspekt rozhodující měrou ovlivňuje funkčnost a životnost zejména těch broušených strojních součástí, které jsou mechanicky a tepelně exponovány. Způsob a míra ovlivnění bude vždy záviset na tom, o jaký materiál se jedná, jak byla součást tepelně zpracována a za jakých řezných podmínek byla obráběna.

Jakost povrchové vrstvy lze charakterizovat řadou parametrů zohledňujících geometrii obrobeného povrchu, fyzikálně mechanické vlastnosti povrchové vrstvy nebo fyzikálně-chemický stav povrchu. Velmi významným parametrem jakosti součástí jsou přítomnost zbytková napětí v povrchové vrstvě a jejich rozložení. Zbytková napětí jsou přítomna v tuhých tělesech, na něž nepůsobí žádné vnější síly ani momenty a v nichž neexistují žádné teplotní gradienty. Každá technologická operace generuje zbytková napětí svým vlastním způsobem a jen v takovém objemu materiálu, v jakém je schopna vyvolat plastickou deformaci a tepelně jej ovlivnit. Přitom dochází k superpozici těchto napětí se zbytkovými napětími vyvolanými předchozími operacemi.

U polykrystalických materiálů lze rozlišit zbytková napětí I., II. a III. druhu [2]. Napětí I. druhu, tzv. makroskopická, jsou projevem existujících deformací v makroskopických oblastech a dosahují rovnováhy v celém objemu součásti. Zbytková napětí II. druhu jsou definována analogicky, ovšem objemy, v nichž uvažujeme napětí homogenní, jsou dány velikostí jednotlivých krystalků, proto se tato napětí označují jako mikroskopická. Napěťová pole od mřížkových

poruch v reálných krystalech představují zbytková napětí III. druhu a tato napětí jsou nehomogenní i v rozsahu několika meziatomových vzdáleností. Stav zbytkové napjatosti v každém bodě součásti je superpozicí zbytkových napětí všech tří druhů.

Zbytková napětí jsou žádoucí v případě, kdy v povrchové vrstvě převažuje napětí tlakové, které vede ke zpevnění povrchu a ke zvýšení meze únavy. Naopak nežádoucí je zbytkové napětí tahové, které způsobuje zborcení, trhliny, napěťovou korozi a vede ke snížení meze únavy.

2. METODIKA EXPERIMENTŮ

V laboratoři obrábění katedry obrábění a montáže Technické univerzity v Liberci byly v rámci řešení výzkumných projektů provedeny experimenty, jejichž cílem bylo určit vliv způsobu chlazení na velikost zbytkového napětí v povrchové vrstvě po broušení.

Pro experimenty byly připraveny zkušební vzorky o rozměrech 50 x 50 x 6 mm z konstrukční slitinové oceli 14 220 (ocel legovaná Mn-Cr, vhodná k cementování a zušlechťování; DIN 17210-86). Zkušební součásti byly vyrobeny z ingotů a aby bylo eliminováno zbytkové napětí před obráběním, byly vzorky po dobu 2 hod. žháný v ochranné atmosféře v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR.

Broušení bylo provedeno na rovinné brusce BPH 320 A [3]. Zkušební vzorky byly upnuty přímo na magnetickém stole brusky. Na každém vzorku byly obvodem nástroje broušeny dvě protilehlé rovinné plochy (50 x 50 mm). Jako nástroj byl použit broušící kotouč z umělého korundu: typ kotouče 1 - 250 x 32 x 76 - 88A 60H8AV217 - 50 m.s⁻¹ a při obrábění byly nastaveny následující řezné podmínky: řezná rychlost $v_c = 35 \text{ m.s}^{-1}$, tangenciální rychlost posuvu stolu $v_{tt} = 10 \text{ m.min}^{-1}$, axiální posuv stolu $f_a = 1 \text{ mm/zdvih}$, pracovní radiální záběr (tloušťka odřezávané vrstvy) $a_c = 0,02 \text{ mm}$. Aby byly minimalizovány nežádoucí změny podmínek broušení, byl kotouč pravidelně (po každém broušeném vzorku) orovnáván jednokamenovým diamantovým orovnávačem, za současného přívodu procesní kapaliny. Po orovnání nahruho, při hloubce záběru orovnávače 0,02 mm, následovalo orovnání načisto, se záběrem 0,01 mm.

Abychom mohli posoudit vliv způsobu chlazení na zbytková napětí v povrchové vrstvě obrobené součásti, byly při broušení použity tři různé způsoby odvodu tepla z místa řezání: část zkušebních vzorků byla broušena bez použití procesního média a ochlazována pouze okolním vzduchem, u dalších zkušebních vzorků byla do místa broušení přiváděna procesní kapalina (Cimtech A31F; množství přiváděné kapaliny činilo cca 5 l/min) a do místa řezání u zbylých zkušebních vzorků byl přiváděn vzduch, který byl s pomocí Ranqueovy - Hilschovy vírové trubice podchlazen, minimální teplota proudu vzduchu činila - 28 °C [4].

Zbytkové napětí lze u strojních součástí měřit různými způsoby. Určení tohoto parametru je zpravidla poměrně nákladné a náročné na čas i přístrojové vybavení. Jedním ze způsobů, jehož velkou výhodou je, že díky automatizaci měření a vyhodnocování umožňuje vysoce přesně a spolehlivě měřit zbytkové napětí, je metoda rentgenové difrakční analýzy. Vlastní měření je založeno na tom, že nehomogenní elasto-plastická deformace materiálu se projeví deformací krystalové mřížky a změnami vzdáleností atomových mřížkových rovin d_{hkl} . Podstatou rentgenové tenzometrie je využití rozptylu (difrakce) rentgenových paprsků na krystalech ke stanovení změn mezivrstevní vzdálenosti vyvolaných působícím napětím. Zjištěné deformace se pak přepočítají na napětí pomocí vztahů teorie elasticity.

3. PRINCIP ANALÝZY NAPĚTÍ METODOU RENTGENOVÉ DIFRAKČNÍ ANALÝZY

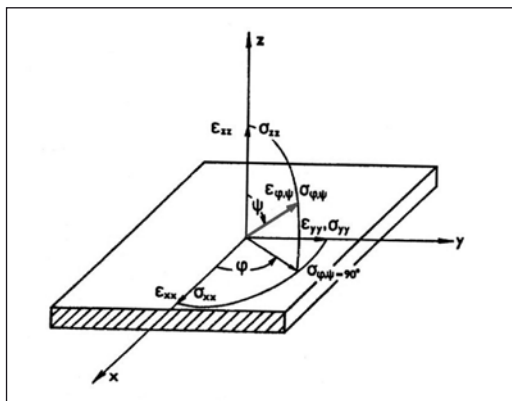
Ozáríme-li část povrchu zkušebního polykrystalického vzorku rentgenovými paprsky, dochází v určitých směrech k jejich zesílení (difrakci) na vhodně orientovaných atomových rovinách jednotlivých krystalků. Rozptyl záření na sousedních mřížkových rovinách, vzdálených od sebe o hodnotu d_0 , vede ke vzniku interferenčního maxima ve směru Θ_0 , pokud je rozdíl drah dvou rovnoběžných paprsků celočíselným násobkem vlnové délky použitého záření. Působením mechanického napětí se mezivrstevní vzdálenost d_0 nenapjatého materiálu změní na vzdálenost d a tím dojde k úhlovému posunu interferenčního maxima z původní hodnoty Θ_0 na $\Theta_{\varphi\psi}$. Deformace krystalové mřížky $\varepsilon_{\varphi\psi}$ ve směru (φ, ψ) sférického souřadného systému spojeného se vzorkem (obr. 1) je definována jako relativní změna mezivrstevní vzdálenosti [2]:

$$\varepsilon_{\varphi\psi} = \frac{d_{\varphi\psi} - d_0}{d_0}$$

Souvislost mezi měřenou deformací $\varepsilon_{\varphi\psi}$ a složkami tenzoru deformace ε_{ij} lze vyjádřit rovnicí [2]:

$$\varepsilon_{\varphi\psi} = (\varepsilon_{11} \cos^2 \varphi + \varepsilon_{12} \sin 2\varphi + \varepsilon_{22} \sin^2 \varphi) \sin^2 \psi + \varepsilon_{33} \cos^2 \psi + (\varepsilon_{13} \cos \varphi + \varepsilon_{23} \sin \varphi) \sin 2\psi$$

Oba výše uvedené vztahy představují základní rovnice rentgenové tenzometrie [5].

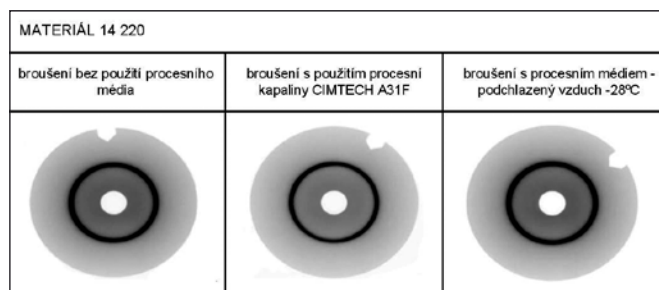


Obr. 1 Systém souřadnic spojený se zkušebním vzorkem

Měřením deformace krystalové mřížky $\varepsilon_{\varphi\psi}$ v 6 různých směrech se získá šest rovnic se šesti neznámými, z nichž lze vypočítat složky tenzoru deformace v souřadném systému vzorku. Pro získání kompletního tenzoru deformace se v praxi obvykle provádí měření ve 3 nezávislých azimutech (0°, 45°, 90°) pro kladná i záporná ψ . Jednotlivé složky symetrického tenzoru deformace reprezentují střední hodnotu deformace rovin v ozářeném objemu zkušebního vzorku.

Dalším krokem je vyjádření tenzoru napětí. K tomu se používá zobecněný Hookův zákon pro vybrané krystalografické roviny kvaziizotropního polykrystalického materiálu, což přináší nutnost znalosti tzv. rentgenografických elastických konstant [6].

Měření zkušebních vzorků probíhalo v laboratoři rtg difrakce na katedře inženýrství pevných látek FJFI ČVUT Praha na stacionárním Braggově-Brentanově ω -difraktometru Siemens se scintilačním bodovým detektorem. Bylo použito rtg záření CrK α o vlnové délce $\lambda = 0,2070$ nm. Vysoké napětí na rentgence činilo 30 kV a proud 24 mA. Metodou rentgenové difrakční analýzy lze získat informace o zbytkovém napětí v relativně velmi tenké povrchové vrstvě. Makroskopická napětí I. druhu se na difrakčních diagramech (obr. 2) projevují změnou polohy difrakčních linií. Vznik mikroskopických napětí II. druhu je naopak doprovázen změnou šířky difrakčních linií. Difrakční metodou se proto dají napětí I. a II. druhu navzájem separovat.



Obr. 2 Difrakční diagramy zkušebních vzorků z materiálu 14 220 (dle [5])

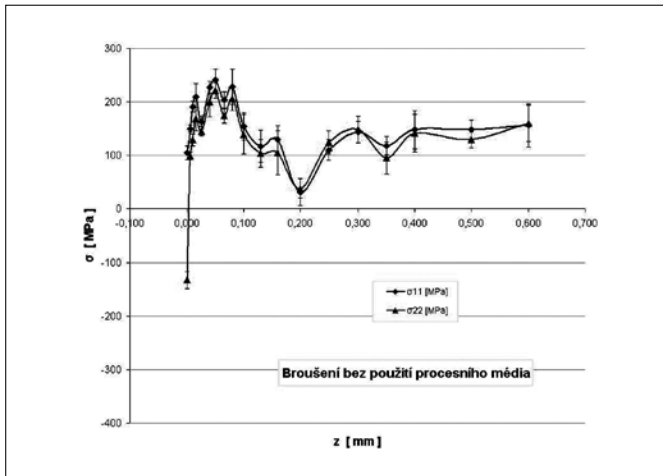
Pro vyšetření míry ovlivnění povrchové vrstvy vůči základnímu materiálu je třeba detailně analyzovat hodnoty zbytkového napětí v různých hloubkách pod povrchem. Pro studium gradientu deformace byla použita difrakční analýza v kombinaci s elektrochemickým odlešťováním materiálu. Anodické rozpouštění určité části povrchu zkušebního vzorku bylo realizováno pomocí přístroje LectroPol 5 pro elektrochemické leptání a leštění.

Měření zbytkového napětí bylo provedeno postupně, v různých hloubkách pod povrchem zkušebních vzorků.

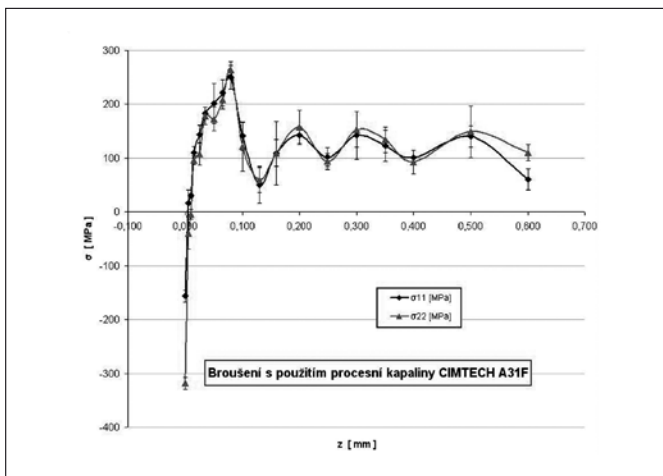
4. VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Průběh zbytkového napětí v povrchové vrstvě zkušebních vzorků z oceli 14 220 po rovinném broušení obvodem kotouče, kdy byly za jinak konstantních řezných podmínek variantně použity různé způsoby chlazení, je zřejmý z grafů na obr. 3 - 5.

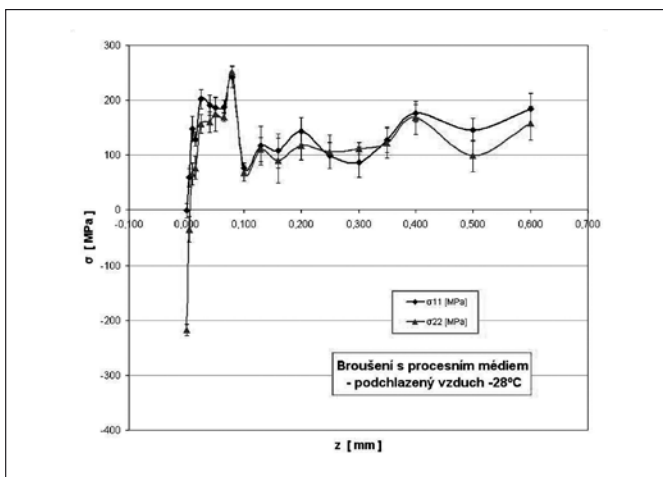
Hodnota napětí byla stanovena metodou rentgenové difrakční analýzy jednak na povrchu zkušebního vzorku (pro $z = 0$) a dále byl vyšetřen průběh napětí pod povrchem, ve směru normály k povrchu. Hodnota „z“ udává tloušťku povrchové vrstvy, po jejímž odstranění bylo měření provedeno. V grafech jsou uvedena pouze nejčastěji posuzovaná makroskopická zbytková napětí, přičemž hodnota σ_{11} vyjadřuje napětí stanovené ve směru působení zrn brousícího nástroje a hodnota σ_{22} udává zbytkové napětí ve směru kolmém vůči směru působení zrn brusiva. V grafech jsou u jednotlivých údajů znázorněny též intervaly, které odpovídají středním kvadratickým odchylkám daným výpočty veličin metodou nejmenších čtverců [5].



Obr. 3 Napětí v povrchové vrstvě zkušební vzorku broušeného bez použití procesního média



Obr. 4 Napětí v povrchové vrstvě zkušební vzorku broušeného s procesní kapalinou Cimtech



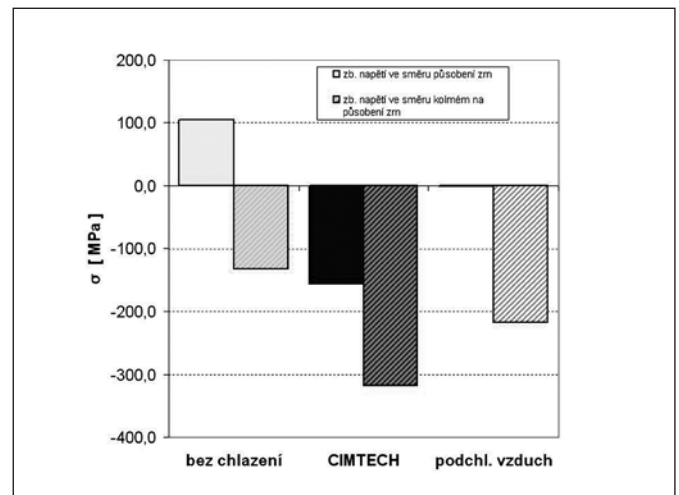
Obr. 5 Napětí v povrchové vrstvě zkušební vzorku broušeného s podchlazeným vzduchem

Průběh napětí v povrchové vrstvě zkušební vzorku broušeného bez použití procesního média, který byl během obrábění ochlazován pouze okolním vzduchem, dokumentuje graf na obr. 3. Pokud byla do místa broušení přiváděna procesní kapalina Cimtech A31F, pak se především na povrchu zkušební vzorku změnila hodnota zbytkového napětí, což je patrné z dalšího gra-

fu na obr. 4. Poslední graf na obr. 5 dokumentuje průběh napětí v povrchové vrstvě vzorku v případě, kdy byl do místa řezání přiváděn proud vzduchu, podchlazený s pomocí Ranqueovy - Hilschovy vírové trubice.

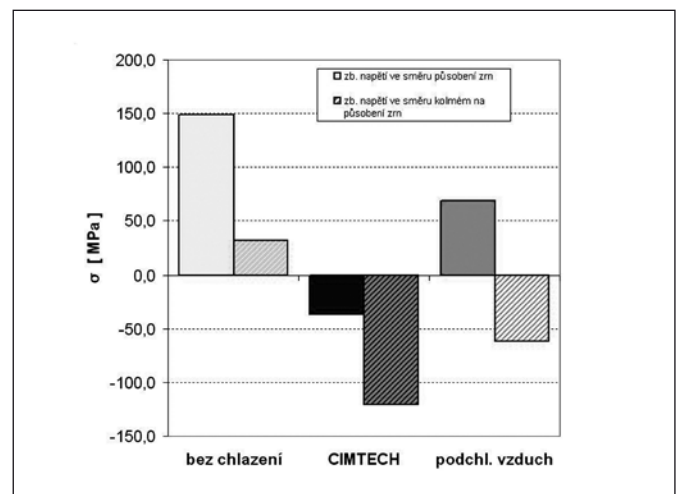
5. HODNOCENÍ EXPERIMENTŮ

Průběhy zbytkového napětí ve směru působení zrn brousícího nástroje (σ_{11}) a ve směru kolmém (σ_{22}) v povrchové vrstvě zkušebních vzorků broušených při různých podmínkách chlazení (obr. 3 – 5) jsou kvalitativně značně podobné. Z naměřených závislostí je zřejmé, že těsně pod povrchem zkušebních vzorků byl vždy zjištěn poměrně strmý nárůst napětí až do maximálních kladných hodnot, přičemž vzápětí byl ve všech případech vyhodnocen přibližně stejně strmý pokles napětí až do určitého lokálního minima, které se v závislosti na způsobu chlazení nacházelo v hloubce od 0,1 do 0,2 mm pod povrchem zkušební vzorku. Hluběji byl ve všech případech zaznamenán určitý nárůst zbytkového napětí až do hloubky 0,2 - 0,3 mm, kde pak došlo k určitému ustálení napětí.



Obr. 6 Zbytkové napětí na povrchu vzorku (hloubka 0,0 mm) v závislosti na způsobu chlazení

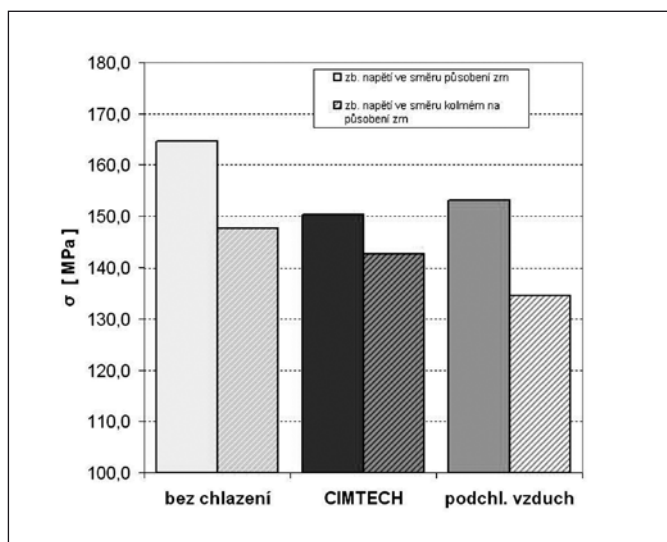
Zajímavé poznatky vyplývají z detailní analýzy naměřených hodnot. Jak je zřejmé z obr. 6, byly při různých způsobech chlazení na povrchu zkušebních vzorků (v hloubce 0,0 mm) zaznamenány značně odlišné hodnoty zbytkového napětí σ_{11} a σ_{22} . Zaměřme-li se na výsledné hodnoty zbytkového napětí ve směru působení zrn



Obr. 7 Střední hodnota zbytkového napětí v hloubce do 0,1 mm v závislosti na způsobu chlazení

brousicího nástroje (σ_{11}), pak u součásti, která byla broušena bez použití procesní kapaliny, byla zjištěna nepříznivá zbytková napětí tahová překračující hodnotu +100 MPa. U součásti broušené s procesní kapalinou Cimtech byla na povrchu naopak zjištěna příznivá tlaková napětí pod -150 MPa. Pokud byl do místa řezání přiveden proud vzduchu podchlazeného s pomocí Ranqueovy - Hilschovy vírové trubice, bylo zjištěno prakticky nulové zbytkové napětí -1 MPa. Při měření zbytkového napětí ve směru kolmém na směr působení zrn brusiva (σ_{22}) bylo ve všech případech zjištěno velice příznivé tlakové zbytkové napětí, které se pohybovalo v rozsahu od -132 do -318 MPa. Při všech třech porovnávaných způsobech odvodu tepla z místa řezání byl na povrchu zkušebních vzorků zjištěn značně veliký interval hodnot, ve kterém se pohybovala zbytková napětí σ_{11} a σ_{22} . U součásti broušené bez použití procesní kapaliny činil rozdíl 237 MPa, po použití podchlazeného vzduchu byl zjištěn interval 216 MPa a nejmenší rozsah 162 MPa byl zjištěn u součásti broušené s procesní kapalinou Cimtech.

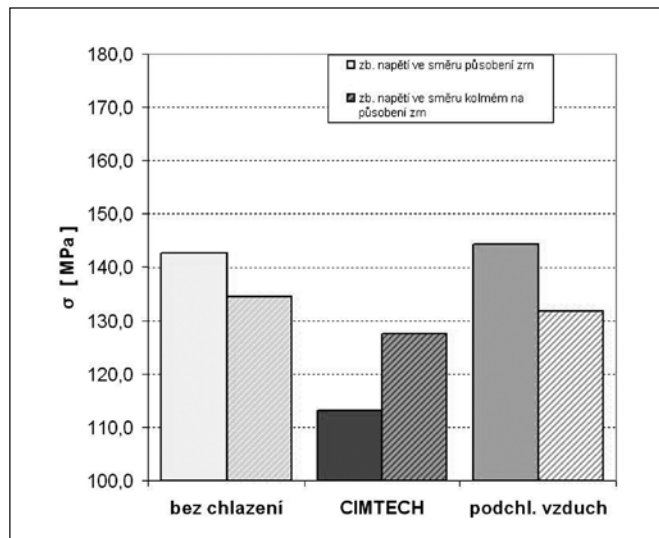
Jaké střední hodnoty zbytkového napětí byly stanoveny těsně pod povrchem ve vrstvě o tloušťce 0,1 mm, je zřejmé z obr. 7. V porovnání s hodnotami na povrchu zkušebních vzorků se zjištěné hodnoty zbytkového napětí ve směru působení zrn brousicího nástroje, bez ohledu na způsob chlazení při broušení, zvyšují směrem ke kladným hodnotám (tahová napětí). Nejmenší příznivé hodnoty byly zjištěny u vzorku obráběného bez chlazení +149 MPa. Jedině zkušební vzorek broušený s procesní kapalinou Cimtech vykazoval stále ještě hodnotu tlakového napětí -37 MPa. Stanovené hodnoty zbytkového napětí ve směru kolmém se pohybovaly v podstatně příznivějším rozsahu od +32 (u součásti broušené bez chlazení) do -121 MPa (u součásti broušené s procesní kapalinou Cimtech). Interval hodnot, ve kterém se pohybovala zbytková napětí σ_{11} a σ_{22} ve vrstvě těsně pod povrchem zkušebních vzorků, dosahoval přibližně poloviční velikosti oproti intervalu na povrchu. U součásti broušené bez použití procesní kapaliny činil v tomto případě 117 MPa, po použití podchlazeného vzduchu činil 131 MPa a nejmenší interval byl opět zjištěn u součásti broušené s procesní kapalinou Cimtech a ten v tomto případě činil 84 MPa.



Obr. 8 Střední hodnota zbytkového napětí v hloubce od 0,1 do 0,3 mm v závislosti na způsobu chlazení

V hloubce od 0,1 do 0,3 mm pod povrchem zkušebních vzorků byl ve všech případech zjištěn poměrně strmý nárůst napětí až do maximálních kladných hodnot bez ohledu na způsob chlazení. Tomu také odpovídají stanovené střední hodnoty zbytkového napětí (obr. 8). Zbytkové napětí ve směru působení zrn brousicího nástroje se pohybovalo v intervalu od +165 do +150 MPa, přičemž nejnižší hodnoty byly opět zjištěny u součásti broušené s procesní

kapalinou. V poměrně úzkém intervalu od +148 do +134 MPa se pohybovaly také hodnoty zbytkového napětí ve směru kolmém. Interval hodnot, ve kterém se pohybovala zbytková napětí σ_{11} a σ_{22} v hloubce od 0,1 do 0,3 mm byl ve všech případech velmi malý a pohyboval se od 19 MPa (u součásti ochlazované při broušení podchlazeným vzduchem) do 8 MPa (u součásti broušené s procesní kapalinou Cimtech).



Obr. 9 Střední hodnota zbytkového napětí v hloubce pod 0,3 mm v závislosti na způsobu chlazení

Na posledním obr. 9 jsou dokumentovány střední hodnoty zbytkových napětí zjištěné v hloubkách větších než 0,3 mm pod povrchem zkušebních součástí. V těchto oblastech by již nemělo docházet k významnému ovlivňování zbytkového napětí působením deformačních a teplotních dějů doprovázejících proces obrábění [7]. V hloubkách od 0,3 do 0,6 mm pod povrchem byla podobně jako u předešlého rozsahu hloubek stanovena pouze tahová napětí. Mimořádně byla ve směru působení zrn brousicího nástroje největší střední hodnota zbytkového napětí +144 MPa zjištěna u té součásti, u které byl do místa řezání přiváděn podchlazený vzduch. U zkušebního vzorku ochlazovaného procesní kapalinou činila střední hodnota +113 MPa. Zbytkové napětí ve směru kolmém se u zkušebních vzorků v závislosti na způsobu chlazení pohybovalo ve velmi malém rozsahu od +135 do +128 MPa. U vzorku broušeného s procesní kapalinou Cimtech byla sice opět zjištěna nejnižší hodnota zbytkového napětí ve směru kolmém, zcela výjimečně však byla v tomto jediném případě jeho velikost větší než hodnota zbytkového napětí ve směru působení zrn brousicího nástroje. Interval hodnot, ve kterém se pohybovala zbytková napětí σ_{11} a σ_{22} v hloubce pod 0,3 mm, byl ve všech případech opět velmi malý a pohyboval se od 14 MPa (u součásti broušené s procesní kapalinou Cimtech) do 8 MPa (u součásti broušené bez použití procesní kapaliny).

6. ZÁVĚR

Deformační a teplotní děje, jež vznikají při obrábění, jsou příčinou vzniku nehomogenní elasto-plastické deformace materiálu, která v tenké povrchové vrstvě součásti po obrábění deformuje krystalovou mřížku a vyvolává v ní napětí. Z hlediska funkčních vlastností součástí je výhodné, pokud v povrchové vrstvě převažují zbytková napětí tlaková.

Experimentálně byly zjištěny závislosti makroskopického zbytkového napětí na hloubce pod povrchem u broušených součástí, u kterých bylo různým způsobem odváděno teplo z místa řezání. V závislosti na způsobu chlazení byly zjištěny značné rozdíly ve velikosti zbytkového napětí a v jeho rozložení pod povrchem. Přímou na povrchu byla převážně zjištěna tlaková napětí. Jedině

u součásti, která byla broušena bez použití procesní kapaliny, bylo ve směru působení zrn broušicího nástroje zjištěno nepříznivé zbytkové napětí tahové i na povrchu. Směrem do hloubky se však zbytková napětí ve všech případech postupně měnila na tahová. U všech vyhodnocovaných broušených zkušebních vzorků byl těsně pod povrchem vždy zjištěn strmý nárůst napětí (směrem k tahovému napětím), který vzápětí přecházel do strmého poklesu napětí. Hluběji byl pak ve všech případech zaznamenán určitý nárůst zbytkového napětí a následně určité ustálení napětí (vždy v oblasti tahových zbytkových napětí).

Pro materiál 14 220 bez tepelného zpracování je v ČSN [8] uvedena mez pevnosti max. 637 MPa. Maximální hodnoty tahového zbytkového napětí zjištěné u zkušebních vzorků těsně pod povrchem lokálně dosahovaly hodnot okolo +250 MPa. Jedná se tedy o značně veliké napětí, které, zejména při cyklickém namáhání, kvalitu strojních dílů a jejich spolehlivost bezprostředně ovlivňuje.

Jak je zřejmé z výsledků měření (obr. 3 - 5) a z následné analýzy naměřených hodnot, byly nejnižší hodnoty zbytkového napětí zjištěny u těch zkušebních vzorků, u kterých byla do místa broušení přiváděna procesní kapalina Cimtech A31F. Lze proto doporučit, aby byly strojní součásti, u kterých se předpokládá vysoké mechanické nebo teplotní namáhání, broušeny s procesní kapalinou.

Při vyhodnocování experimentů bylo rozlišováno zbytkové napětí stanovené ve směru působení zrn broušicího nástroje σ_{11} a napětí ve směru kolmém vůči směru působení zrn brusiva σ_{22} . Je zajímavé, že velikost intervalu, který vyjadřuje rozdíl mezi napětím σ_{11} a σ_{22} , byl pro všechny způsoby chlazení vždy největší na povrchu (v hloubce 0,0 mm) a ve větších hloubkách byla zjištěna menší velikost tohoto intervalu. To pravděpodobně souvisí s tím, že povrch broušených součástí je bezprostředně ovlivněn kinematickými poměry a mechanismy vlastního odebrání materiálu jednotlivými zrny brusiva [9], což má za následek směrovost plastických deformací při přetváření elementů materiálu, zatímco ve větších hloubkách se tato skutečnost již tak významně neprojevuje.

Tento článek souvisí s řešením projektů MSM 4674788501 a MSM 6840770021, které jsou podporovány MŠMT ČR, a s řešením projektu FT-TA4/105, který je realizován za finanční podpory z prostředků státního rozpočtu prostřednictvím MPO ČR.

Literatura

- [1] POPOV, A, V. *Razrabotka i issledovanie processov frezerovania pri nizkoj žostkosti tehnologičeskoj sistemy (Projektování a výzkum frézování málo pružného technologického systému). [Kandidátská disertační práce]*. Moskva, Výzkumný institut technologie strojírenství Moskva, 1991. 243 s.
- [2] KRAUS, I., GANEV, N. *Technické aplikace difrakční analýzy*. Lektor: S. Holý. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. 171 s. ISBN 80-01-03099-7.
- [3] JERSÁK, J., aj. Messysteme für die Bearbeitung der Schleifprozessdiagramme. [CD-ROM]. In: *XV. vědecké sympozium - XV. Wissenschaftliches Symposium*. 1. vyd. Liberec: FS TU v Liberci, 2005, s. 200 - 206. ISBN 80-7083-975-9.
- [4] POHOŘALÝ, M., JERSÁK, J. Výzkum vybraných parametrů jakosti broušeného povrchu v závislosti na povaze použitého chladicího média. *Strojírenská technologie*. Rec. F. Holešovský. Prosinec 2003, 8, č. 4. s. 4 - 8. ISSN 1211-4162.
- [5] PALA, Z., GANEV, N., JERSÁK, J. X-Ray Diffraction Study of Distribution of Macroscopic Residual Stresses in Surface Layers of a Bearing Steel after Grinding. *Inżynieria Materiałowa*. Rec. neuvaden. roč. 28, 2007, č. 3 - 4. s. 455 - 458. ISSN 0208-6247.
- [6] HAUK, V. et al., *Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods*, Elsevier Science B. V., 1997.
- [7] NECKÁŘ, F., KVASNIČKA, I. *Vybrané statě z úběru materiálu*. 1. vyd. Praha: ES ČVUT, 1991. 88 s. ISBN 80-01-00696-4.
- [8] ČSN 41 220. Ocel 14 220.
- [9] JERSÁK, J. *Matematické modelování kinematiky procesu broušení simulační metodou. [Kandidátská disertační práce]*. Liberec, VŠST Liberec, 1988.

doc. Ing. Ganev Nikolaj, CSc., katedra obrábění a montáže, Fakulta strojní, TU v Liberci, Studentská 2, 461 17 Liberec, ČR, tel.: +420 224 358 604, e-mail: ganev@troja.fjfi.cvut.cz

doc. Ing. Jersák Jan, CSc., katedra obrábění a montáže, Fakulta strojní, TU v Liberci, Studentská 2, 461 17 Liberec, ČR tel.: +420 485 353 373, e-mail: jan.jersak@tul.cz

Ing. Pala Zdeněk, katedra inženýrství pevných látek, FJFI, ČVUT Praha, Břehová 7, 115 19 Praha 1, ČR, tel.: +420 224 358 604, e-mail: pala@troja.fjfi.cvut.cz

Zkušenosti s REM a EDX analýzou při studiu materiálů

V roce 2007 vzniklo ve spolupráci mezi Technickou univerzitou v Liberci (TUL) a společností Škoda Auto a.s. detašované pracoviště „Laboratoř rastrovací elektronové mikroskopie“ (REM). Laboratoř REM je umístěna v moderních prostorách nově vybudovaného Vzdělávacího centra Na Karmeli, Mladá Boleslav. Pracoviště tedy slouží nejen pro hodnocení kvality dílů, ale vychází vstříc požadavkům výzkumu struktur a složení materiálů nové generace. Takovými materiály jsou bezesporu nanomateriály, geopolymery a geokompozity.

Klíčová slova: REM, EDX, nanomateriály, geopolymery, geokompozity, nevodivé vzorky

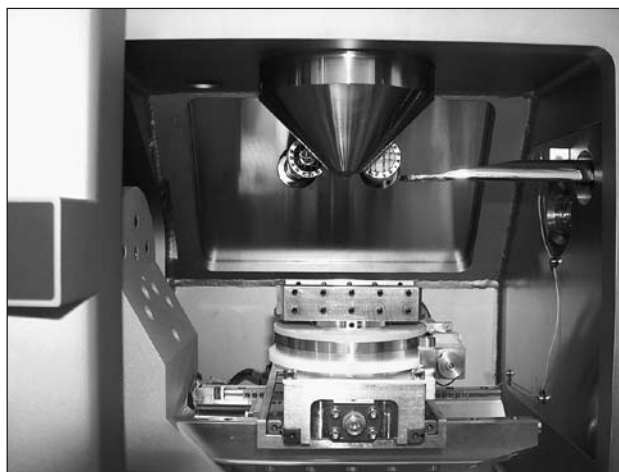
1. POPIS REM A EDX

Rastrovací elektronový mikroskop (REM) *TESCAN* řady *VEGA II XMU* s wolframovou žhavenou katodou je určený pro práci ve vysokém i nízkém vakuu. Urychlovací napětí je nastavitelné v rozmezí 200 V až 30 kV. Mód vysokého vakua v komoře nabývá hodnot $< 1 \times 10^{-2}$ Pa. Přístroj je vybaven detektory sekundárních elektronů (SE), zpětně odražených elektronů (BSE), detektorem sekundárně odražených elektronů pro nízké vakuum (LVSTD) a energeticky disperzní *RTG* mikroanalýzou (EDX) viz. obr 1, 2.

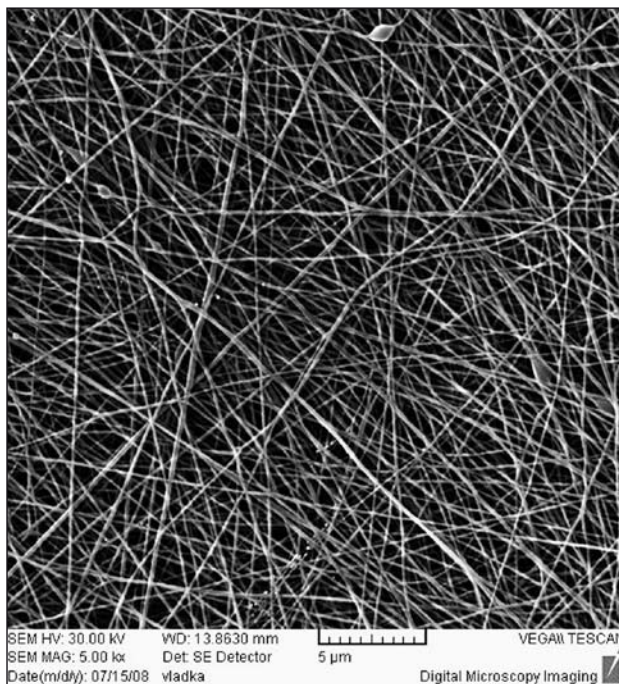
Energeticky disperzní mikroanalýza (EDX) *BRUKER X - Flash* - detektor chlazený termoelektricky Peltierovým článkem s mikroanalytickým systémem *Quantax*. Přesnost analýzy udává počet statistických chyb nižší než 1 %. Systém *Quantax* je schopen detekovat i lehké prvky s maximální chybou analýzy 3-5 % v závislosti na vlastnostech vzorku.



Obr. 1 Detektor EDX BRUKER X - Flash



Obr. 2 Pohled do komory REM: mechanický stolek, detektory SE, BSE, LVSTD a EDX



Obr. 3 Nanovlákna vyvíjená na TUL

2. ATRAKTIVNÍ PŘÍPADY POUŽITÍ

2.1 Nanomateriály

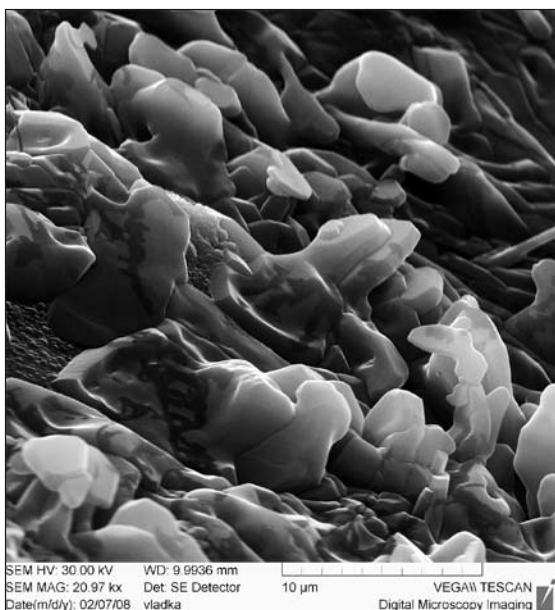
Jemnou strukturu nanovláken lze dobře sledovat právě pomocí rastrovací elektronové mikroskopie. Povrch preparátu je nutné upravit naprášením tenké vodivé vrstvy. Pro nanomateriály se nejlépe osvědčila slitina *Au - Pd* tloušťka vrstvy 20 nm. Na obr. 3 jsou zachycena polymerní nanovláčka o průměrné tloušťce 70 nm.

2.2 Geopolymery

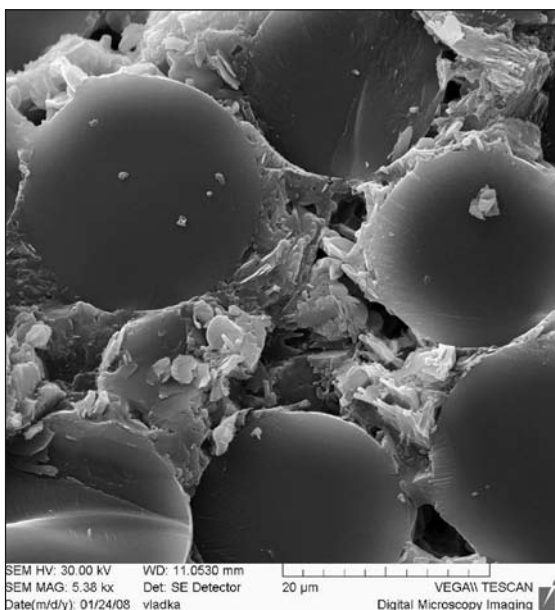
Geopolymery jsou anorganické polymerní materiály, které se připravují polykondenzační reakcí základních hlinito-křemičitano-ých materiálů. Geopolymer na obr. 4 je speciálně vyvíjený jako geokompozitní matrice tlumící vibrace. Na lom geopolymerního materiálu byla naprášena vodivá vrstvou *Au - Pd* o tloušťce 15 nm.

2.3 Geokompozity

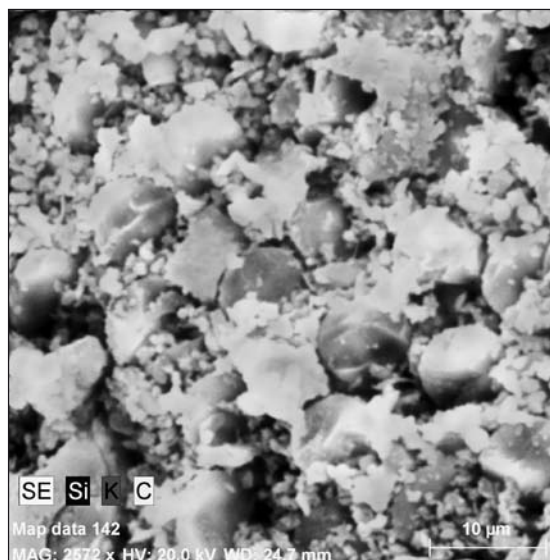
Geokompozit na obr. 5. a se skládá z geopolymerní epoxidové matrice a kontinuálních uhlíkových vláken o průměru 20 μm . Prověřována je především adheze matrice s plnivem (REM) a dobrá proreagovanost systému (EDX) obr. 5. b.



Obr. 4 Geopolymer – epoxidová pryskyřice

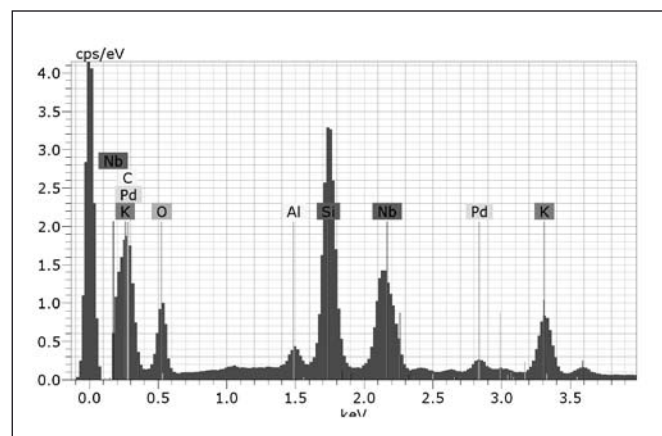


Obr. 5.a Geokompozit – adheze vláken (REM)

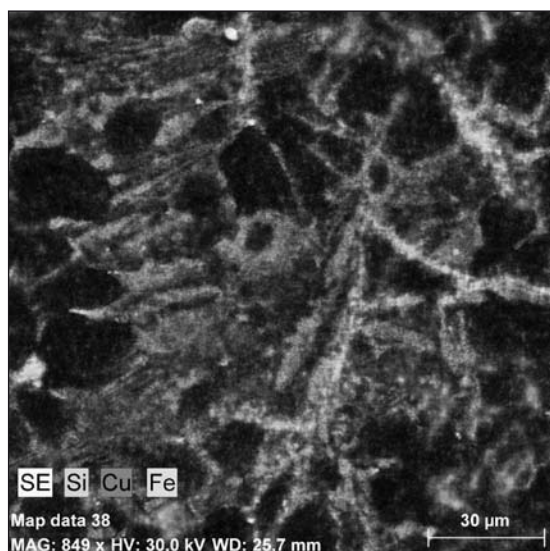


Obr. 5. b Geokompozit – proreagovanost systému (EDX)

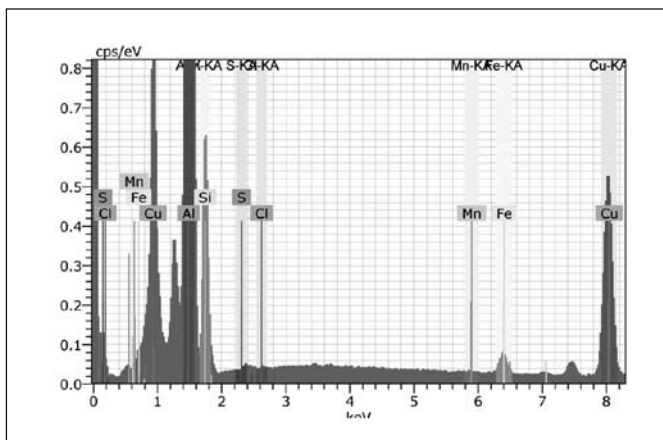
Chemickou mikroanalýzu (EDX) na nevodivém vzorku lze provést po nauhličení povrchu preparátu. Náboj je tak dostatečně odveden z povrchu vzorku. Při výpočtu procent obsažených prvků je využita uhlíková korekce. Tak nedojde k ovlivnění hodnot. Tloušťka napařených uhlíkových vrstvy je 30 nm, obr. 5. c.



Obr. 5. c Geokompozit - chemické složení (EDX)



Obr. 6a Hliníková slitina *AlSi9Cu3Fe* – mapa chemických prvků



Obr. 6b Hliníková slitina $AlSi9Cu3(Fe)$ – diagram energií chemických prvků (EDX)

2.4 Kovové materiály

Pro maximální přesnost chemické mikroanalýzy (EDX) u kovových materiálů je doporučeno provádět měření na metalografickém výbrusu. Ideální vzdálenost mezi detektorem EDX a analyzovaným povrchem je 25 mm. Na obr. 6 a je mapa rozložení chemických prvků a na obr. 6b diagram energií chemických prvků, které jsou ve slitině obsaženy.

3. POZNATKY Z ROČNÍHO PROVOZU

Práce s mikroskopem je pro uživatele velice příjemná. Během ročního provozu nového zařízení se objevují různé závady, které se dodavatelská firma snaží okamžitě řešit. Sídlo této firmy je v České republice, což je díky rychlé dostupnosti servisu velkou výhodou. Přesto, některé problémy přetrvávají. Nejzávažnější závadou je velmi nízká životnost wolframových katod, která se u tohoto zařízení pravidelně objevuje již po 70 hodinách. Garantovaná životnost katody je ale minimálně 200 hodin. Proto se firma snaží závadu co nejefektivněji odstranit.

Úzká spolupráce TUL s laboratorii REM může přinést i jisté nevýhody, jako například upřednostnění zakázek laboratoře nebo nedostatečně vybavená přípravná vložka. Naopak vyzvednout lze bezproblémovou spolupráci, komunikativnost a snahu vyhovět za všech okolností.

4. ZÁVĚR

I nekovové a členité prvky lze velmi dobře detekovat energeticky disperzním spektrometrem (EDX), za předpokladu správně zvolených parametrů. Mezi nejdůležitější patří dodržení optimální vzdálenosti povrchu vzorku a detektoru EDX, tj. 25 mm, volba urychlovacího napětí (HV), kterým je žhavana wolframová katoda, dále volba probe current (PC), kterou měníme šířku stopy rastrovacího paprsku elektronů. A v neposlední řadě i tloušťka tenké vodivé vrstvy, která silně ovlivňuje nabíjení vzorku.

Ing. Vladěna Reicheltová, Technická univerzita v Liberci, katedra materiálu, Studentská 2, 46117 Liberec, tel.: 605 782 339, e-mail: vladena.reicheltova@seznam.cz

Technické pokyny pro autory

Příspěvky se přijímají v elektronické formě.

Požadavky na textovou část: Text musí být pořízen v editoru MS WORD, doporučuje se font Times New Roman, velikost písma 12, dvojitě řádkování, formát stránky A4. Ve všech částech příspěvku používejte stejný font. Text pište do jednoho sloupce se zarovnáním k levému okraji, klávesu ENTER používejte pouze na konci odstavce.

Rovnice a vzorce uváděné na samostatných řádcích musí být vytvořeny modulem pro matematiku editoru MS WORD, rovnice a vzorce, které jsou součástí textu na řádku, zapisujte pomocí vložených symbolů, nikoliv zmíněným modulem. Při psaní matematických a chemických výrazů dodržujte základní pravidla: Veličiny pište kurzívou, matice tučně stojatě (antikva), vektory a skaláry tučnou kurzívou. Úplný (totální) diferenciál „d“ vždy stojatě. Ludolfovo číslo „ π “ stojatě. Indexy, pokud vyjadřují veličinu, pište kurzívou, v opačném případě stojatě (např. max, min apod.). Imaginární jednotku „i“ stejně jako „j“ v elektrotechnice pište stojatě.

Do držte pravidla českého pravopisu; za interpunkčními znaménky je vždy mezera. Rovněž tak před a za znaménky „+“, „-“, „=“ apod. je vždy mezera.

Požadavky na obrázky a grafy: Grafickou část příspěvku nevěšujte do textu, ale dodávejte ji jako samostatné grafické soubory typu *.CDR, *.EPS, *.TIF, *.JPG a *.AI (vektorovou grafiku jako

*.EPS nebo *.AI soubory, bitmapovou grafiku jako *.TIF nebo *.JPG soubory). V žádném případě nedodávejte obrázek v souboru typu *.doc. Bitmapové soubory pro černobílé kresby musí mít rozlišení alespoň 600 dpi, pro černobílé fotografie nejméně 200 dpi a pro barevné nejméně 300 dpi. Při generování obrázků v COREL DRAW do souboru typu *.EPS převedte text do křivek. U souborů typu *.JPG používejte takový stupeň komprese, aby byla zachována co nejlepší kvalita obrázku. Velikost písma v obrázcích by neměla klesnout pod 1,5 mm (při předpokládané velikosti obrázku po zalomení do tiskové strany).

Pokyny k předávání příspěvku

Ke každému textu nebo grafice musí být přiložen kontrolní výtisk nebo fotografie.

Dále je třeba, aby k článku autor dodal překlad résumé a názvu článku do anglického (českého – slovenského) jazyka, klíčová slova, jména všech autorů včetně titulů, jejich plných adres, telefonického spojení a případně e-mailové adresy.

Soubory je možno dodat na disketě nebo CD. Ke každému příspěvku připojte seznam všech předávaných souborů a u každého souboru uveďte pomocí jakého software byl vytvořen.

Příspěvky zasílejte na adresu: Redakce časopisu JMO, Kabelíkova 1, 750 02 Přerov.

System objektivního off-line hodnocení vlnitosti plochého skla

Pro hodnocení vlnitosti skla je v praxi využíván tzv. test zvlnění (corrugation test), který je založen na pozorování míry zvlnění odrazu zebra-desky od vzorku skla a subjektivním porovnáním s etalony. Tento test se v běžných provozních podmínkách provádí i několikrát za hodinu při nepřetržitém provozu. Cílem výzkumu je objektivně kvantifikovat vlnitost nahrazením pozorovatele digitálním fotoaparátem a vyhodnocovací jednotkou a zařízení zprovoznit v praxi.

V rámci výzkumu byl vyvinut software pro kvantitativní analýzu nazvaný Vlnitost v prostředí Matlab a pro účely sběru dat v provozu byl kompilován do samospustitelného programu. To znamená, že program není závislý na prostředí Matlab, ale pouze na jeho tzv. knihovnách, které jsou spolu s programem nainstalovány na počítači. System umožňuje ovládnutí fotoaparátu přímo z programu Vlnitost.

Program je založen na detekci křivek rozhraní mezi světlem a stínem odraženého obrazu od vzorku a vyhodnocení těchto křivek. Pro hodnocení je užíváno několika parametrů včetně statistických, délek křivky a fraktální dimenze. Výsledná jakost je pak přepočtena pomocí váhových koeficientů a je shodná s již dříve zavedenou škálou pro subjektivní hodnocení vlnitosti. Modifikovaná metodika je používána také pro porovnání a kvantifikaci změn povrchů materiálů v metalografických výbrusech probíhajících vlivem působení korozního prostředí a fraktální geometrie je také užívána pro popis dat ze senzorů v průmyslové praxi.

Klíčová slova: Corrugation test, fraktální geometrie, jakost, ploché sklo

ÚVOD

Ploché sklo je dnes převážně vyráběno technologií FLOAT, tedy plavením na roztavené cínové lázni. Jedná se o nepřetržitou technologii, kdy je vyráběn nekonečný pás skla, který je na konci linky dělen na požadované rozměry. Kvalita takto vyráběného plochého skla je sledována souborem metod posuzujících vady skla od kamínků, šlír, přes konstantní tloušťku až po optické zvlnění. Úkolem kontroly jakosti skla je charakterizovat tyto vady a podle smluvně daných kritérií zařadit sklo do tříd jakosti.

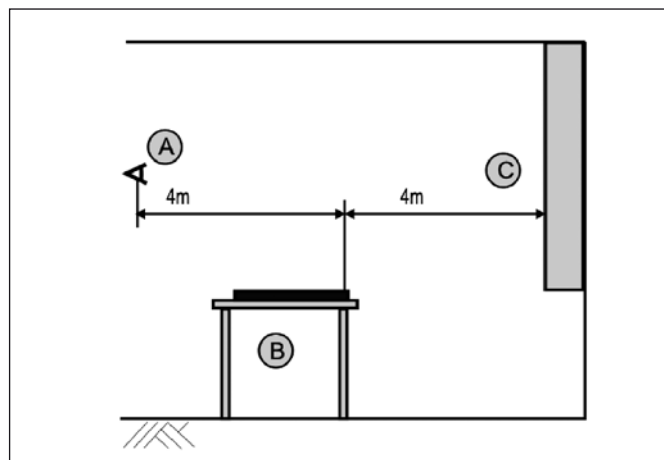
Významným měřítkem kvality skla je tzv. corrugation test (test zvlnění), který hodnotí optickou jakost (zvlnění) skla a je prováděn subjektivně off-line srovnáním s etalony obsluhou v běžných provozních podmínkách i několikrát za hodinu. Cílem výzkumu bylo tento test objektivizovat a zprovoznit zařízení v praxi. K tomuto účelu bylo použito nástrojů statistiky, měření délek a fraktální geometrie [1-4]. Na základě rozsáhlého měření stovek vzorků provedených zaměstnanci provozu byla pomocí váhových koeficientů stanovena výsledná jakost. Výsledkem je již dříve zavedená a v provozu používaná škála tříd jakosti pro subjektivní hodnocení, což lze považovat za jeden z hlavních přínosů výzkumu.

CORRUGATION TEST

Test se provádí v uzavřené místnosti izolované (především světelně) od okolního provozu. Test je založen na odrazu světla na vzorcích ze 4 m vzdálené šikmo pruhované desky (zebra-desky, obr. 1 C), což je matovaná skleněná tabule o rozměru 2 x 1 m s černými pruhy o šíři 25 mm pod úhlem 45 stupňů. Pozorovatel (obr. 1 A) je od stolu se vzorky (obr. 1 B) vzdálen další 4 m a subjektivně porovnává kvalitu vzorků s etalony. Vzorky se řadí do stupňů jakosti od 1 do 3,5. Podle pracovních etalonů se ohodnotí celá šíře pásu.

OBJEKTIVIZACE TESTU

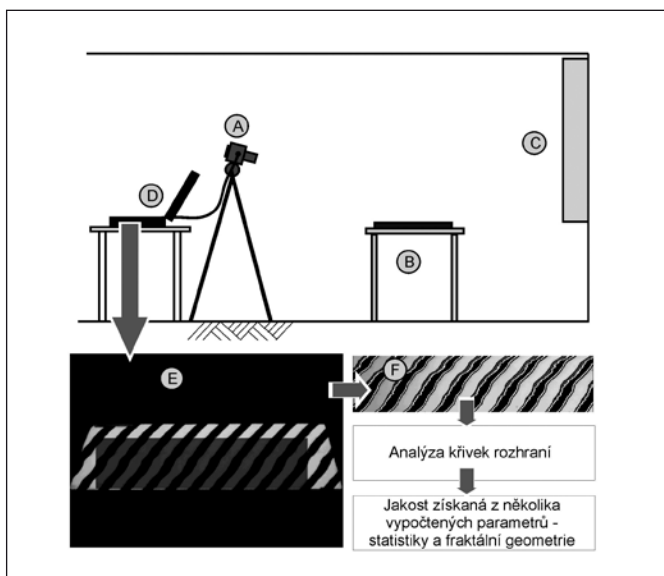
Pro objektivizaci byla odzkoušena a navržena metodika hodnocení pomocí obrazové analýzy, která využívá digitálních snímků, které jsou dále softwarově zpracovány nikoliv jako celé snímky, ale jsou z nich generovány křivky rozhraní a ty jsou hodnoceny. V následujícím výzkumu byl na základě výsledků experimentů navržen systém objektivního měření a software pro analýzu vlni-



Obr. 1 Schéma corrugation testu

tost, který je nyní ve verzi 2.6. Celý postup zpracování lze rozdělit do jednotlivých kroků:

1. Položení hodnoceného vzorku na stůl (obr. 2 B).
2. Snímkování odrazu zebra-desky (obr. 2 C) od vzorku digitálním fotoaparátem v černobílém módu (obr. 2 A) a převod do počítače (obr. 2 D). Snímek vzorku je na obr. 2 E.
3. Nalezení vzorku na snímku a jeho případné otočení. Digitální výřez vybrané části snímku (obr. 2 E – šedivý obdélník).
4. Prahování, získání a výběr úplných křivek rozhraní a jejich analýza (obr. 2 F).
5. Zařazení do třídy jakosti na základě výsledků výpočtu statistických parametrů a odhadu fraktální dimenze kompletních křivek rozhraní.



Obr. 2 Princip analýzy snímků vzorků plochého skla

V kroku 1 je položen vzorek na stůl a díky pokročilé analýze polohy vzorku jej není třeba přesně polohovat. Musí být jen uložen v zorném poli fotoaparátu.

Snímkování vzorku v kroku 2 je nutné provádět z pevně daného místa a pevně lokalizovaným umístěním fotoaparátu, daným pěti parametry: polohou ve třech osách, horizontálním a vertikálním natočením. To je zajištěno pomocí speciálního stativu, který je umístěn v místě analýzy a lze ho snadno přesunout z aktivní polohy pro měření do polohy klidové, kde nebrání obsluze v dalších testech.

V kroku 3 je snímek odrazu zebra desky automaticky nalezen, případně otočen a je v něm vybrána potřebná část pro následnou analýzu. Digitální vyříznutí části snímku se provádí pro získání té části obrazu, která je důležitá pro analýzu (obr. 2 E).

Prahování (jedna ze základních metod obrazové analýzy) je získán binární snímek a z něj jsou získány křivky rozhraní (obr. 2 F). Pro každou křivku je provedena analýza a výsledky pro všechny kompletní křivky jsou prezentovány pro jeden vzorek jako průměrná hodnota, rozpětí výsledků a směrodatná odchylka.

Pro analýzu křivek rozhraní vzorků byly využity tři metody popisu:

- statistické nástroje;
- odhad *fraktální dimenze* pomocí *obvodové metody*, kdy výsledkem je tzv. *obvodová dimenze*;
- délky křivek.

Metody jsou popsány v [5, 6].

Jak se ukazuje, je nutné použít vždy několika parametrů, které jsou získány diametrálně odlišnými metodami. Důvodem je vnímání lidského oka, které vnímá jak pravidelné struktury, tak i složitost. Klasické nástroje popisu křivek (jako je rozpětí, rozptyl, směrodatná odchylka, variační koeficient, ...) jsou často nepostačující. Jako vhodné se jeví užití statistických nástrojů v kombinaci s nástroji fraktální geometrie a dalšími nástroji, jako jsou tzv. délky křivek. Dále vlivem technologie výroby lze na většině vzorků skla pozorovat dvě zvlnění. Primární, jako jasné zvlnění odražených pruhů, a sekundární, které se jeví jako nejasná „rozpítá“ hranice primárního zvlnění, obr. 2 F. Různý poměr primárního a sekundárního zvlnění mají i jednotlivé etalony odpovídající daným třídám.

Výsledná třída jakosti byla dána operátorem, tedy subjektivním posouzením míry pravidelnosti, složitosti a váhy mezi oběma zvlněními. K tomu, aby bylo možno objektivní výsledky přiblížit současné škále jakosti, byly vypočtené parametry ze stovek měření přepočteny pomocí váhových koeficientů. To umožnilo zachovat původní vnitřní normu rozdělovací zvlnění do tříd jakosti.

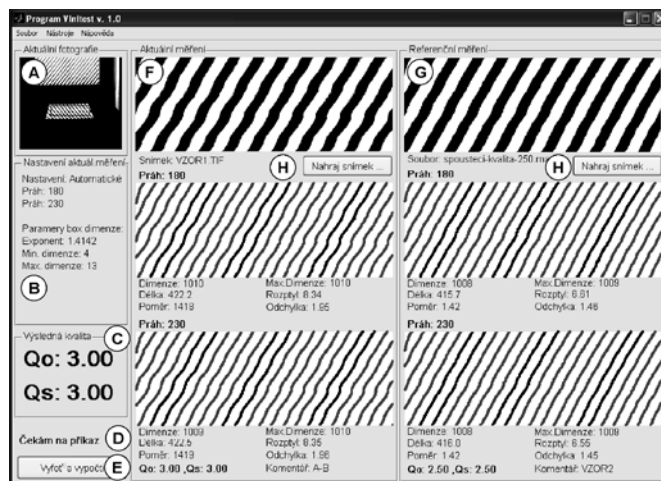
Rozsáhlá a výpočtově náročná část obrazové analýzy spolu se zařazením do třídy jakosti byla zkrácena z původních 3 minut na 2 minuty, což je pro provozní nasazení postačující.

Základním know-how je software vyvinutý speciálně pro tento test. Obrazová analýza byla vyvinuta v prostředí Matlab 7 a kompilovaná pomocí programu Matlab-Compiler 4 do samospustitelného programu nazývaného *Vlnitost*. To znamená, že program není závislý na prostředí Matlab, ale pouze na jeho tzv. knihovnách, které jsou spolu s programem nainstalovány na přenosném počítačím systému. K běhu celého systému je potřeba, aby byl spuštěn program PSRemote 1.4, který umožňuje přímou komunikaci mezi fotoaparátem a počítačem (ten je automaticky spuštěn s programem *Vlnitost*). Většina úkonů v počítači je automatizována a celá analýza včetně automatického vyfocení (komunikace mezi počítačem a fotoaparátem) je odstartována jediným tlačítkem. Operátor zadá standardní parametry vzorku a po analýze se mu v okně objeví výsledná jakost. Výsledky a zadané parametry vzorku jsou ukládány tak, aby bylo možno sledovat změny v čase a je možné je exportovat do standardního formátu pro MS Excel.

Nespornou výhodou celého systému je možnost uchovávat v počítači nejen výsledky hodnocení, ale i snímky prakticky po libovolně dlouhou dobu, pouze s nárokem na odpovídající místo na pevném disku kontrolního počítače. Je tak vytvářena rozsáhlá databáze umožňující zpětnou kontrolu.

Okno programu *Vlnitost 1.0* je zobrazeno na *obr. 3* a je rozděleno na několik podčástí:

- aktuální fotografie – zobrazující aktuální analyzovanou fotografii s vyznačením rámce – výřezu analyzované části – A;
- nastavení aktuálního měření – které zobrazuje nastavení (aktuální, vlastní), nastavené prahy a nastavení výpočtu *fraktální dimenze* – B;
- výsledná kvalita – zobrazuje vypočtenou (objektivní) kvalitu Q_0 a subjektivně posouzenou (subjektivní) kvalitu Q_s – C;
- příkazový řádek (Čekám na příkaz) – zobrazuje stav programu a průběh výpočtu – D;
- tlačítko pro spuštění programu „Vyfoť a vypočti“ – spouští program na vyfocení vzorku a následně výpočet kvality, při běžném běhu programu stačí stlačit toto tlačítko pro vyfocení vzorku a start analýzy – E, případně zmáčknout klávesovou zkratku Ctrl+F;
- aktuální měření – zobrazuje analyzovanou část fotografie, *křivky rozhraní* pro oba prahy a výsledky analýz – F;
- referenční měření – zobrazuje referenční část fotografie, *křivky rozhraní* pro oba prahy a výsledky analýz, zde je možné nahrát výsledky předchozích měření (tlačítkem H) a porovnat tak s aktuálním měřením – G.



Obr. 3 Okno programu *Vlnitost 1.0*

Program dále umožňuje zpětnou analýzu již uložených snímků, editaci předchozích měření, export dat (výsledků a zadaných parametrů) a nastavení některých parametrů výpočtu a obrazové analýzy.

DALŠÍ APLIKACE OBRAZOVÉ ANALÝZY A FRAKTÁLNÍ GEOMETRIE

Obrazová analýza využívající kombinace fraktální geometrie, statistiky a délek křivek je užívána pro hodnocení metalografických výbrusů. Nyní je analýza využívána pro posouzení vlivu roztavené skloviny na kovové materiály: na klasickou AKC ocel a perspektivní materiály pro užití nejen ve sklářství, aluminid železa [7].

Fraktální geometrie je také testována pro zpracování signálů a časových řad z průmyslové praxe, posouzení snímků vad (pomocí mřížkové – box dimenze) a další. Tento nástroj popisu dat se ukazuje jako perspektivní prostředek pro analýzu dat z průmyslové praxe, především v kombinaci s dalšími nástroji (statistika, spektrální analýza) [5].

ZÁVĚR

Pomocí vyvinuté pokročilé metodiky obrazové analýzy je hodnoceno zvlnění plochého skla. Byl vyvinut software a hardware pro nasazení v průmyslové praxi a nyní je ověřován ve zkušebním provozu. Podařilo se maximálně zjednodušit obsluhu programu a zachovat požadovanou škálu tříd jakosti. Program je průběžně zdokonalován na základě požadavků z výroby. Další vývoj off-line testu je zaměřen na přidání analýzy okrajů pásu skla, pro kterou lze využít stejné metodiky, ale s přenastavením parametrů pro určení třídy jakosti (na základě stovek testů) a změnou grafického rozhraní programu Vlnitost. Také byl zahájen vývoj zařízení pro nasazení této obrazové on-line analýzy na linku výroby plochého skla.

Ing. Vlastimil Hotař, Ph.D., Technická univerzita v Liberci, katedra sklářských strojů a robotiky, Liberec, tel.: 485 354 129, e-mail: vlastimil.hotar@tul.cz

Poděkování: Práce vznikla v rámci výzkumného záměru č. MSM 4674788501, finančně podporovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

Literatura

- [1] MANDELBROT, B. B. The fractal geometry of nature. New York: W. H. Freeman and Co., 1982.
- [2] PEITGEN, H.O., JUERGENS, H. and SAUPE, D. Chaos and Fractals: New Frontiers of Science. New York; Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1992.
- [3] ZELINKA, I., VČELAR, F., ČANDÍK, M., Fraktální geometrie – principy a aplikace. Praha: Nakladatelství BEN – technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-193-4.
- [4] HOTAŘ, V. Fraktálová geometrie [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006. Dostupný z WWW: <http://www.ksr.vslib.cz/fraktaly/>.
- [5] HOTAŘ, V. Hodnocení průmyslových dat pomocí fraktálové geometrie. In: Disertační práce, Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005. 123 s.
- [6] HOTAŘ, V. Possibilities of Fractal Dimension Applications For Quality Monitoring. In proceedings: 8th International Carpathian Control Conference. Košice: Technical University of Košice, 2007. p. 191 – 194, ISBN: 978-80-8073-805-1.
- [7] HOTAŘ, A., HOTAŘ, V. Corrosion Resistance of Fe₃Al – Based Iron Aluminide in Soda Potash Molten Glass and in Lead Molten Glass. Acta Metallurgica Slovaca 1/2007, vol. 13, p. 493-497, ISSN-1335-1532.

Josef BLAŽEK, katedra vozidel a motorů, Fakulta strojní, Technická univerzita v Liberci

Využití endoskopické vizualizační techniky při výzkumu spalovacích motorů

Článek popisuje metodu vizualizace ve spalovacích motorech. Vývoj motorů, vzhledem ke složitosti procesů probíhajících ve válci, vyžaduje moderní vývojové nástroje. Vizualizační nástroje lze využít pro monitorování tvorby palivových směsí, počátek zážehové reakce a následující spalovací proces v SI nebo dieselových spalovacích motorech. Pro pozorování dějů v katalyzátoru byla vyvinuta speciální ochrana objektivu optického endoskopu před vysokými teplotami.

ÚVOD

Optické metody jsou ideálním nástrojem v oblastech výzkumu spalovacích motorů. Hlavní výhodou je podávání informací o činnostech, které jsou lidskému oku skryté a umožní tak pochopit souvislosti probíhajících dějů. Zkušenosti získané při používání těchto metod slouží k optimalizačním činnostem sledovaných součástí za účelem zlepšení jejich využití.

Snahou konstruktérů při vývoji pístových spalovacích motorů je například optimalizace proudových polí v sacích kanálech a ve válci motoru pro získání nejvyšší možné účinnosti. Vizualizace dějů uvnitř spalovacího motoru je velmi důležitý a význačný pomocník při optimalizaci tvorby směsi a hoření.

Tyto metody slouží také např. ke sledování směru proudění vstříkovaného paliva, vývinu jiskry na zapalovací svíčke, procesu

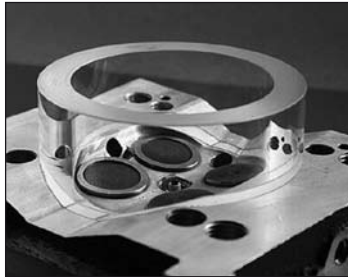
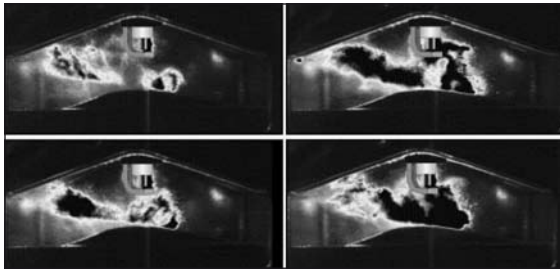
hoření uvnitř válce motoru a pomocí softwaru určit rozložení teplot plamene a pravděpodobnost výskytu sazí aj. Používají se k získání obrazu objektu ve sledovaném prostoru a bližšímu zkoumání jeho stavu. Na základě znalosti stavu objektu lze lépe hodnotit souvislosti a fyzikální podstatu sledovaných dějů. Děje se sledují optickým pozorováním a výsledkem jsou 2D či 3D obrazy nebo videozáznamy.

Druhy optického přístupu ke spalovacímu prostoru motoru

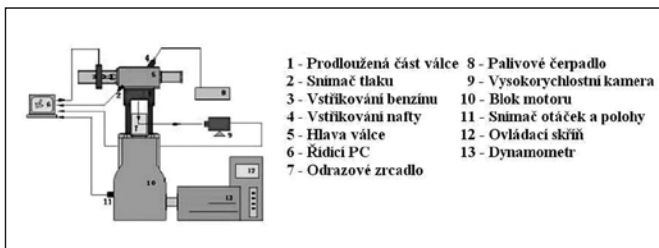
Existují dva základní druhy optického přístupu ke spalovacímu prostoru motoru:

- transparentní motor – průhledné dno pístu nebo průhledná stěna válce
- pomocí endoskopické techniky

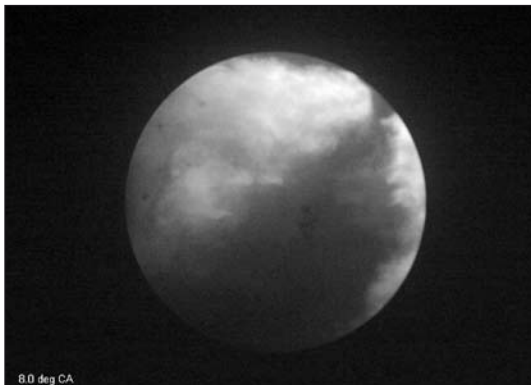
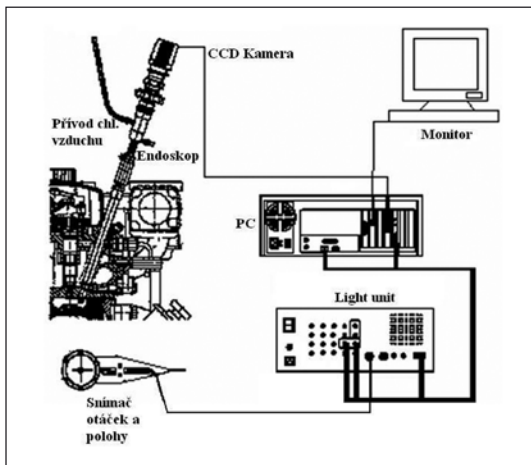
* Obrázky 3, 7, 8, 10, 11, 14 a 15 jsou uvedeny na 3. straně obálky.



Obr. 1 Zobrazení vstřiku paliva do pracovního prostoru válce. Ukázka průhledné stěny válce [1, 2]



Obr. 2 Testovací zařízení s optickou cestou přes prodloužený píst s průhledným dnem [3]



Obr. 4 Snímání procesu hoření pomocí endoskopické techniky [5]

Využití endoskopické vizualizační techniky při výzkumu spalovacích motorů v Laboratoři pístových spalovacích motorů Technické univerzity v Liberci

Pro sledování dějů u spalovacích motorů je využíván systém firmy AVL – VisioScope. Tento systém slouží pro vizualizaci procesu hoření uvnitř spalovacího prostoru válce motoru, procesu vstřikování paliva a jiných dějů. Použitím 4mm endoskopu poskytuje aparatura optický přístup ke spalovací komoře a s připojením digitální kamery lze zaznamenávat děje, které probíhají uvnitř uzavřeného prostoru.

VisioScope je stroboskopický systém pro nahrávání dějů u spalovacích pístových motorů a offline zpracování naměřených dat pro výzkum a vývoj nebo optimalizaci součástí spalovacího motoru.

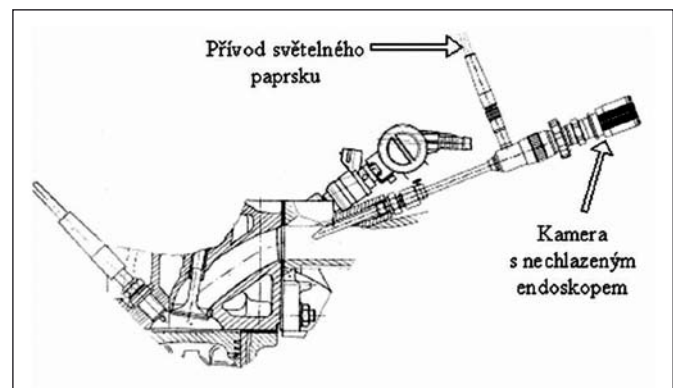
Tab. 1 Oblasti použití vizualizační techniky

Výzkum	Spalování	Vstřikování	Příprava směsi (palivo-vzduch)	Mechanické pohyby
Oblast použití	předstih zážehu	rozvoj vstřiku	smáčení stěny palivem	ventilový rozvod
	šíření plamene	srážky na stěnách potrubí	vstřik do sacího kanálu	pohybující se součásti v motoru
	teplota plamene	směr vstřiku	vývoj vstřiku	
	zapařovací jiskra			

Příklady z praxe:

a) Sledování dějů v sacím traktu prostoru

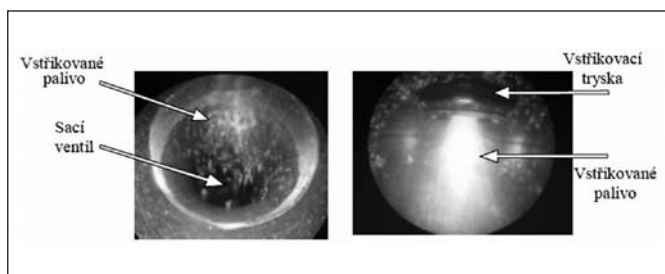
Při sledování dějů v sacím traktu motoru je použita nechlazená endoskopická sonda s osvětlením, která nám umožní v místech bez zdroje světla osvětlit pozorovaný objekt a následně jej zachytit pomocí barevné CCD kamery. S pořízeným záznamem pak můžeme dále pracovat a vyhodnocovat například ulpívání paliva na stěnách nebo spojích sacího potrubí, optimalizovat tvar sacího potrubí nebo nalézt vhodné pozice vstřikovače.



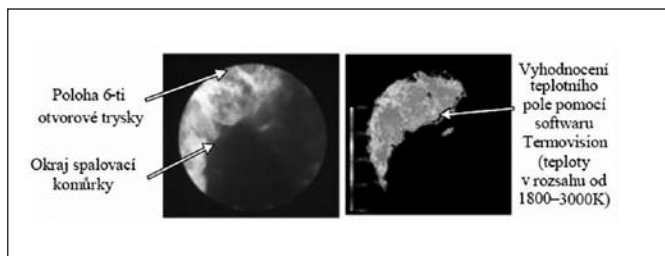
Obr. 5 Pohled na konstrukční uspořádání pro uchycení endoskopu k sacímu potrubí motoru

b) Sledování dějů uvnitř spalovacího prostoru

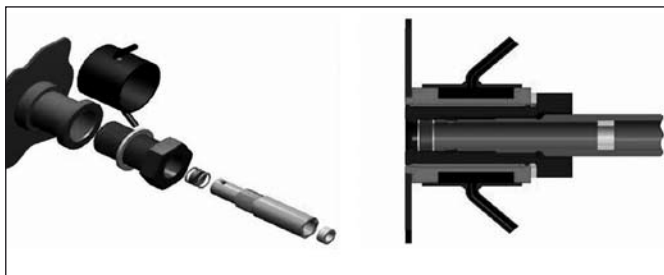
Chceme-li sledovat děje uvnitř spalovacího prostoru, je nutné využít techniky (endoskopu), která vydrží cyklické střídání extrémně vysokých teplot. Tyto teploty mohou dosahovat až 2500 K ve fázi hoření a okolo 300 K ve fázi výměny obsahu válce. Proto je endoskop umístěn ve speciálním pouzdru z křemenného skla, do kterého je přiváděn stlačený vzduch (cca 3 bary), jenž zajišťuje



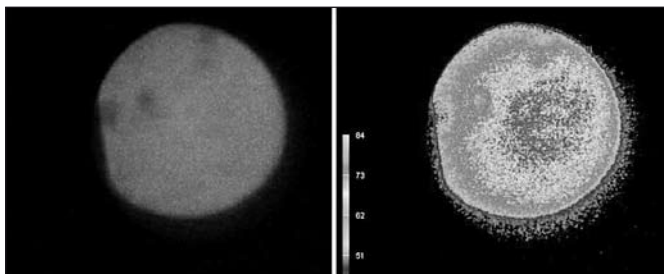
Obr. 6 Pohled do sacího kanálu a na vstřikovací trysku u zážehového motoru



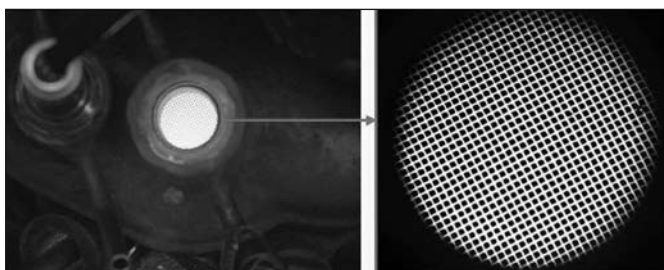
Obr. 9 Ukázka výsledků vizualizace procesu hoření vznětového motoru s kalkulací distribuce teploty plamene pomocí SW Thermovision



Obr. 12 Konstruktivní řešení ochrany endoskopu s vnitřním chlazením vzduchem a vnějším chlazením vodou.



Obr. 13 Pohled na čelní mřížku katalyzátoru bez pomocného osvětlení (střední otáčky motoru, 100% zatížení)



Obr. 16 Čistě safírové okénko poskytuje detailní obraz čelní mřížky katalyzátoru (záznam za klidu motoru, s pomocným osvětlením)

ochlazení optiky endoskopu a tím předchází jejímu poškození vlivem vysokých teplot. Vybavení AVL Visioscope lze použít všude tam, kde teplota v koncové části optické části endoskopické sondy nepřekročí 150 °C. V post-processingu je možné získané snímky dále analyzovat. U naftových motorů lze s výhodou využít nastavby Thermovision, která slouží pro vyhodnocení prostorové distribuce teploty difúzního plamene a koncentrace sazí.

Při vizualizaci hoření homogenních směsí u zážehových motorů nelze pomocí barevné kamery PixelFly zaznamenat obraz plamene; důvodem je velmi nízké světelné záření plamene při spalování homogenní směsi. Pro možnost záznamu a následnou analýzu procesu rozvoje plamene a následného hoření je nutné použít např. digitální kameru DicamPro, která je schopna zaznamenat obraz v černobílém módu s vysokou citlivostí. Získané černobílé snímky lze zobrazit v barevné škále podle intenzity vyzařovaného světla.

e) Sledování dějů ve vstupní partii katalytického reaktoru

V katalyzátoru zážehových motorů jsou teplotní poměry zcela jiné než ve válci motoru: špičkové teploty zpravidla nepřekračují 980 °C, jsou však trvale vysoké, což představuje extrémně vysoké tepelné zatížení spodní partie ochranného pouzdra endoskopu a tím i překročení povolené meze pro optickou čočku endoskopu. Křemenné sklo má tzv. transformační teplotu 1150 °C a zřejmě by teplotu v katalyzátoru vydrželo. Trvale vysoká teplota vně ochranného pouzdra s koncovkou z křemenného skla tedy představuje velké riziko jak pro materiál skleněné koncovky, tak pro optickou část endoskopu.

Jako základ pro účinnou tepelnou ochranu optiky endoskopu a světlovodu bylo použito ploché safírové okénko o průměru 8,9 mm s tloušťkou 3 mm, které dodala firma CRYTUR v Turnově. Maximální pracovní teplota u safíru je 2000 °C. Provedení pro endoskop a světlovod se liší pouze použitím kombinovaného řešení chlazení vzduchem a vodou, což zaručuje dostatečnou ochranu endoskopu. Pro funkci světlovodu zcela postačuje vodní chlazení.

Literatura

- [1] Hentschel W., Block B., Hovestadt T., Meyer H., Ohmstede G., Richter V., Stiebels B., Winkler A.: Optical Diagnostics and Cfd-Simulations to Support the Combustion Process Development of the Volkswagen FsiSr Direct-Injection Gasoline Engine. SAE 2001-01-3648.
- [2] Transparent Research Engine. <http://www.avl.com>.
- [3] Heng-Fei Jiang, Jian-Xin Wang, Shi-Jin Shuai: Visualization and Performance Analysis of Gasoline Homogeneous Charge Induced Ignition by Diesel. SAE 2005-01-0136.
- [4] Beroun, S., Blažek, J., Scholz, C.: Výzkum metod vhodného optického přístupu do vnitřních prostor pístového spalovacího motoru (etapa E1.2.1.3, řešení 2005, 2006). Projekt 1M0568, výzkumná zpráva SM 552/2006, KVM FS TU v Liberci, 19 str., 2006.
- [5] Scholz, C., Blažek, J., Drozda, H.: Vizualizace procesu spalování a vstřikování paliva, KOKA 2002, XXXIII. Mezinárodní konference kateder a pracovišť spalovacích motorů českých a slovenských škol, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, Ráčkova dolina, 2002, ISBN 80-8069-051-0.

Poděkování

Príspevek vznikl v rámci řešení výzkumného záměru s dedikací č. MSM 4674788501 s podporou Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR a v rámci projektu project #1M0568 – Josef Božek Research Centre for Engine and Vehicle Technologies II s podporou Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy.

Broušení čelními stěnami rotujících kotoučů - přenášený moment

V technologickém procesu výroby vysoce kvalitních rovinných ploch jsou aplikovány speciální brousicí stroje využívající relativní pohyb mezi čelními stěnami rotujících kotoučů se svislými rovnoběžnými osami. Je zkoumána kinematika a dynamika přenosu pohybu z hnacího na hnaný kotouč pro případy s pevnou a s proměnnou excentricitou mezi oběma kotouči; tj. vliv vzdálenosti mezi osami a vliv funkce generující změnu této vzdálenosti na nerovnoměrnost otáčení hnacího kotouče, vliv okamžitého převodového poměru.

Klíčová slova: broušení rovinných ploch, kinematika, dynamika, tření, přenos sil a momentů

V technologickém procesu výroby vysoce kvalitních rovinných ploch jsou aplikovány speciální brousicí stroje využívající relativní pohyb mezi čelními stěnami rotujících kotoučů se svislými rovnoběžnými osami. Spodní kotouč je nositelem brusného média, zatímco na kotouči horním (tzv. tmelce) jsou uchyceny opracovávané výrobky (např. broušené nebo leštěné výrobky).

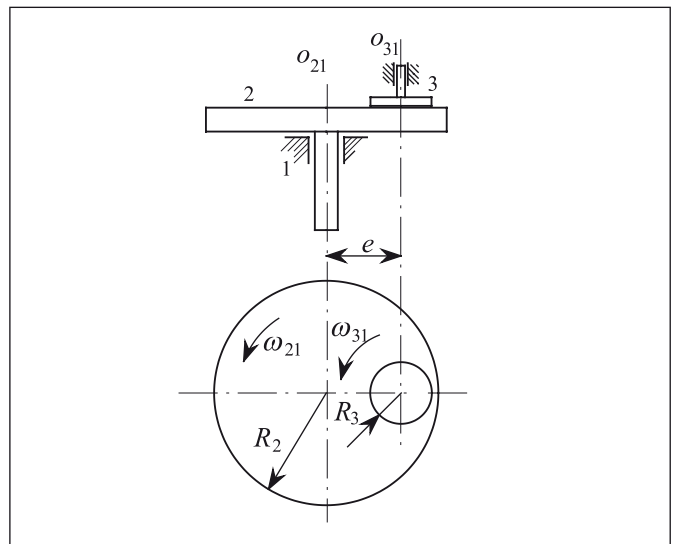
Spodní kotouč koná vždy nucený pohyb. Kotouč horní se otáčí buď působením třecích sil z kotouče spodního, nebo bývá také poháněn z nezávislého zdroje; vedle tohoto základního rotačního pohybu vykonává horní kotouč ještě unášivý pohyb, jehož důsledkem je změna vzájemné vzdálenosti os obou kotoučů. důvodem tohoto unášivého pohybu je rovnoměrné využití celé plochy brousicího kotouče s cílem zachovat jeho rovinnost.

Typy některých brousících strojů využívajících zmiňovaný princip broušení jsou schematicky uvedeny na obr. 1a, b, c. Na prvním obrázku je tzv. jednoexcentrický mechanismus. Tmelka (3) je uložena na vahadle (6) čtyřkloubového mechanismu (1,4,5,6), jehož klika koná rovnoměrný rotační pohyb převodem odvozený od rotace brusného kotouče (2). Poloha tmelky na vahadle je nastavitelná (na obr. není naznačeno).

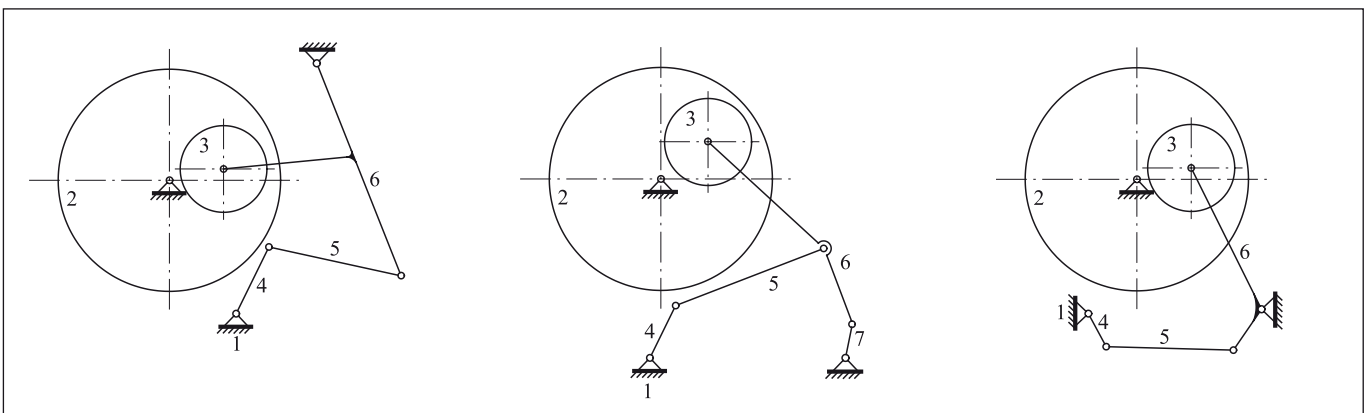
Na obr. 1b je schéma tzv. dvouexcentrického mechanismu. Unášivý pohyb tmelky je zde realizován pětičlenným diferenciálem, jehož kliky (4,7) konají rovnoměrný rotační pohyb s nastavitelným poměrem úhlových rychlostí ω_{41} a ω_{71} .

U mechanismu z obr. 1c je tmelka opět uložena na vahadle (6) čtyřkloubového mechanismu (1,4,5,6) s rozdílnou geometrií než v případě z obr. 1a. Tento stroj je vybaven plynulou regulací otáček brusného kotouče (2) i kliky (4); užitý frekvenční měnič umožňuje měnit poměr úhlových rychlostí ω_{21} a ω_{41} .

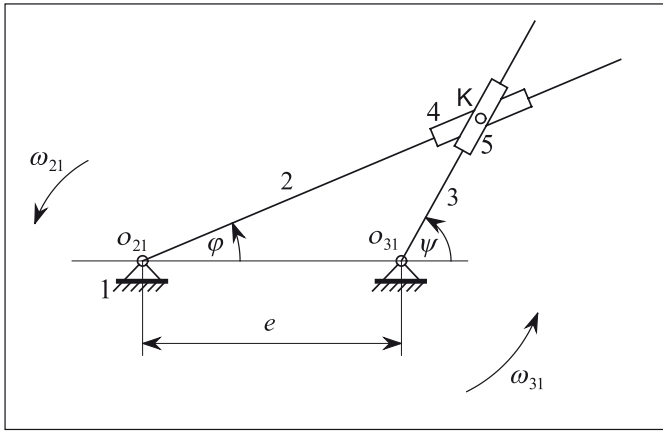
U mnoha mechanismů se tmelka otáčí vlivem třecích sil z brusného kotouče. Teorie přenosu pohybu je uvedena pro **pevně nastavenou vzdálenost e** (excentricitu) mezi osami o_{21} a o_{31} , kotoučů (obr. 2) kinematickou soustavou (obr. 3) se dvěma stupni volnosti, v níž k základní tříčlenné soustavě (1,2,3) tvořené rámem a oběma kotouči je přidána křížová objímka (4,5), jejíž kloub K představuje obecný bod kontaktní plochy kotoučů.



Obr. 2



Obr.1a, obr. 1b, obr. 1c



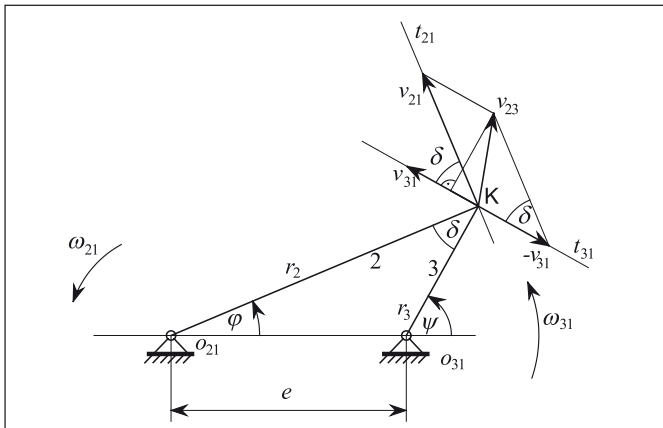
Obr. 3

Předpokládejme $\omega_{21} > \omega_{31}$; elementární třecí síla dT_{23} působí otáčivým účinkem z kotouče 2 na kotouč 3. Velikost této třecí síly je dána Coulombovým vztahem

$$dT_{23} = f dN_{23}; \quad (1)$$

zde f je velikost koeficientu smykového tření mezi dotykovými plochami, dN_{23} je velikost elementární přítláčné síly v obecném bodě dotykové plochy. Směr síly dT_{23} je shodný se směrem relativní rychlosti v_{23} .

Určení relativní rychlosti vychází z obr. 4. Rozklad pohybu je dán vztahem



Obr. 4

$$23 = 21 + 13, \quad (2)$$

z toho pro rychlosti bodu K (vzdálenost r_2 k ose o_{21} a r_3 k ose o_{31}) pak

$$\mathbf{v}_{23} = \mathbf{v}_{21} + (-\mathbf{v}_{31}), \quad (3)$$

$$\text{kde } v_{21} = \omega_{21} r_2, v_{31} = \omega_{31} r_3. \quad (4)$$

Velikost relativní rychlosti plyne z rovnice

$$v_{23}^2 = v_{21}^2 + v_{31}^2 - 2v_{21}v_{31} \cos(\psi - \varphi); \quad (5)$$

dále je

$$r_2 \sin \varphi = r_3 \sin \psi, \quad (6)$$

$$r_2 \cos \varphi = e + r_3 \cos \psi.$$

Dosažením vztahů (6) do rovnice (5) dostaneme po úpravě

$$v_{23} = \omega_{21} \sqrt{(1-\mu)^2 r_3^2 + 2(1-\mu) e r_3 \cos \psi + e^2}, \quad (7)$$

pro převodový poměr $\mu = \omega_{31}/\omega_{21}$.

Otáčivý účinek vzhledem k ose o_{31} má pouze tečná složka třecí síly, tj. složka ležící na nositelce rychlosti v_{31} , na níž leží také tečná složka relativní rychlosti v_{23} .

Tato složka je

$$v_{23t} = v_{21} \cos(\varphi - \psi) - v_{31} = \omega_{21} [(1-\mu)r_3 + e \cos \psi]. \quad (8)$$

Hnací moment všech elementárních třecích sil působících na člen 3 je

$$M_{23} = \int_0^{R_3} \int_0^{2\pi} f p r_3^2 \frac{(1-\mu)r_3 + e \cos \psi}{\sqrt{(1-\mu)^2 r_3^2 + 2(1-\mu) e r_3 \cos \psi + e^2}} d\psi dr_3; \quad (9)$$

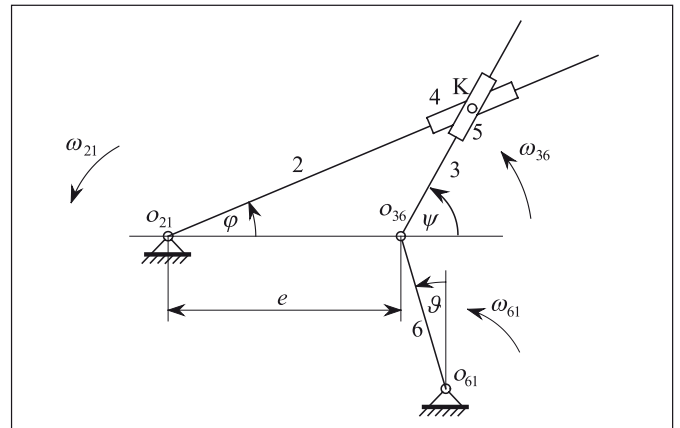
v tomto vztahu značí veličina p měrný tlak v dotykové ploše.

Hranice mezi hnacími a brzdícími účinky elementárních třecích sil je dána body, v nichž $v_{23t} = 0$, což vede k výrazu

$$r_3 = -\frac{e}{1-\mu} \cos \psi; \quad (10)$$

tento vztah je polární rovnicí kružnice o průměru rovném velikosti excentricity e podělené číslem $(1-\mu)$, která má střed na spojnici středů otáčení o_{21}, o_{31} a prochází bodem o_{31} .

Obecnější je **případ proměnné excentricity**. Vydeme z představy uložení středu tmelky (3) na vahadle (6), což principiálně odpovídá mechanismu z obr. 1c; kinematické schéma tohoto případu je na obr. 5.



Obr. 5

K určení relativní rychlosti v_{23} obecného dotykového bodu K vyjdeme z rozkladu pohybu

$$23 = 21 + 16 + 63,$$

což pro rychlosti znamená

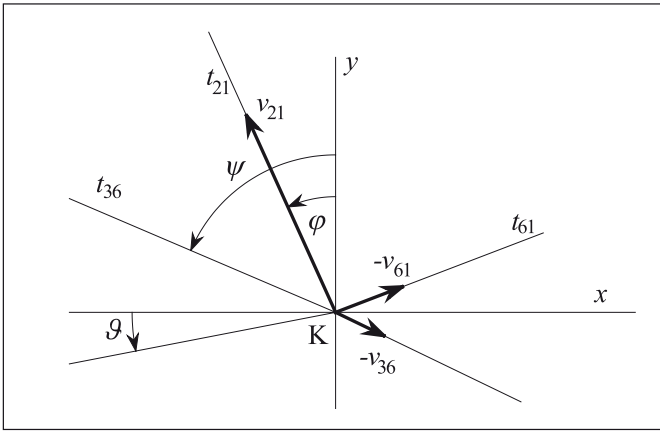
$$\mathbf{v}_{23} = \mathbf{v}_{21} + (-\mathbf{v}_{61}) + (-\mathbf{v}_{36}), \quad (11)$$

kde $v_{21} = \omega_{21} r_2 = \dot{\varphi} r_2$, $v_{36} = \omega_{36} r_3 = \dot{\psi} r_3$, $v_{61} = \omega_{61} r_6 = \omega r_6$; (funkce $\dot{\varphi}(t)$ vyplývá z kinematiky čtyřkloubového mechanismu na obr. 1c, pro naši úvahu ji považujeme za danou).

Rychlosti jednotlivých pohybů dotykového bodu a jejich nositelky (tečny k trajektorii) jsou naznačeny na obr. 6. Vypočteme složky relativní rychlosti

$$v_{23x} = v_{21} \sin \varphi - v_{36} \sin \psi - v_{61} \cos \vartheta, \quad (12)$$

$$v_{23y} = v_{21} \cos \varphi - v_{36} \cos \psi + v_{61} \sin \vartheta;$$



Obr. 6

výsledná rychlost pak

$$v_{23} = \sqrt{v_{23x}^2 + v_{23y}^2} \quad (13)$$

Tečná složka této relativní rychlosti do směru t_{23} je

$$\begin{aligned} v_{23t} &= v_{21} \cos(\psi - \varphi) - v_{36} - v_{61} \sin(\psi - \vartheta) \\ &= \omega_{21} [(1 - \mu)r_3 + e \cos \psi] - \omega_{61} r_3 \sin(\psi - \vartheta). \end{aligned} \quad (14)$$

Hnací moment třecích sil v okamžiku t působící rotaci členu 3 kolem osy o_{36} je analogicky ke vztahu (9) dán výrazem

$$M_{23}(t) = \int_0^{R_3} \int_0^{2\pi} f p \frac{r_3^2}{v_{23}(t)} \left\{ \omega_{21} [(1 - \mu)r_3 + e \cos \psi] - \omega_{61}(t) \sin(\psi - \vartheta(t)) \right\} d\psi dr_3, \quad (15)$$

kde jsou zdůrazněny veličiny časově proměnné. Tento moment má tedy proměnnou velikost, důsledkem je kolísání otáček tmelky, nerovnoměrnost jejího pohybu, což bylo potvrzeno měřením [3]. K dosažení rovnoměrného broušícího procesu je proto výhodnější, koná-li tmelka (3) nucený rotační pohyb kolem své osy. Dále je vhodné volit průběh unášivého pohybu, tj. veličin $\omega_{61}(t)$ a $\vartheta(t)$ tak, aby trajektorie jednotlivých bodů obrobků pokrývaly rovnoměrně celou plochu broušícího kotouče pro zachování jeho rovinnosti. Možnosti takového naladění celého broušícího mechanismu jsou ve vhodné volbě $\omega_{36}(t)$, $\omega_{61}(t)$, $\vartheta(t)$; tato problematika přesahuje předpokládaný rámec článku.

Literatura

- [1] Vrzala R., Petříková I.: Kinematické poměry při broušení čelními stěnami rotujících třecích kotoučů s rovnoběžnými osami. Sborník semináře k životnímu jubileu prof. Ing. Cyrila Höschla, DrSc. Liberec, 2005.
- [2] Vrzala R., Petříková I.: Mechanika přenosu pohybu čelními stěnami třecích kotoučů s rovnoběžnými osami. Sborník X. Conference on the Theory of Machines and Mechanisms. Liberec, 2008, (v tisku)
- [3] Varga Z.: Technologie broušení rovinných ploch syntetických monokrystalů. Diplomová práce, TU v Liberci, 2007.

doc. Ing. Rudolf Vrzala, CSc., Technická univerzita v Liberci, Studentská 2, 461 17 Liberec, tel.: +420 485 354 104, e-mail: rudolf.vrzala@tul.cz
 Ing. Iva Petříková, Ph.D., Technická univerzita v Liberci, Studentská 2, 461 17 Liberec, tel.: +420 485 354 147, e-mail: iva.petrikova@tul.cz

Alexey POPOV, Department of Machining and Assembly, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Liberec

Analysis of the diamond grinding wheels destruction

A classification of possible models of the diamond grinding wheels destruction in the form of local breaking, shifting, and rotation of diamond grits, taking place independently, in sequence or in one time, has been presented. One has been stated, that destruction of the diamond wheels on the resin and metal bonds occurs generally as a result of local rotations of the diamond grits in the bond, the number of which amounts 50% of total number of grits, not participating in the process of cutting.

Key words: diamond wheel, diamond grit, grinding, resin bond wheels, metal bond wheels

1. INTRODUCTION

The diamond grinding wheels are in wide use in industry. Design of new grinding wheels with wheel long-life necessitates a study of the wheel destruction process essence in order to clear up the possibilities of its deceleration. At present the published data as to the relationships of different destruction models are absent.

2. METHODS OF EXPERIMENTS

A classification of possible models of diamond grinding wheels destruction in the form of local breaking, shifting, and rotation of diamond grits is proposed in given work.

The first destruction model is characterized by forming of a crater on the wheel working surface with the leavings of broken diamond grit inside the crater (Fig. 1a). It is assumed, that in this case the diamond grit destruction occurs because of the ultimate load exceeding on the grit.

Second destruction model is characterized by forming on the wheel working surface of the elongated crater, without the leavings of broken diamond grit inside of it (Fig. 1b). It is assumed in this case, that the bond destruction behind the diamond grit occurs because of exceeding of the ultimate load on the bond in this area.

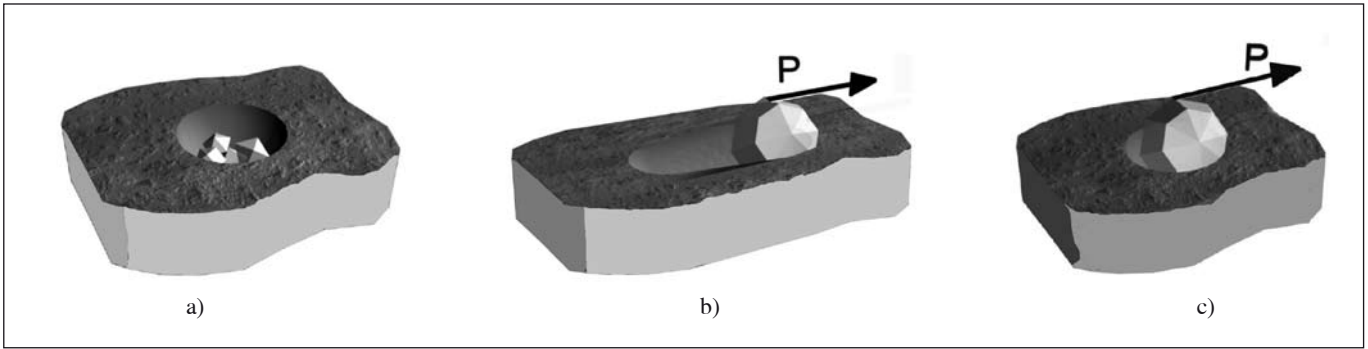


Fig. 1 Working surface of the diamond grinding wheel: after the grit breaking (a); after the grit shifting (b); after the grit rotation in the bond (c)

At that the diamond grit is not broken. It is shifted under the feed effect along the bond, forming the elongated crater. After that the grit is removed away from the wheel working surface due to the centrifugal forces action.

Third destruction model is characterized by forming on the wheel working surface of the crater, the form of which coincides with the diamond grit form, without the leavings of broken diamond grit within of it (Fig. 1c). It is assumed, that the destruction in this case proceeds along the “diamond grit – bond” interface in view of the grit local rotation conditioned by destruction of its joining with the bond. At that the crater on the wheel working surface coincides with the grit form [1]. After local rotation and destruction of the joining between the grit and bond the grit is removed away from the wheel working surface due to the centrifugal forces action.

Most likely, these processes may proceed independently, in sequence or in one time.

Analysis of the destruction models listed above is based on the research of the diamond wheels efficiency with different bonds at the grinding of different materials. The cemented carbide was ground by the resin bond wheels of 1A1 form $100 \times 6 \times 3$ mm with the diamond grits size $106/90 \mu\text{m}$ and 100% concentration at the wheel peripheral speed 25 m/s, feed rate 2500 mm/min, and depth of cut 1 mm with use of the coolant fluid on the water base. The glass was ground by the metal bond wheels of the same form with the diamond grits size $106/90 \mu\text{m}$ and 100% concentration at the wheel peripheral speed $V = 25$ m/s, feed rate $S = 1500$ mm/min, and depth of cut 1 mm with use of the coolant fluid on the water base. Using the microscope, the number of grits on the wheel working surface, not participating in the cutting process, was determined. The grits, not participating in the cutting, were classified by the outward appearance, typical for every destruction model (Fig. 1). The number of grits was counted in the microscope ocular sight with the area 0.4 mm^2 . One was classified 250 - 300 grits, not participating in the cutting, for every meaning of the abrasive toughness.

3. RESULTS OF EXPERIMENTS

Fig. 2 shows the total dependence of the relationship of basic destruction models of the resin bond diamond grinding wheels, working in the self-sharpening condition, upon the grits toughness after treatment of 30 g cemented carbide. It follows from the results obtained, that, for example, at the abrasive toughness 10 N the number of rotated grits amounts 53% of total grits number, not participating in the cutting process; the number of failed grits is about 35%, and that of shifted grits – 12%. The resin bond diamond wheels are produced, in general, with use of abrasives with toughness of the order of $5 \div 15$ N. Analysis of the dependencies obtained for this case has shown, that the destruction of such wheels occurs mainly as a result of local rotations of the grits in the bond, the number of which amounts $40 \div 65\%$ of total grits number, not participating in the cutting process. At that the numbers of broken and shifted grits amount $25 \div 30\%$ and $10 \div 15\%$,

respectively. Thus, it is most efficiently to decrease the number of locally rotated grits for prevention of destruction of the resin bond diamond wheels, working in the self-sharpening condition in the process of cutting.

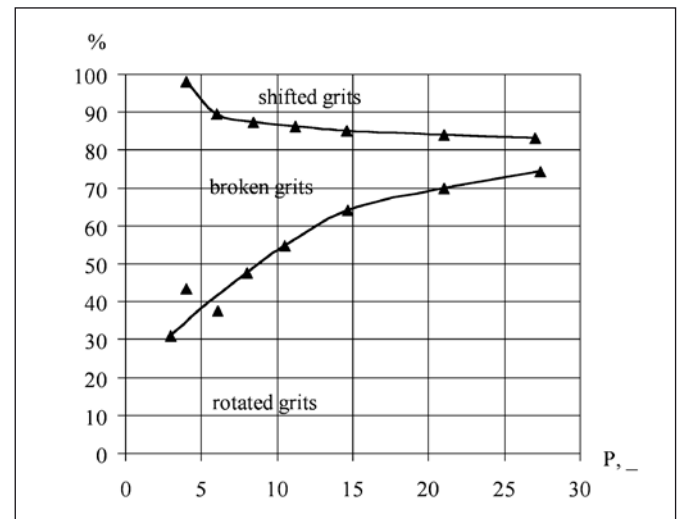


Fig. 2 Relationships of the basic destruction models of the resin bond diamond wheel for different diamond grits toughness P under grinding of cemented carbide: 1 – shifted grits; 2 – broken grits; 3 – rotated grits

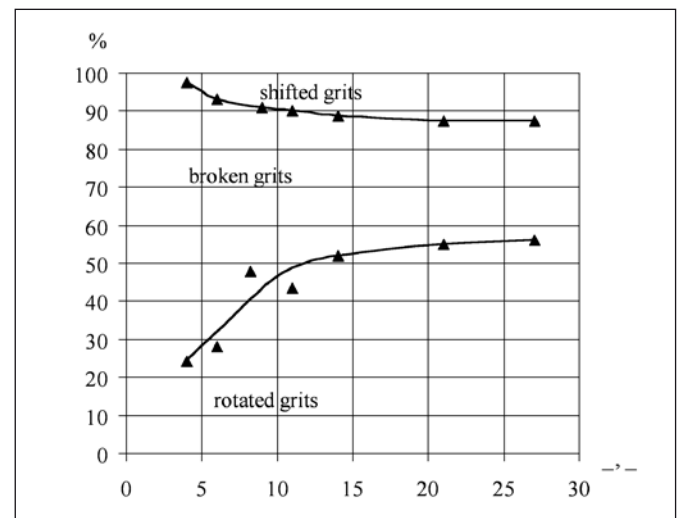


Fig. 3 Relationships of the basic destruction models of the metal bond diamond wheel for different diamond grits toughness P under grinding of glass: 1 – shifted grits; 2 – broken grits; 3 – rotated grits

Fig. 3 shows the dependence of the relationship of basic destruction models of the metal bond diamond wheels, working in the cutting capacity loss condition, after treatment of 200 g glass. The cutting capacity loss occurs in that case at the diamond grits wear up to the bond level. After that the wheel was subjected to abrasive effect for the cutting capacity restoring. It follows from the experimental data, that, for example, at the abrasive toughness 20 N the number of rotated grits amounts 54% from total grits number, not participating in the process of cutting; the number of broken grits is about 33%, and that of shifted grits – 13%. The metal bond diamond wheels are produced, in general, with use of abrasives with toughness of the order of 15 ÷ 30 N. Analysis of the dependencies, obtained for given toughness range, has shown, that the destruction of the metal bond wheels occurs mainly as a result of the grits local rotations in the bond, the number of which amounts 50 ÷ 55% of total number of destructions. At that the numbers of broken and shifted grits amount 30 ÷ 40% and 10 ÷ 15%, respectively. Thus, it is most efficiently to decrease the number of locally rotated grits for prevention of the destruction of the metal bond diamond wheels, working in the cutting capacity loss condition in the process of cutting.

4. CONCLUSIONS

1. A classification of possible destruction models of the diamond grinding wheels, such as the local breaking, shifting and rotation

of the diamond grits, taking place independently, in sequence or in one time, has been presented.

2. Destruction of the resin bond wheels, working in the self-sharpening condition in the process of cutting, occurs, in general, as a result of local rotations of the diamond grits in the bond, the number of which amounts 40 ÷ 65% of total grits number, not participating in the process of cutting.

3. Destruction of the metal bond wheels, working in the cutting capacity loss condition in the process of cutting, occurs, in general, as a result of local rotations of the diamond grits in the bond, the number of which amounts 50 ÷ 55% of total grits number, not participating in the process of cutting.

References

- [1] WARNECKE G., WIMMER J., Stock removal and wear in deep grinding high-performance ceramics. *Industrial diamond review*, 1995, 3, 126-132.

This paper relates to the work on the MSM 4674788501 research projects which are supported by the Ministry of Education of the Czech Republic.

Ing. Alexey Popov, DrSc., Department of Machining and Assembly, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Liberec, Studentská 2, 461 17 Liberec, Czech Republic, tel.: +420 224 358 604, e-mail: alexey.popov@tul.cz

VALÍČEK, J.¹, RUSNÁK, J.², MÜLLER, M.³, HRABĚ, P.³, KADNÁR, M.², HLOCH, S.⁴, KUŠNEROVÁ, M.¹

¹ VŠB-TU Ostrava

² Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre

³ Česká zemědělská univerzita v Praze

⁴ Technická univerzita v Košicích

Geometrické aspekty drsnosti povrchu klasických a netradičních technologií

ÚVOD

Drsnost povrchu je vlastnost, která ve značné míře ovlivňuje např. životnost a spolehlivost součástek, energetické ztráty, odolnost proti opotřebení, tribologické vlastnosti apod. Například z hlediska technologie obrábění strojních součástí je dnes drsnost povrchu jedním z normalizovaných kritérií hodnocení jejich jakosti. Drsnost povrchu podstatně ovlivňuje průběhy fyzikálních a chemických jevů při provozu součástí, tření, účinnost těsnění, funkční spolehlivost, životnost a ekonomiku provozu strojů a zařízení.

Optická praxe dokazuje, že drsnost povrchu optických ploch ovlivňuje mimo jiné kvalitu zobrazení optických systémů nebo fokusaci záření. Elektronická praxe podobně dokazuje, že drsnost povrchu je často směrodatným faktorem určujícím hustotu informace uložitelné na magnetické pásky, bubny a disky počítačů. Drsnost povrchu rovněž ovlivňuje činnost tenkovrstevných komponentů a mikroobvodů bezprostředním působením na elektrický odpor. Je tedy zřejmé, že měření drsnosti povrchu pevných látek je důležitou metrologickou otázkou.

DRSNOST POVRCHU

Nejširší aplikační oblastí při uplatňování výsledků vědy a výzkumu metod, přístrojů a zařízení pro účely měření kvality povrchu je bezesporu strojírenství. Požadavky na kvalitu a úroveň metrologických metod se prudce zvyšují, roste tlak na vývoj co

nejpřesnějších kontrolních technik. Právě toto je multidisciplinární pole pro působnost a úzkou spolupráci odborníků z oboru fyziky, fyzikálního a strojně-technologického inženýrství. Drsnost povrchu strojní součásti je obecně definována jako drobná nerovnost na obrobeném povrchu, způsobená stopami po nástroji, nerovnoměrným řezáním, chvěním apod. při obrábění. Na neobráběných plochách vzniká drsnost povrchu otisky licí formy, zápustky, průvlastky, popř. deformací materiálu vlivem působení tlakových, tahových, ohybových a smykových, tedy kombinovaných napětí.

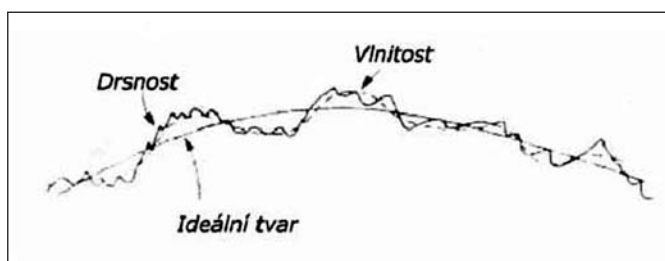
Drsnost povrchu se posuzuje podle velikosti vyvýšenin a prohloubenin plochy. Zjišťuje se opticky zrakem, lupou, mikroskopem, interferencí světla nebo elektrickým měřením, popř. také laserem a mechanickými profilometry [1].

Podle [2] můžeme drsnost povrchu považovat také za fyzikální stav. Například při obrábění působí v povrchové vrstvě vysoké tlaky a teploty, které způsobují i změnu struktury této vrstvy. Tato změna struktury vede ke ztužení materiálu a k dalším fyzikálním nebo i chemickým změnám.

Obrobený povrch se vždy odchyluje od ideálního geometrického tvaru. Nulová drsnost, tj. ideální „hladkost“, je na technických površích prakticky nedosažitelná, snad jen s výjimkou hladiny kapaliny v bez-otřesových podmínkách, takže všechny technické povrchy mají vlastnost „drsnost“ [3].

Nerovnosti obrobených součástí, zahrnující celý komplex odchylek od geometrického tvaru povrchu, lze podle [4], [5], z technologických a funkčních hledisek, klasifikovat takto (obr. 1):

- **Tvarové odchylky** jsou to odchylky od kruhovitosti, válcovitosti, rovinnosti apod., které se vyznačují relativně malou výškou nerovností v poměru k rozteči, jejichž příčinou je špatné upnutí, deformace obrobku, chyby ve vedení stroje, opotřebení.
- **Vlnitost** jsou charakterizovány poměrně pravidelnými tvary nerovností blízkými sinusovému tvaru, opakujícími se poměrně pravidelně se stejnou roztečí a amplitudou, jejichž příčinou je chvění stroje či nástroje, nízká tuhost systému nástroj-stroj-obrobek.
- **Drsnosti periodické** jsou tvořeny převážně nerovnostmi, jejichž tvar a opakovatelnost na povrchu obrobené součásti jsou periodicky rozloženy. Jejich příčinou je tvar nástroje, podmínky řezání, broušení, hoblování.
- **Drsnosti náhodné** jsou tvořeny převážně nerovnostmi, jejichž tvar a opakovatelnost na povrchu obrobené součásti jsou náhodně rozloženy, jejich příčinami jsou náhodné vlivy během tvorby povrchu.



Obr. 1 Geometrický model povrchu

Tvarové odchylky a vlnitost jsou označovány jako makrogeometrie, drsnosti pak jako mikrogeometrie povrchu. Výše uvedené odchylky od ideální geometrie povrchu se zhruba rozlišují pomocí poměru P rozteče těchto odchylek od ideální plochy povrchu ku výšce těchto odchylek vztahených k téže ploše povrchu, tj.:

$$P = \frac{\text{rozteč odchylek od ideální plochy povrchu}}{\text{výška odchylek od ideální plochy povrchu}} \quad (1)$$

Zpravidla se uznávají tyto přibližné relace mezi parametrem P a druhem odchylky povrchu od ideální geometrie:

- tvarová odchylka - $P > 1000$,
- vlnitost - $P \in (50, 1000)$,
- drsnost - $P < 50$.

Vztah mezi funkcí a jakostí povrchu plochy, která je vytvořena jistou technologickou metodou, je možné hodnotit ze dvou hledisek [1]:

- první hledisko představuje prostorové uspořádání (textura, morfologie) povrchu, které je vyjádřeno především jeho drsností,
- druhé hledisko charakterizuje fyzikální a chemické vlastnosti povrchové vrstvy součásti.

Jejich ovlivnění metodami výroby ve vztahu k funkci lze vyjádřit pojmem integrita povrchu. Integrita povrchu tak v sobě zahrnuje podmínky, za kterých funkční povrch vzniká, účinky technologických metod a jejich vliv na vlastnosti nově vytvořené plochy a dává je do vztahu s funkčními požadavky na výrobek.

METODY HODNOCENÍ TOPOGRAFIE POVRCHU

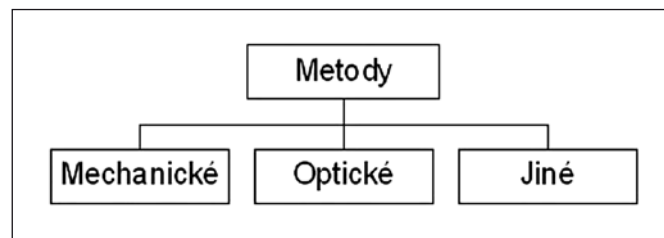
Kontrola kvality povrchů je zejména v dnešní době velmi významnou součástí přípravy povrchů u všech typů technologií používaných k jejich vytváření [6].

Od roku 1930, kdy byly vyvinuty přístroje pro měření topografie povrchu, byl zaznamenán velký pokrok jak v metodách, tak

i v zařízeních pro měření. Výrazným pokrokem bylo uplatnění digitálních metod v šedesátých letech, které také znamenaly možnost hodnocení povrchu metodou 3D [1].

ROZDĚLENÍ METOD PRO HODNOCENÍ TOPOGRAFIE POVRCHU

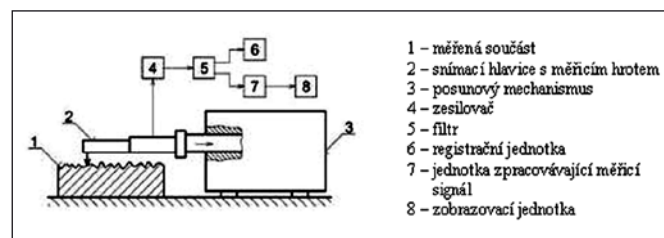
Metody a přístroje pro měření topografie povrchu, jak je poměrně vyčerpávajícím způsobem uvádí literatura [1], lze zjednodušeně rozdělit na tři základní skupiny podle upraveného schématu na obr. 2.



Obr. 2 Rozdělení metod pro hodnocení topografie povrchu

Mechanické metody

Mechanické (dotykové) metody jsou doposud nejrozšířenějšími metodami, zejména ve strojírenské praxi. Jejich výhodou je přímé měření a možnost použití pro všechny typy povrchů, lze jimi převádět analogový záznam do digitální formy, a také lze naměřené hodnoty použít jako vztahné a srovnávací hodnoty pro jiné metody měření. Výhodou těchto metod je také jejich přesná reprodukovatelnost, tj. schopnost zobrazit měřený geometrický profil opakovaně a identicky. Nicméně v důsledku tlaku na hrot snímače dochází k elastické a plastické deformaci v povrchové vrstvě. Intenzita deformace povrchu hrotem závisí na tvrdosti povrchu. Ve většině případů dochází k tomu, že hrot snímače poškodí měřený povrch, což je nevhodné nejen pro hodnocení povrchu, ale i pro výsledek měření [1], [6]. Na obr. 3 je uvedeno schéma dotykového profilometru.



Obr. 3 Schematické znázornění principu kontaktního profilometru [7]

Zhodnocení výhod a nevýhod mechanických metod měření topografie povrchu je uvedeno v tab. 1.

Tab. 1 Výhody a nevýhody mechanických metod měření topografie povrchu

Výhody	Nevýhody
měření parametrů topografie povrchu je přímé	destrukce povrchů u měkkých materiálů
Lze použít pro kalibraci výsledků z nepřímých metod	relativně pomalý pohyb hrotu po měřeném povrchu
velký rozsah rozlišení ve směru kolmém na plochu	neumožňuje kontinuální kontrolu a řízení kvality povrchu
vysoká rozlišovací schopnost	měření nemůže být dálkové
možnost měření v nečistém prostředí	pouze 2D měření

Optické metody

Vhodnou alternativou měření topografie povrchu dotykovými profilometry jsou optické metody. Jedná se o bezdotykové měření, čímž je vyloučeno poškození měřeného povrchu. Dotykový hrot je nahrazen světelným paprskem, který se odráží nebo rozptyluje na měřeném povrchu. Interakce mezi světelným paprskem a povrchem závisí na vlnové délce světla, drsnosti povrchu a na vlastnostech měřeného vzorku. Hloubka vnikání světelného paprsku také ovlivňuje výsledek měření. Tato hloubka se mění podle součinitele absorpce materiálu. Nevýhodou optických metod je jejich nepřímé měření, a proto je nutno experimentálně získaná data optickými metodami porovnávat s daty získanými kontaktním profilometrem. Zhodnocení výhod a nevýhod optických metod měření topografie povrchu je uvedeno v tab. 2.

Tab. 2 Výhody a nevýhody optických metod měření topografie povrchu

Výhody	Nevýhody
schopnost kontinuální kontroly a řízení kvality povrchu	měření parametrů topografie povrchu je nepřímé
opakovatelnost měření	složitější interpretace výsledků
bezkontaktnost a nedestruktivnost	ztížená korelovatelnost na normované parametry
možnost měření z větší vzdálenosti	
okamžité výsledky	

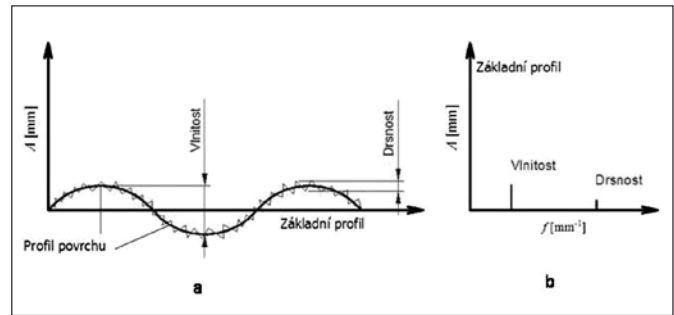
Jiné metody

Existuje celá řada metod, které pracují na jiném principu než na mechanickém nebo optickém. Zde je proveden krátký popis některých nejznámějších metod:

- Měření nerovnosti povrchu proudem stlačeného vzduchu – energetická ztráta výstupního proudu vzduchu určuje stupeň nerovnosti [1].
- RTG metoda – využívá atomárních vlastností materiálu povrchu po jejich iniciaci X-paprsky, jejichž vlnová délka je přibližně stejná jako vzdálenost atomu v krystalické mřížce.
- SEM (scanning electron microscopes) – je založena na analýze proudu elektronů odražených povrchem a kalibrací na parametry topografie povrchu (elektrony jsou urychlovány vysokonapětovým elektrostatickým polem mezi dvěma nebo třemi magnetickými čočkami).
- STM a AFM (scanning tunneling microscopes a atomic force microscopes) – stanovují diference ve vlastnostech tunelového efektu (STM) a v charakteru meziatomárních sil (AFM) vlivem nerovnosti povrchu. Metody se aplikují společně, protože jejich výsledky se vzájemně doplňují, aby vytvářely i topograficky komplexní obraz snímaného povrchu.
- MFM (magnetic force microscopes) umožňuje na základě zmagnetování studovaného vzorku snímat jeho magnetické projevy a jejich analýzou, kalibrací a korelací určit funkční vztahy popisující topografii povrchu.

NORMOVANÉ PARAMETRY PROFILU POVRCHU

Podle normy [8] se rozlišuje základní profil P , profil vlnitosti W a profil drsnosti R viz obr. 4a. Dá se říci, že základní profil je ideálně hladký povrch. Profil vlnitosti je charakterizován nízkými frekvencemi a vysokými amplitudami. Profil drsnosti je charakterizován vysokými frekvencemi a nízkými amplitudami. Na obrázku vidíme, že na vlnitost je superponována drsnost povrchu. Pro tento profil povrchu je zde uvedena amplitudově-frekvenční charakteristika, viz obr. 4b, kde vidíme, že základní profil povrchu je totožný s osou y , vlnitost se objevuje v oblasti nízkých frekvencí a drsnost povrchu se objevuje v oblasti vysokých frekvencí. Toto je však jen



Obr. 4 Výškové fluktuaace profilu povrchu dle normy a) a jeho amplitudově-frekvenční spektrum b)

modelová situace, skutečné povrchy mají daleko složitější amplitudově-frekvenční spektra. Proto se často realizuje amplitudově-frekvenční dekompozice na jednotlivé spektrální úrovně.

Mezi nepoužívanější normované parametry hodnocení drsnosti povrchu patří:

Střední aritmetická úchylna profilu Ra je přednostní výškovou charakteristikou drsnosti povrchu. Je to střední aritmetická hodnota absolutních úchylek profilu v rozsahu základní délky. Odráží časový průběh nerovnosti povrchu, avšak její praktický význam je značně omezen tím, že nemá přímý vztah k žádné důležitější fyzikální veličině.

$$Ra = \frac{l}{l_p} \int_0^{l_p} |y(x)| dx \quad (2)$$

nebo

$$Ra \approx \frac{l}{n} \sum_{i=1}^n |y(x_i)| \quad (3)$$

kde je: l_p - měřená délka, [m]
 $y(x)$ - funkce popisující profil, [-]
 $y(x_i)$ - souřadnice n bodů profilu povrchu [-] v mezích měřené délky, $i = 1, 2, 3, \dots, n$

Střední kvadratická úchylna profilu Rq je kvadratickou analogií parametru Ra . Z hlediska kvantitativního hodnocení amplitud nerovností povrchu je nejdůležitější hodnotou, protože reflektuje jeho časový průběh a současně má přímý vztah k jeho energetickému obsahu a je tedy i měřítkem nebezpečnosti a škodlivosti nerovností povrchu. Je definována zápisem:

$$Rq = \sqrt{\frac{l}{l_p} \int_0^{l_p} y^2(x) dx} \quad (4)$$

nebo

$$Rq \approx \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2(x_i)} \quad (5)$$

Největší výška nerovnosti profilu Rz je výšková charakteristika drsnosti povrchu, určená vzdáleností mezi čarou výstupků profilu a čarou prohlubní profilu v rozsahu základní délky. Odráží časový průběh nerovností povrchu, avšak její praktický význam je značně omezen tím, že nemá přímý vztah k žádné důležitější fyzikální veličině.

$$Rz = Zp + Zv, \quad (6)$$

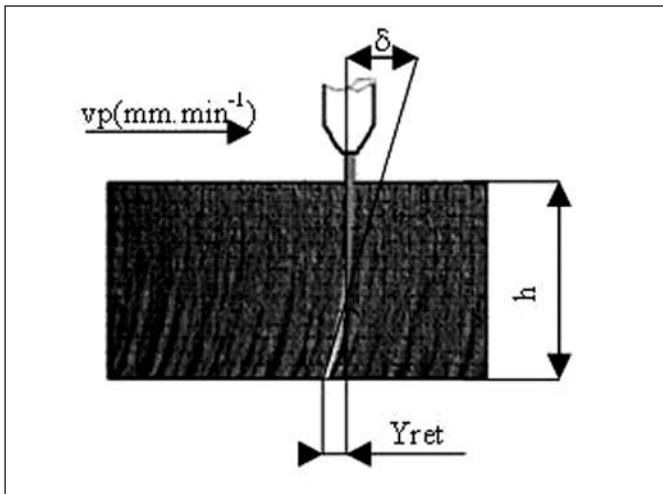
kde je: Zp - výška největšího výstupku v rozsahu základní délky l_r [μm]
 Zv - hloubka nejnižší prohlubně v rozsahu základní délky l_r [μm]

Drsnost povrchu, tak jak je dnes určována dle normy, nevystihuje všechny důležité charakteristiky povrchu pro získání informací o jeho chování za provozu. Důkazem může být to, že dva povrchy, které mají stejnou hodnotu Ra , mohou být zcela rozdílné ve svém chování z hlediska funkčnosti. Nejmodernější hodnocení nerovností povrchu se provádí pomocí integrální metody na základě statistické a spektrální analýzy [1].

POROVNÁNÍ KLASICKÝCH A NETRADIČNÍCH TECHNOLOGIÍ Z HLEDISKA TOPOGRAFIE POVRCHŮ

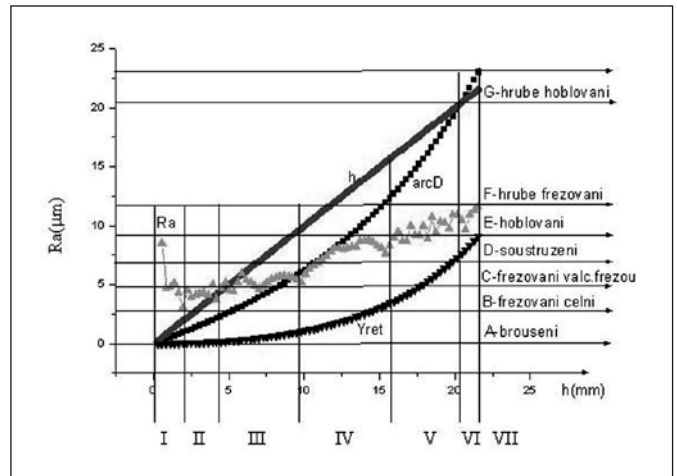
V teoretickém řešení přetvárnosti materiálu a okamžitého stavu dělicí stěny v řezu se principiálně vychází z integrity soustavy: technologické parametry-nástroj-materiál-topografie povrchu a z parametrů vytypovaných geometrických prvků, které jsou měřitelné na povrchu finální stěny dělicího řezu. Jako příkladu pro analogii můžeme použít technologii hydroabrazivního dělení (AWJ). Pracovním nástrojem je zde vysokou rychlostí se pohybující proud směsi vody, abraziva a vzduchu. Z hlediska mechanického byl již definován jako obráběcí nástroj flexibilní. Analogické křivení a charakter topografie povrchu mají i vzorky vytvořené laserem a plazmou.

Oproti mechanicky tuhým nástrojům používaným v klasických obráběcích technologiích se flexibilně přizpůsobuje odporovým silám, kterými se obráběný materiál brání proti deformaci a dezintegraci své struktury (obr. 5). Tato vlastnost na jedné straně samozřejmě způsobuje velké problémy s udržením požadovaných geometrických i výkonových parametrů. Na straně druhé je však dobře využitelná pro studium a analýzu deformačních a silových poměrů na řezech, mechanismu dezintegrace materiálu a procesu generování topografické struktury a textury dělicích stěn.



Obr. 5 Stopy působení hydroabrazivního proudu ve směru řezu – retardace proudu Y_{ret} a deviace δ proudu

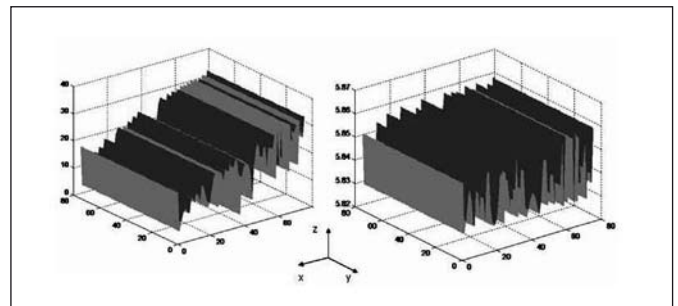
Na obr. 5 je vidět typické křivení řezné stopy. Pro úhel δ_i platí vztah $\text{arctg } \delta_i = Y_{ret}/h_i$, kde i představuje průběhovou hodnotu rastrování vzniklé topografie povrchu. Můžeme na tomto místě rozlišit tzv. generální směr tj. $\text{tg } \delta = Y_{ret}/h$ a lokální změny, které jsou určeny jednotlivými průběhovými změnami v různých horizontálních úrovních i . Promítnutím skutečné, tj. zakřivené stopy hydroabrazivního proudu do směru h redukuje retardaci a deviaci na nulové hodnoty $Y_{ret} = 0$ mm, $\delta = \text{arcD} = 0^\circ$, jakých je dosahováno tuhým řezným nástrojem. Hodnoty drsnosti podle parametru Ra na jednotlivých hloubkových horizontech dosahují amplitud, které jsou typické různým klasickým technologiím. Lze konstatovat, že na dostatečně hlubokém řezu AWJ je postupně směrem do hloubky zastoupena celá řada klasických technologií. Na obr. 6 je tato analogie pro ocel ČSN 17 251 vyjádřena graficky.



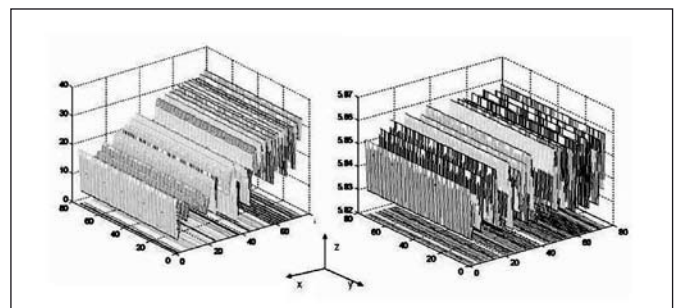
Obr. 6 Analogie technologie AWJ s klasickými technologiemi třískového obrábění podle distribuce hlavních topografických parametrů Ra , Y_{ret} , arcD (δ) v závislosti na hloubce dělicího řezu $h = 22$ mm; ocel ČSN 17 251; rychlost posuvu řezné hlavy 143 mm/min

Klasické technologie jsou označeny písmeny A až G a tříděny podle typicky dosahovaných hodnot drsnosti obráběných povrchů. Technologiím odpovídají také adekvátní hodnoty hloubky i hodnoty retardace a deviace stopy proudu AWJ. A naopak celkovou hloubku h odřezanou technologií AWJ lze rozdělit na zóny I až VI a hovořit o hloubkové zonálnosti hydroabrazivního řezu. Napětově-deformační poměry, rozložení řezných sil a úběry budou adekvátní příslušné klasické technologii.

Výjimku tvoří iniciační zóna I, kterou lze z těchto hledisek přirovnat k operaci klasického zavrtávání. Hloubková pozice zóny I až VI a také analogické zastoupení klasických technologií A až G se bude měnit podle obráběného materiálu a parametrů technologie AWJ, resp. podle volby třísky nebo obráběcí rychlosti. Pro ilustrační názornost je výklad obr. 6 doplněn 3D projekcemi na obr. 7 a obr. 8.



Obr. 7 Topografický profil povrchu AWJ a povrch obroběný frézováním podle podmínek na obr. 6 v 3D projekci



Obr. 8 Topografický profil povrchu AWJ a povrch obroběný frézováním podle podmínek na obr. 6 ve fraktální 3D projekci

U obr. 7, 8 je krok vzorování ve směrech x a y $Kst = 0,35$ mm. Souřadný systém -osa z -vertikální je Ra v μm , osa y je měřená délka v mm krát $Kst = 0,35$, x je hloubka řezu h v mm krát $Kst = 0,35$.

ZÁVĚR

V předkládaném příspěvku je provedena analýza současného stavu metrologie jakosti povrchu. V úvodních partiích je popsána charakteristika povrchů po stránce fyzikální, technické a metrologické s tím, že je kladen důraz na hodnocení významnosti měření povrchů, jejich metrologickou klasifikaci a na principiální charakteristiky měřících metod. Na základě řady experimentálních výsledků a empirie je na vybraném příkladu diskutována vysledovaná analogie mechanismu obrábění materiálu technologiemi s flexibilními a tuhými nástroji. Na základě uvedených poznatků lze v prvním přiblížení využít rozsáhlých zkušeností a výsledků výzkumu z klasických způsobů obrábění také v oblasti netradičních technologií. To se týká zejména analytického dořešení napětově-deformačních, silových a úběrových, ale i topografických parametrů na řezech realizovaných technologiemi s flexibilními reznými nástroji.

Poděkování

Příspěvek vznikl v rámci řešení a za podpory těchto projektů: IGS-HGF VŠB TUO-2008 2101/516, VEGA 1/4157/07, MŠMT No. MSM6198910016 a IGA TF 31140/1312/313105.

Literatura

- [1] Bumbálek, B., Obvody, V., Ošťádal, B.: Drsnost povrchu. Praha, SNTL 1989
- [2] Mlčoch, L., Slimák, I.: Řízení kvality a strojírenské metrologie. Praha, SNTL 1987
- [3] Brezina, I.: Drsnost povrchu – význam kvantifikácie drsnosti – metrologické aspekty – vývojové tendencie. Jemná mechanika a optika, 1990, č.7, s. 245
- [4] Tykal, M., Melichar, M.: Význam hodnocení vlnitosti povrchu v konstrukci a výrobě přesných mechanismů. Jemná mechanika a optika, 1986, č. 6, s. 143 – 147
- [5] Ohlídal, M., Ohlídal, I., Tykal, M., Pražák, D., Unčovský, M.: Měření drsnosti povrchu ve strojírenství vybranými metodami koherenční optiky. Jemná mechanika a optika, 1999, č. 9, s. 259 – 267
- [6] Ohlídal, M., Páleníková, K.: Možnosti optického profilometru MicroProf FRT při hodnocení kvality povrchu. Jemná mechanika a optika, 2004, č. 9, s. 251-259, ISSN 0447-6441
- [7] Tichá, Š.: Strojírenská metrologie část 1. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2004. 112 s., ISBN 80-248-0672-X.
- [8] ČSN EN ISO 4287

Ing. Jan Valíček, Ph.D., Institut fyziky, VŠB-TU Ostrava, 17. listopadu 15, 708 03 Ostrava Poruba, e-mail: jan.valicek@vsb.cz
Doc. Ing. Juraj Rusnák, CSc., Katedra konštruovania strojov, Technická fakulta, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, Tr. A. Hlinku 2, 949 76 Nitra, tel: +421 37 641 4107, milan.kadnar@uniag.sk
Ing. Miroslav Müller, Ph.D., Katedra materiálu a strojírenské technologie, Technická fakulta, ČZU v Praze, Praha 6 - Suchdol, Kamýcká 129, 165 21, tel.: + 420 224 383 261, e-mail: muller@tf.czu.cz
Ing. Petr Hrabě, Ph.D., Katedra materiálu a strojírenské technologie, Technická fakulta, ČZU v Praze, Praha 6 - Suchdol, Kamýcká 129, 165 21, tel.: + 420 224 383 274, e-mail: hrabe@tf.czu.cz
Ing. Milan Kadnár, Ph.D., Katedra konštruovania strojov, Technická fakulta, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, Tr. A. Hlinku 2, 949 76 Nitra, tel: +421 37 641 4107, e-mail: milan.kadnar@uniag.sk
Ing. Sergej Hloch, Ph.D. Katedra prevádzky technologických systémov, Fakulta výrobných technológií, TU v Košiciach so sídlom v Prešove, Štúrova 31, 080 01 Prešov, e-mail: hloch.sergej@fvt.sk
RNDr. Milena Kušnerová, Ph.D., Institut fyziky, VŠB-TU Ostrava, Institut fyziky, 17. listopadu 15, 708 03 Ostrava Poruba, milena.kusnerova@vsb.cz

Martin POLÁK, Česká zemědělská univerzita v Praze

Damascenská ocel – středověký kompozit z pohledu současnosti

Zlatá éra damascenské oceli sice již dávno minula, avšak její hodnota stále přetrvává. Dokonce lze říci, že v posledních letech zažívá tento materiál svou renesanci. Vedle estetických vlastností jsou nesporně zajímavé i jeho vlastnosti mechanické. Zkoušky provedené na vzorku svářkového damašku například ukázaly, že pevnost výsledného materiálu je mnohem vyšší než pevnost jeho dílčích složek, přičemž tvrdost zůstává relativně nízká.

ÚVOD

Jedním z dobrých důvodů, proč se ve své době damascenská ocel těšila tak velké oblibě, jsou její mimořádné mechanické vlastnosti. Jedná se totiž o kompozitní materiál se všemi vlastnostmi, které z toho vyplývají. Mnoho konstrukčních prvků je i v současné době navrhováno tak, že materiály, z nichž jsou vyrobeny, mají zcela záměrně v různých směrech různé vlastnosti. V případě

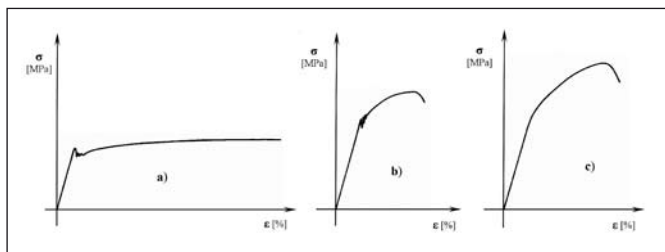
damascenské oceli to však zpočátku byla spíše nouze o kvalitní materiál a snaha o jeho úsporu, z níž se ovšem později stala „ctnost“ v podobě této ušlechtilé i vzhledově krásné oceli. Nechme teď stranou některé, někdy až legendární zprávy o výjimečných vlastnostech damascenských čepelí a podívejme se na tento materiál podrobněji.

MATERIÁL A METODY

Cílem níže popsaného experimentu bylo prakticky ověřit mechanické vlastnosti damascenské oceli, zejména pevnost, a porovnat je s vlastnostmi dílčích materiálů, z nichž byla vyrobena. Pro pevnostní zkoušku byl zhotoven vzorek materiálu. Vstupními polotovary pro jeho výrobu byly ocelové pásy o průřezu 18,5 x 2 mm² a délce 150 mm. Materiál pásků byl dvojitý, jedním byla ocel třídy 11 s nižším obsahem uhlíku, druhým uhlíková ocel třídy 19. Blok výchozího materiálu byl vytvořen poskládáním pásků na sebe tak, že vznikly vrstvy, kde se nízkouhlíková ocel střídala s ocelí vysokouhlíkovou. Od obou druhů oceli bylo ponecháno po jednom pásku pro další zkoušky. Poté byl celý blok materiálu kovářsky svařen. Následovalo prokování a prodlužování. Hotový blok byl naseknut, přeložen, opět kovářsky svařen a vykovan na konečný obdélníkový průřez 5 x 6,7 mm². Výsledný vzorek s celkovým počtem 26 vrstev byl ve finále po ohřevu na cca 850 °C zakalen ponořením do zvířecí krve.

VÝSLEDKY A DISKUSE

Pevnostní zkoušky vstupních polotovarů a vykované damascenské oceli proběhly na univerzálním hydraulickém trhacím stroji. Rychlost zatěžování byla u všech vzorků stejná. Získané diagramy průběhu napětí v závislosti na relativním prodloužení jsou na obr. 1.



Obr. 1 Pracovní diagramy vzorků oceli: a) nízkouhlíková ocel, b) uhlíková ocel, c) damascenská ocel

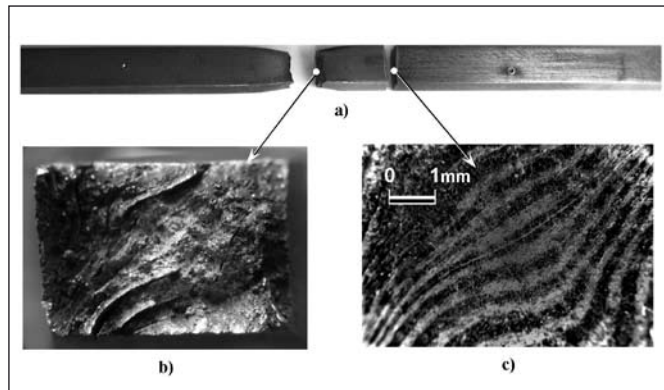
Zatímco vzorek a) vykazuje v diagramu plošší křivku s velmi výraznou mezí kluzu, odpovídající měkké oceli, u vzorku b) je průběh o něco strmější s mezí kluzu dobře patrnou, ale ne už tak výraznou, což svědčí o houževnatém materiálu. Zde je potřeba dodat, že oba vstupní polotovary byly ponechány v základním stavu, tj. bez tepelného zpracování.

U vzorku c) je křivka nejstrmější s neznatelnou mezí kluzu. Co je však nejpodstatnější – tento materiál vykazuje nejvyšší pevnost. Souhrn naměřených hodnot je uveden v tabulce 1.

Tab. 1. Výsledky měření

Vzorek	Průřez vzorku [mm x mm]	Maximální síla [N]	Napětí na mezi pevnosti [MPa]
nízkouhlíková ocel (a)	18,5 x 2	14 450	390,5
uhlíková ocel (b)	18,5 x 2	24 300	656,8
damascenská ocel (c)	6,7 x 5	27 350	816,4

Zbytek zkušební tyčky byl příčně rozříznut (obr. 2a) a vzniklý řez po vyleštění naleptán pro zviditelnění vnitřní struktury. Na tomto řezu je dobře vidět, kde byl blok přeložen a svařen (viz obr. 2c - tenká světlá linie na diagonále z levého dolního do pravého horního rohu). U detailu struktury v místě přetržení (obr. 2a) si pak můžeme povšimnout, že při zkoušce došlo k porušení materiálu i na rozhraní některých vrstev.



Obr. 2 Zkušební tyčka damascenské oceli a) s detailem struktury v místě přetržení b) a naleptaným řezem c)

Kromě toho byla na několika místech vzorku damascenské oceli měřena tvrdost dle Rockwella. Její hodnota se pohybovala v rozmezí 20 – 25 HRC, což poněkud proti předpokladům odpovídá spíše měkké oceli. Zajímavé je porovnání tvrdosti s pevností materiálu. Výsledky zkoušek totiž ukazují, že daná damascenská ocel je poměrně měkká, ale přitom velmi houževnatý materiál. Tato vlastnost patrně zaručovala u čepelí sečných a bodných zbraní dostatečnou pružnost bez nebezpečí vzniku křehkého lomu. Mechanismem dávajícím vzniknout těmto vlastnostem je fakt, že se tu střídají vrstvy zakalené uhlíkové oceli s nekalitelnou nízkouhlíkovou vrstvou. Navíc tu na rozhraní vrstev vzniká difúze obou materiálů. Tam se, podle některých autorů, po zakalení objevuje struktura, která u běžně kalitelné oceli vzniká až po zakalení a následném popuštění. Tedy ne hrubý a křehký martenzit, ale struktura mnohem jemnější a houževnatější. V této souvislosti se nabízí otázka, jak by se v případě jiného tepelného zpracování tato okolnost projevila na výsledné pevnosti materiálu.

Literatura

- [1] PLUHAŘ, J.; KORITTA, J.: Strojírenské materiály. SNTL, Nakladatelství technické literatury, Praha 1981, 586 s. 04-208-81
- [2] BENEŠ, A.: Technické kovy – jejich výroba, vlastnosti a zkoušení. SNTL Praha 1958. 265 s.

KEFERSTEIN, C. P.; DUTSCHKE, W.: Fertigungsmesstechnik (Výrobná meracia technika). 6. rozšírené vydanie, B. G. Teubner Verlag, Wiesbaden 2008, X + 274 s., ISBN 978-3-8351-0150-0, cena: 29,90 EUR

Ak určité dielo výjde v priebehu osemnástich rokov 6-krát, je to dôkazom jeho užitočnosti, kvality a čitateľského záujmu. Recenzovaná monografia dvoch nemeckých profesorov (prvý z autorov pôsobí v súčasnosti na NTB Buchs (Švajčiarsko), druhý autor bol pedagógom na Univerzite v Stuttgarte (Nemecko)), sa zaoberá teoretickými i praktickými otázkami merania v priemyselnej výrobe (predovšetkým v strojárkej) a je koncipovaná ako učebnica, ale súčasne i ako príručka pre prax.

Dielo je členené na 9 kapitol – v 1. kap. sú podané úvodné informácie o štruktúre knihy, ako aj o význame merania vo výrobe a súvislostiach s managementom kvality. Stať o výuke merania pre výrobnú prax je veľmi podnetná a zaslúži si pozornosť všetkých kompetentných osôb, ktoré majú vplyv na metrologické vzdelávanie!

2. kap. podáva terminológiu a vysvetlenie základných elementov metrologickej infraštruktúry (jednotky, materializované miery, meradlá, meracie systémy, neistoty a ich výpočet). Ďalšie dve kap. sa zaoberajú meracou technikou vo výrobe a v metrologickom laboratóriu (súradnicová mer. technika, meranie drsnosti, meradlá dĺžky, štatistická kontrola kvality atď.). V tejto časti snáď možno vytknúť, že sa preferuje meranie dĺžky a meranie rovinného uhla je prakticky ignorované.

5. kap. je zameraná na bezkontaktné (optické) metódy merania; v tejto časti došlo k najvýznamnejšej aktualizácii voči predošlému vydaniu. Ďalšia kap. sa zaoberá schopnosťou meradiel, plánovaním meracích a skúšobných procesov a v podstate managementom v tejto oblasti (kalibrácia a nadväznosť sú tiež spomenuté!). Posledné tri kap. monografie obsahujú zoznam literatúry (74 položiek lit. prameňov a 94 položiek noriem – trochu jednostranne orientované na nemecké pramene), vecný register a zoznam skratiek.

Recenzent nemôže zatajiť aj niekoľko kritických postrehov: na s. 35 je udaná veľmi dôležitá zásada o neistote, ktorá je však porušená napr. vo stati 3.2.4 a 5.4.4; tiež údaje v tabulke na s. 19 sú neúplné!

Záverom možno odporúčať dielo všetkým metrológom v praxi, ktorí majú záujem sa oboznámiť s praktickými poznatkami o priemyselnom meraní (hlavne v strojárstve).

I. Brezina

OSANNA, P. H.; DURAKBASA, M. N.; AFJEHI-SADAT, A.: Geometrische Produkt-Spezifikation und – Verifikation – GPS. (Geometrická špecifikácia výrobkov a ich verifikácia – GPS). 3. vyd., TU Wien, Austauschbau u. Messtechnik, Wien 2008, 266 s., ISBN 3-901888-14-4

3. vydanie učebnice o geometrickej špecifikácii výrobkov sa opiera o texty komplexného diela (pozri napr. našu recenziu v JMO č. 1/2002, s. 28) a je koncipovaná najmä pre potreby výukového procesu. Okrem toho však svojím obsahom, štruktúrou i štylistickým spracovaním ju možno považovať za veľmi vhodnú príručku pre praktikov, ktorí sa denne zaoberajú meraním (najmä geometrických veličín).

Monografia sa člení na 24 kapitol – prvé tri sa zaoberajú úvodnými informáciami o normách v rámci GPS a súvislostiach s managementom kvality. 4. kap. obsahuje údaje o všeobecnom modeli geometrického tolerovania a ďalšie tri kap. sú zamerané na ISO systémy pre tolerovanie. Ďalších 6 kap. sa detailne zaoberá tolerovaním všetkých ostatných odchýlok tvaru a polohy, s výnimkou tolerovania uhlov a kužeľov (to je predmetom kap. 14).

Všeobecné údaje o toleranciách sa nachádzajú v kap. 15, nasledujúca časť (kap. 16) sa zaoberá aktuálnymi otázkami drsnosti a vlnitosti povrchu, ako aj definovaním primárneho profilu. Ďalšie 3 kapitoly obsahujú údaje o špecifických toleranciách výrobných procesov, ako aj podrobnosti o tolerovaní komplexných geometrických dielcov.

20. kap. sa zaoberá vektorovým tolerovaním a súčasne nadväzuje na ďalšiu kap., ktorá pojednáva o štatistickom tolerovaní strojárskych komponentov (veľmi dôležité aj pre projektantov a technológov v strojárstve!).

Kapitoly 22 a 23 sú zamerané na problematiku meracích reťazcov a praktické otázky merania odchýlok tvaru a polohy. Záverečná kapitola sa zaoberá aktuálnymi otázkami neistoty merania, ako aj chybami, ich vplyvom na neistotu a súvisiacimi podrobnosťami k problematike výpočtu neistôt.

Dielo je predovšetkým koncipované ako študijná príručka (207 ilustrácií veľmi vhodne dopĺňa text), ale môže byť využité ako zdroj aktuálnych informácií pre všetkých, ktorí plánujú, navrhujú, konštruujú a kontrolujú niektorý z elementov meracieho procesu. GPS je „živá“ problematika, zasluguje si pozornosť aj priemyselných metrológov!

I. Brezina

15. MEZINÁRODNÍ ELEKTROTECHNICKÝ VELETRH

ELEKTROTECHNIKA 2008

11. - 13. 11. 2008

(9.00 - 17.00 hod., 13. 11. do 15.00 hod.)

Výstaviště Černá Louka Ostrava

CONTENTS

55 years of Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Liberec (P. Louda)..... 231

The Effect of Cooling Process on Residual Stresses in a Surface Layer of Ground Components

(J. Jersák, Z. Pala, N. Ganey)..... 232
Production processes and working conditions in the course of machining affect, the properties of a surface layer of machine components. This layer, in turn, has an effect on machine components quality, especially regarding their resistance to dynamic load. Consequently, this layer directly affects durability and reliability of those components. There are a large number of components, e.g., motors, power plants, means of transport, machine tools, and so on which may be exposed to cyclic stress, whether mechanical or thermal. Conditions for the creation of functional surface layer are reflected in the so called surface integrity. The surface integrity shows the effect of production methods on the quality of machined surface related to functional requirements for the product as a whole. An important parameter of surface integrity is the state of stress level. This paper presents results of residual stress measurements of the surface layer of components which were ground either without using a cooling agent, or cooled by means of Cimtech A31F cooling liquid, or cooled by means of cold air flow. The other grinding conditions were kept constant.

Experience with REM and EDX analyse at study materials

(V. Reicheltová) 237
In 2007 was caused by Technical University of Liberec and Škoda Auto a.s. company cooperation separate workplace „Scanning electron microscopy laboratory“ (REM). REM laboratory inhere in modern premises of the newly constructed Educational Centre Na Karmeli in Mladá Boleslav. Workplace serve not only for quality of part classification, but head for research requirements of new generation materials structure and constitution. Without question are this materials nanomaterials, geopolymers and geocomposites.

Objective off-line method for evaluation of flat glass corrugation (V. Hotař)..... 240

In practise a corrugation tests are widely used for evaluation a flat-glass quality during its mass production. Recently, these tests have been based on a subjective standards comparison with the ripple of the zebra-plate image reflected by the glass-sheet sample. Tests in a continuous production process are performed even several times per hour under usual conditions. Our research aim consists in an objectification of corrugation quantity replacing the subjective observer by digital camera and processing unit, all verified routinely in the production process. For a corrugation analysis the unique software was proposed and developed using the Matlab environment, including the data acquisition in service. The code is compiled as an independently executable module. The principle of the method rests in the detection of boundary lines between light and dark areas of the sample image and their evaluation employing statistical approach, curve rectification and determination of its fractal dimension. The quality parameter obtained in such a way and recalculated by means of weighted coefficients is in the accord with the results previously achieved using the subjective methodology.

USING ENDOSCOPIC VISUALIZATION EQUIPMENT AT THE COMBUSTION ENGINES RESEARCH

(J. Blažek) 242
The paper describes the use of visualization method in combustion engines. The development of engines with its complexity of in-

cylinder process requires modern development tools. Visualization tools are possible for using of monitoring of fuel mixtures creation, start reaction of ignition and subsequent of combustion process at combustion engine (SI engines and diesel engines). The special protection of optical endoscope lens was developed to observe actions in the catalyst at very high-temperatures.

Grinding of Friction Discs Front Faces - Transmitted Torque (R. Vrzala, I. Petříková) 245

Special grinding machine based on relative motion between the two front faces of friction discs with the vertical parallel axes are applied in technological process of manufacture of high-quality flat surfaces. Paper deals with kinematic and dynamic motion transfer from driving disc to driven disc for in the cases of fixed and variable eccentricity between two discs ; influence of distance between axes, influence of function generating change of this distance on non-uniform driving disc revolving and influence of instantaneous speed rotation.

Geometrical aspects of surface roughness in classical and unconventional technology (J. Valíček, J. Rusnák, M. Müller, P. Hrabě, M. Kadnár, S. Hloch, M. Kušnerová)..... 249

Damascus steel – medieval composite from the view of nowadays (M. Polák) 253

Golden age of damascus steel has passed away, however his value still remains. It could be even said that this material passes through his renaissance in the last years. Besides aesthetic properties it has doubtless very interesting mechanical properties. For example, strength of final material is higher than strength of his particular components, whereas hardness is relatively low - as is apparent from done experiment.

From technical library (I. Brezina) 255

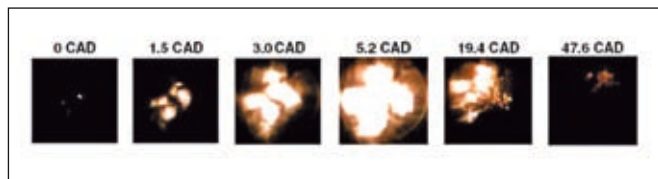
ANOTACE

Analýza destrukce diamantových brusných kotoučů

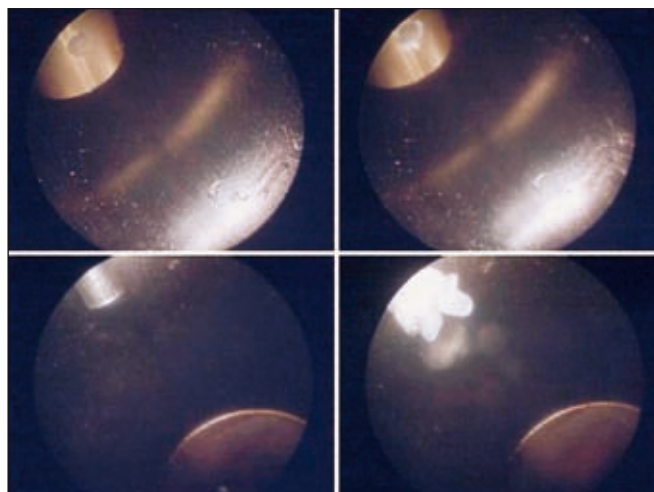
(A. Popov)..... 247
Uvádí se klasifikace možných modelů destrukce diamantových brusných kotoučů v podobě lokálního odlomení, posunu a rotace diamantových zrn, které se uplatňují nezávisle, postupně nebo současně. Je konstatováno, že destrukce diamantových kotoučů s organickou nebo kovovou vazbou se obecně vyskytuje jakožto výsledek lokálních rotačních diamantových zrn ve vazbě, jejichž počet dosahuje 50 % celkového množství zrn neúčastnících se procesu řezání.

Obrázky k článku Využití endoskopické vizualizační techniky při výzkumu spalovacích motorů

(str. 242 - 244)



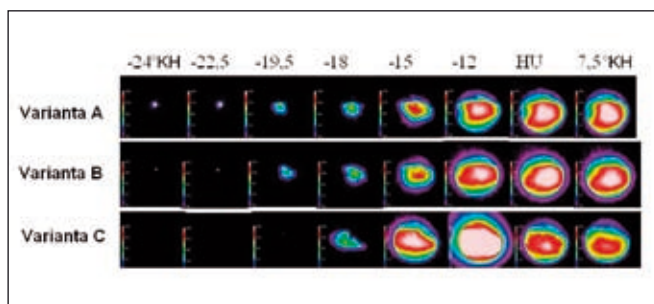
Obr. 3 Snímky snímané vysokorychlostní digitální kamerou uvnitř spalovacího prostoru odrazem na zrcadle [3]



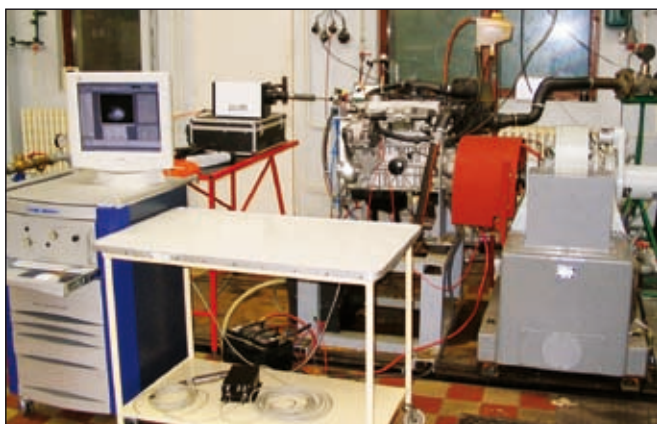
Obr. 7 Pohled do sacího kanálu plynového motoru provozovaného na LPG (na snímcích jsou vidět různé typy vstřikovačů se zamrzající vzdušnou vlhkostí)



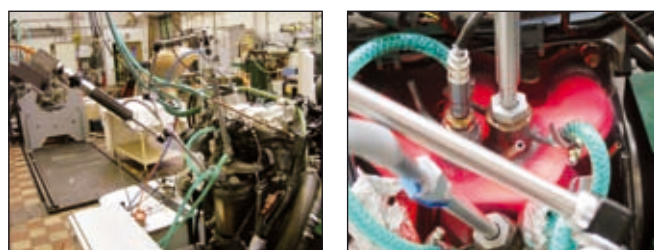
Obr. 8 Pohled na zástavbu chlazeného endoskopu s barevnou CCD kamerou pro sledování dějů uvnitř spalovacího prostoru



Obr. 11 Vizualizace hoření ve válci vozidlového zážehového motoru pomocí AVL VisioScope (střední otáčky motoru, 100% zatížení)



Obr. 10 Vizualizace procesu hoření u zážehového motoru pomocí chlazeného endoskopu a kamery DicamPro s vysokou citlivostí



Obr. 14 Zkušební stanoviště s endoskopickou technikou pro sledování děje uvnitř katalyzátoru a detail katalyzátoru při provozu (střední otáčky motoru, 100% zatížení)



Obr. 15 Katmodul se zabudovanými chlazenými pouzdry pro endoskop a světlovod. Znečištění safírových sklíček ze dna ochranného pouzdra po měření: levé sklíčko je z pouzdra pro osvětlení, pravé pro endoskop



**ZVEME VÁS
K AKTIVNÍ ÚČASTI**

FOR INDUSTRY

8. MEZINÁRODNÍ VELETRH STROJÍRENSKÝCH TECHNOLOGIÍ

Souběžné veletrhy:

FOR SURFACE (povrchové úpravy) • FOR WASTE (nakládání s odpady) • FOR 3P (obaly)

Uzávěrka přihlášek:

31. 10. 2008

15. – 17. 4. 2009

PRAŽSKÝ VELETRŽNÍ AREÁL LETŇANY

ABF, a.s., Václavské nám. 29, 111 21 Praha 1,
tel.: 222 891 264-6, fax: 225 291 199, e-mail: forindustry@abf.cz, www.abf.cz

