

10
2022

JMO

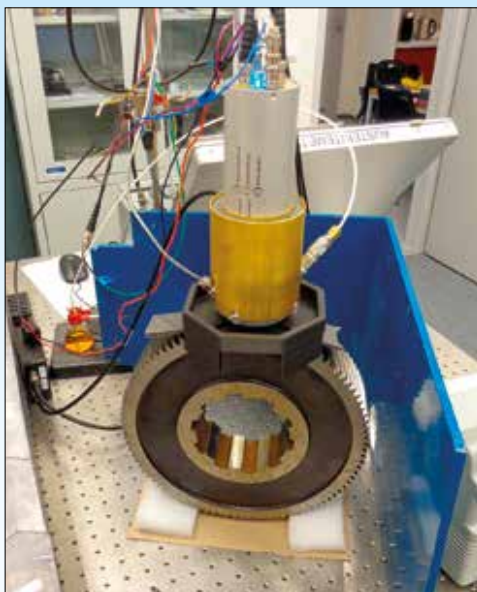
JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA

FINE MECHANICS AND OPTICS

Katedra experimentální fyziky
Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci



Návrh prototypu austenitometru



Vývoj austenitometru



Prototyp austenitometru



Testování prototypu austenitometru propojeného s PC v laboratoři



Ukázka testovaných vzorků

Obrázky dokumentují vývoj austenitometru – zařízení pro stanovení fázového složení austenitického železa v metalografii i při nedestruktivním testování hotových ocelových výrobků na bázi unikátní miniaturní konstrukce mössbauerovských spektrometrů.

Katedra experimentální fyziky

Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci

Katedra experimentální fyziky je jedním ze čtyř fyzikálních pracovišť Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci.

Oddělení „**Aplikované fyziky**“ se zabývá vědeckou činností a zaměřuje se na následující čtyři oblasti:

Jaderné spektroskopické metody – vývoj přístrojové techniky pro experimenty jaderné fyziky (detektory, moduly, měřicí a testovací systémy), využití této techniky v materiálovém výzkumu ve vlastních i zahraničních laboratořích.

Nanotechnologie – příprava a charakterizace nanosystémů, nanomateriálů, vývoj metodik nanotechnologií, materiálové studie základního i aplikovaného výzkumu.

Digitální zpracování obrazu – digitalizace a předzpracování obrazu, teorie příznakového a strukturálního rozpoznávání, využití neuronových sítí pro konstrukci klasifikátorů v oblasti fyzikálních aplikací v návaznosti na 3D tisk (průmysl, lékařství, výstupy optických metod).

Metrologie – vývoj měřících metod a měřících systémů, validace metodik, zpracování výsledků, statistická analýza dat.

Oddělení „**Didaktiky fyziky**“ se zabývá současnými koncepcemi fyzikálního vzdělávání na základních a středních školách a zaměřuje se na zavádění moderních technologií do výuky (využití počítačů, vzdálené a počítačem podporované experimenty). Oddělení didaktiky se také věnuje tvorbě učebnic i metodických materiálů pro základní a střední školy, popularizačním akcím pro žáky i širokou veřejnost (Olomoucký fyzikální kaleidoskop, Veletrh vědy a výzkumu, Univerzita dětského věku apod.).

Katedra garantuje nebo spolugarantuje výuku předmětů studijních programů:

Aplikovaná fyzika

Nanotechnologie

Učitelství fyziky

Všechny studijní programy je možné realizovat podle Institucionální akreditace, schválené prozatím do roku 2028, v bakalářském, navazujícím magisterském (prezenční i kombinovaná forma studia) i doktorském studiu.

Katedra experimentální fyziky se v rámci svých pedagogických činností podílí na výuce fyziky nejen pro fyzikální obory PřF, ale i pro studenty dalších přírodovědných oborů (chemie, biologie). Pro potřeby výuky katedra provozuje řadu speciálních, moderně vybavených laboratoří (např. laboratoř elektroniky, laboratoř atomové a jaderné fyziky nebo laboratoř školních pokusů).



Laboratoř atomové a jaderné fyziky



Vchod na Katedru experimentální fyziky

REDAKČNÍ RADA

Předseda: Ing. Jaromír KŘEPELKA, CSc., SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc
Členové: Ing. Totka BAKALOVA, Ph.D., TU, Liberec, prof. RNDr. Zdeněk BOUČAL, Dr., UP, Olomouc, Ing. Ondřej ČÍP, Ph.D., UPT AV ČR, v. v. i., Brno, Ing. Alexandr DEJNEKA, Ph.D., FZÚ AV ČR, v. v. i., Praha, prof. Ing. Stanislav ĎURIŠ, Ph.D., SJF STU, Bratislava, RNDr. Ivana GREBEŇOVÁ, Meopta - optika, s.r.o., Přerov, doc. RNDr. Ondřej HADERKA, Ph.D., SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, Ing. Jaroslav HOPP, Ph.D., Meopta - optika, s.r.o., Přerov, prof. Ing. Pavol HORŇÁK, DrSc., PROMETEUS, Bratislava, doc. Ing. Jan HOŠEK, Ph.D., ČVUT Praha, prof. RNDr. Miroslav HRABOVSKÝ, DrSc., SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, RNDr. Vladimír CHLUP, Olomouc, RNDr. Lubomír JASTRABÍK, CSc., FZÚ AV ČR, v. v. i., Praha, RNDr. Pavel KLENOVSKÝ, Český metrologický institut, Brno, Ing. Romana KOČOVÁ, FZÚ AV ČR, v. v. i., Praha, doc. RNDr. Vojtěch KŘESÁLEK, CSc., UTB, Zlín, doc. RNDr. Lubomír KUBÍK, Ph.D., SPU Nitra, doc. Ing. Marián KUČERA, Ph.D., TU Zvolen, Ing. Jan KŮR, Mesing, spol. s r.o., Brno, prof. Ing. Martin LIBRA, CSc., ČZU, Praha, prof. RNDr. Miroslav LIŠKA, DrSc., VUT, Brno, doc. RNDr. Miroslav MILER, DrSc., ÚFE AV ČR, v. v. i., Praha, prof. Ing. Jiří NOVÁK, Ph.D., ČVUT, Praha, prof. RNDr. Jan PEŘINA, DrSc., UP, Olomouc, doc. Ing. Pavel PETERKA, Ph.D., ÚFE AV ČR, v. v. i., Praha, Mgr. Sylvie PETROVÁ, LF MU, Brno, RNDr. Dagmar SENDERÁKOVÁ, Ph.D., UK, Bratislava, RNDr. Petr SCHOVÁNEK, SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, prof. RNDr. Anton ŠTRBA, CSc., UK, Bratislava, doc. Ing. Olga TŮMOVÁ, CSc., Západočeská univerzita, Plzeň, Zuzana VESELÁ, Meopta - optika, s.r.o., Přerov, čestný člen Ing. Zdeněk MARTÍNEK, Nové město nad Metují

Gerd HÄUSLER, Lehrstuhl für Optik, Universität Erlangen – Nürnberg, Erlangen (Germany); Michael J. LALOR, Liverpool John Moores University, U. K.; Rodney J. SOUKUP, University of Nebraska – Lincoln, U. S. A.; M. C. TEICH, Boston University, U. S. A.

JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA

Vydává Fyzikální ústav Akademie věd České republiky, v. v. i. za spoluúčasti SPIE, The International Society for Optics and Photonics, v Nakladatelství Fyzikálního ústavu Akademie věd České republiky, v. v. i.

Ředitel FZÚ AV ČR, v. v. i.: RNDr. Michael PROUZA, Ph.D.

Odpovědný zástupce vydavatele: prof. RNDr. Miroslav HRABOVSKÝ, DrSc.
Šéfredaktor: Ing. Jaromír KŘEPELKA, CSc., e-mail: jaromir.krepelka@upol.cz, tel.: 585 631 518

Tajemnice redakce: Marcela BAĎUROVÁ

Adresa redakce (předplatné, nakladatelské služby): SLO UP a FZÚ AV ČR, 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc, tel.: 585 631 581, e-mail: marcela.badurova@upol.cz

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

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

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

Ve Slovenské republice je kontaktní místo: RNDr. Dagmar Senderáková, Ph.D., katedra experimentální fyziky FMFI UK, Mlynská dolina F2/149, SK-842 48 Bratislava, tel.: ++421 260 295 391, e-mail: dsenderak@gmail.com

Ve Slovenské republice rozšiřuje a objednávky přijímá: prof. Ing. Ivo Čáp, CSc., Žilinská univerzita EF, Univerzitná 1, 010 26 Žilina, e-mail: ivo.cap@fel.uniza.sk

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

Inzerce: tel.: 585 631 581, e-mail: marcela.badurova@upol.cz

Odborné články jsou lektorovány.

<https://jmo.fzu.cz>

© JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA 2022

ISSN 0447-6441

INDEX 46 723

JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA

VĚDECKO-TECHNICKÝ ČASOPIS
ROČNÍK 67 10/2022

OBSAH

„Strašidelné“ experimenty s kvantovým provázáním získaly Nobelovu cenu za fyziku
(volně zpracováno podle D. Castelvecchi a E. Gibney) 207

Nobelova cena za experimenty s kvantovou provázaností
(A. Černoch, J. Soubusta) 208

Výpočet rozptylové funkce bodu pro optické soustavy s konečnou hodnotou numerické apertury použitím skalární difrakční teorie (A. Mikš, J. Novák, P. Novák) 210

Oči mezi hvězdami (M. Miler) 215

Laser na hliníkových nohou (J. Heřmánek, P. Crha, K. Macúchová, H. Picmausová, M. Řeháková, L. Švandrlík, M. Thunová, T. Mocek) 216

Vlastnosti fotovoltaických systémů s automatickými pohyblivými stojany (V. Poulek, M. Pelikán, M. Libra, V. Beránek, E. Fernández Cusimamani) 222

Hydrofobní ochrana geopolymerů a pískovce
(V. Růžek, T. Bakalová, M. Ryvolová) 225

Ing. Jiří Kršek – jubileum 90 let (P. Zemánek) 231

Bližší informace o poslání časopisu, pokyny pro autory, obsah časopisu apod. je uveden na internetu: <http://jmo.fzu.cz/>

Informace o předplatném podá, objednávky přijímá, objednávky do zahraničí vyřizuje: SLO UP a FZÚ AV ČR, 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc, tel.: 585 631 576, e-mail: marcela.badurova@upol.cz.

Cena čísla 40 Kč včetně DPH

ADVISORY BOARD

Chairman: Jaromír Křepelka – Joint Lab. of Optics of Palacký Univ. and Inst. of Physics of Czech Academy of Sciences, Olomouc (Czech Rep.)

Members: Totka BAKALOVÁ – Tech. Univ., Liberec (Czech Rep.), Zdeněk BOUČAL – Palacký Univ. (Czech Rep.), Ondřej ČÍP – Inst. of Scientific Instruments of Czech Academy of Sciences, Brno (Czech Rep.), Alexandr DEJNEKA – Inst. of Physics of Czech Academy of Sciences, Olomouc (Czech Rep.), doc. Ing. Stanislav ĎURIŠ, Ph.D., Inst. of Measurement Science Slovak Academy of Sciences, Bratislava (Slovak Rep.), Ivana GREBEŇOVÁ, Meopta - optika, s.r.o., Přerov (Czech Rep.); Ondřej HADERKA – Joint Lab. of Optics of Palacký Univ. and Inst. of Physics of Czech Academy of Sciences, Olomouc (Czech Rep.), Jaroslav HOPP, Meopta - optika, s.r.o., Přerov (Czech Rep.), Pavol HORŇÁK – PROMETEUS, Bratislava (Slovak Rep.), Jan HOŠEK – Czech Tech. Univ., Praha (Czech Rep.), Miroslav HRABOVSKÝ – Joint Lab. of Optics of Palacký Univ. and Inst. of Physics of Czech Academy of Sciences, Olomouc (Czech Rep.), Vladimír CHLUP – Olomouc (Czech Rep.), Lubomír JASTRABÍK – Inst. of Physics of Czech Academy of Sciences, Praha (Czech Rep.), Pavel KLENOVSKÝ – Czech Metrology Inst., Brno (Czech Rep.), Ing. Romana KOČOVÁ, Inst. of Physics of Czech Academy of Sciences, Praha (Czech Rep.), Vojtěch KRÉSÁLEK – Tomas Bata Univ. in Zlín (Czech Rep.), Lubomír KUBÍK, SPU Nitra (Slovak Rep.), Marián KUČERA, TU Zvolen (Slovak Rep.), Jan KÜR, Mesing, spol. s r.o., Brno (Czech Rep.), Martin LIBRA – Czech Univ. of Life Sciences, Praha (Czech Rep.), Miroslav LIŠKA – Tech. Univ., Brno (Czech Rep.), Miroslav MILER – Inst. of Photonics and Electronics of Czech Academy of Sciences, Praha (Czech Rep.), Jiří NOVÁK – Czech Tech. Univ., Praha (Czech Rep.), Jan PEŘINA – Palacký Univ., Olomouc (Czech Rep.), Ing. Pavel PETERKA, Ph.D., Inst. of Photonics and Electronics of Czech Academy of Sciences (Czech Rep.), Sylvie PETROVÁ, Fac. of Medicine, Masaryk Univ. (Czech Rep.), Dagmar SENDERÁKOVÁ – Comenius Univ., Bratislava (Slovak Rep.), Petr SCHOVÁNEK – Joint Lab. of Optics of Palacký Univ. and Inst. of Physics of Czech Academy of Sciences, Olomouc (Czech Rep.), Anton ŠTRBA – Comenius Univ., Bratislava (Slovak Rep.), Olga TŮMOVÁ, University of West Bohemia, Plzeň (Czech Rep.), Zuzana VESELÁ – Meopta - optika, s.r.o., Přerov (Czech Rep.), honorary member Ing. Zdeněk MARTÍNEK, Nové město nad Metují (Czech Rep.)

Gerd HÄUSLER, Lehrstuhl für Optik, Universität Erlangen – Nürnberg, Erlangen (Germany); Michael J. LALOR, Liverpool John Moores University, U. K.; Rodney J. SOUKUP, University of Nebraska – Lincoln, U. S. A.; M. C. TEICH, Boston University, U. S. A.

FINE MECHANICS AND OPTICS

Published by Institute of Physics of the Czech Academy of Sciences under participation of SPIE, The International Society for Optics and Photonics in the Publishing House of the Institute of Physics of the Czech Academy of Sciences.

Director of Institute of Physics of the Czech Academy of Sciences:
Michael PROUZA

Editor: Miroslav HRABOVSKÝ

Managing Editor: Jaromír KŘEPELKA, e-mail: jaromir.krepelka@upol.cz, tel.: 585 631 518

Office secretary: Marcela BAĐUROVÁ

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

Reproduction only with permission of the Editor and under observing the copyright. 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.

Contact place for the Slovak Republic: Dagmar SENDERÁKOVÁ, Department of Experimental Physics, Faculty of Mathematics, Physics and Informatics, Comenius University, Mlynská dolina F2/149, 842 48 Bratislava, Slovak Republic, tel.: 00421 260 295 391, e-mail: dsenderak@gmail.com

Printing: TYPoServis Holešov, Masarykova 650, CZ-769 01 Holešov, tel.: ++420 573 398 746, e-mail: dtp@typoservis.cz

Advertising: e-mail: marcela.badurova@upol.cz

Papers are reviewed. <https://jmo.fzu.cz>

© FINE MECHANICS AND OPTICS 2022
ISSN 0447-6441
INDEX 46 723

FINE MECHANICS AND OPTICS

SCIENTIFIC-TECHNICAL JOURNAL
VOLUME 67 10/2022

CONTENTS

'Spooky' quantum-entanglement experiments win physics Nobel (freely adapted from the article of D. Castelvecchi and E. Gibney)..... 207

Nobel Prize for experiments with quantum entanglement (A. Černoch, J. Soubusta) 208

Department of Physics, Faculty of Mechanical Engineering, Czech Technical University in Prague (A. Mikš, J. Novák, P. Novák) 210

Looking Up © Flying Eye Books 2021 (M. Miler)..... 215

Laser on aluminium feet (J. Heřmánek, P. Črha, K. Macúchová, H. Picmausová, M. Řeháková, L. Švandrlík, M. Thunová, T. Mocek) 216

Properties of photovoltaic systems with automatic tracking stands (V. Poulek, M. Pelikán, M. Libra, V. Beránek, E. Fernández Cusimamani) 222

Hydrophobic protection of geopolymers and sandstone (V. Růžek, T. Bakalová, M. Ryvolová) 225

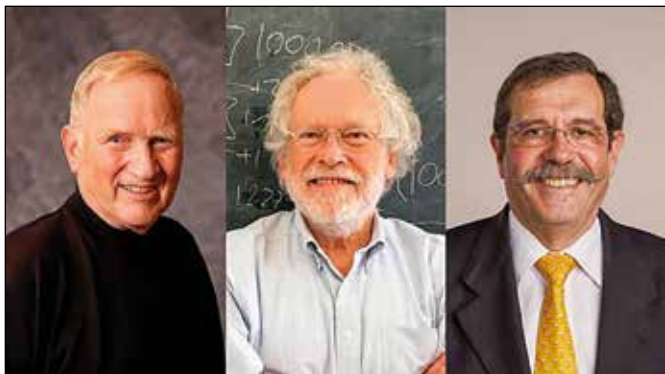
Ing. Jiří Kršek – 90 years anniversary (P. Zemánek)..... 231

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

Information on subscription rate and on ordering gives the SLO UP a FZÚ AV ČR, 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc, tel.: 585 631 576, e-mail: marcela.badurova@upol.cz.

Price for single copy: 40 Kč incl. VAT

„Strašidelné“ experimenty s kvantovým provázáním získaly Nobelovu cenu za fyziku



Zleva doprava: John Clauser, Anton Zeilinger a Alain Aspect získali letošní Nobelovu cenu za fyziku za svůj výzkum kvantového provázání. Poděkování patří J. Clauserovi (CC BY-SA 4.0) a Matthias Röderovi/dpa/Alamy, The Royal Society (CC BY-SA 3.0)

Nobelovu cenu (10 milionů švédských korun) za fyziku za rok 2022 si rovným dílem rozdělí tři kvantoví fyzici za experimenty s provázanými fotony, v nichž stav soustavy fotonů nelze vyjádřit jako tenzorový součin stavů jednotlivých fotonů v Hilbertově abstraktním prostoru, laicky řečeno, částice světla jsou v provázaném stavu nerozlučně spojeny jako jediná jednotka do té doby, než je na nich provedeno měření. Takové experimenty, které potvrdily narušení Bellových nerovností, položily základy pro nepřeberné množství kvantových technologií, včetně kvantových počítačů, kvantové teleportace, neprolomitelného šifrovaného přenosu informace s použitím menšího množství nosičů informace, než je možné v klasické fyzice, či nové druhy senzorů a teleskopů.

„Vlastně mě velmi překvapilo, že mi ze Švédska zavolali,“ řekl Anton Zeilinger, fyzik z Vídeňské technické univerzity a předseda Rakouské akademie věd, na tiskové konferenci při vyhlašování ceny. „Tato cena by nebyla možná bez přičinění nejméně 100 mladých vědců v průběhu více let.“

Alain Aspect, fyzik z École Supérieure d’Optique, Univerzita Paris-Saclay, obdržel telefonát během schůze výboru. „Náhodou jsem seděl dnes ráno poblíž Aspecta, když mu zavolali,“ říká Serge Haroche, experimentální fyzik z Collège de France v Paříži, který v roce 2012 získal Nobelovu cenu za nedestruktivní měření kvantových stavů jednotlivých fotonů pomocí Rydbergových atomů v supravodivé dutině, a dodává, že když Alain Aspect odešel, jeho kolegové správně uhodli, že volá Stockholm.

Experimenty oceněných fyziků prokázaly, že provázání mezi kvantovými systémy není způsobeno lokálními skrytými proměnnými (neboli úplností kvantové teorie), jak navrhoval Albert Einstein, Boris Podolsky a Nathan Rosen v představě známé jako EPR paradox, aby vyloučili „strašidelné působení na dálku“, ale je způsobeno existencí silných korelací určených kvantovou povahou světa. V roce 1972 John Clauser, fyzik z J.F. Clauser & Associates ve Walnut Creek v Kalifornii, povzbuzen Johnem Bellem během

jejich setkání, navrhl spolu se svými kolegy experimenty, které potvrdily narušení Bellových nerovností a dokázali tím, že kvantová fyzika nemá žádné skryté parametry.

Zůstaly však mezery v teorii i po experimentech Stuarta Freedmana a Johna Clausera provedených v 80. letech 20. století, které stále ještě dovozovaly alternativní vysvětlení pomocí lokálních teorií se skrytými parametry. Například se mohly detektory navzájem „domluvit“, jak budou detekovat. Nakonec byl proveden v roce 1995 skupinou Nicolase Gisinu experiment s přenosem kvantového signálu na vzdálenost 23 km komerčním optickým vláknem pod Ženevským jezerem, v němž byly detektory měřící jednotlivé fotony z provázaného páru od sebe natolik vzdáleny, že nemohly stihnout spolu komunikovat. Byl tak prokázán okamžitý kolaps vlnové funkce při měření, kterým se kvantový stav fotonů změní. Kvantové systémy nelze proto detekovat a pak rekonstruovat někde jinde, jedním měřením nelze zjistit neznámý kvantový stav.

V roce 1997 Anton Zeilinger a jeho kolegové použili ideu provázání k demonstraci kvantové teleportace. Kvantová teorie připouští, aby tak bylo dosaženo společným měřením částice v neznámém stavu a stavu jedné částice v provázaném stavu následované snadno proveditelnou úpravou druhé provázané částice do onoho neznámého stavu.

Od průlomových Zeilingerových experimentů se fyzikům dosud podařilo teleportovat elektrony, atomy a supravodivé obvody. Nedošlo k fyzickému přenosu jednotlivých částic na dálku, ale pouze jejich kvantových stavů. Mikročástice mohou být nosiči kvantového stavu, např. polarizace jednotlivých fotonů, spinu elektronů nebo dráhy atomů. Právě Zeilingerova skupina se mimo jiné proslavila důkazem, že kvantový stav mohou nést (a tedy interferovat) také fullerény – molekuly téměř makroskopických rozměrů.

„Všichni tři laureáti Nobelovy ceny jsou průkopníci v oblasti kvantové informace a kvantové komunikace,“ říká Pan Jian-wei, fyzik z University of Science and Technology of China v Hefei, který se jako postgraduální student v 90. letech zúčastnil některých ze Zeilingerových experimentů. „Na toto uznání se čekalo velmi velmi dlouho,“ říká Pan Jian-wei.

„Ocenění je dobrá zpráva“, souhlasí Chiara Marletto, teoretická fyzička z Wolfson College, Oxford, Spojené království. Modernizované verze experimentů navrhovaných třemi oceněnými by podle ní mohly být výchozím bodem pro řešení jedné z velkých otevřených otázek fyziky – jak uvést do souladu kvantovou mechaniku s obecnou teorií relativity Alberta Einsteina. Navrhuje ukázat, zda se dvě částice mohou provázat prostřednictvím gravitační interakce. Teorie gravitace formulovaná obecnou teorií relativity je v současné podobě zřejmě neslučitelná s kvantovou mechanikou a takové experimenty by mohly poskytnout návod, jak rozvinout kvantovou teorii gravitace, která by ji nahradila.

*Volně zpracováno podle Davide Castelvecchi & Elizabeth Gibney:
doi: <https://doi.org/10.1038/d41586-022-03088-7>*

Nobelova cena za experimenty s kvantovou provázaností

Abychom pochopili plný přínos letošních laureátů Nobelovy ceny za fyziku (NCF) **Alaina Aspecta, Johna Clausera a Antona Zeilingera**, musíme se vrátit k počátkům kvantové teorie. Na přelomu 19. a 20. století se veškeré fyzikální teorie opíraly o klasickou newtonovskou mechaniku. Všechno kolem nás se zdálo být dobře vysvětlitelné až na pár drobností. Jenže právě tyto drobné nesrovnalosti vyžadovaly zcela změnit náš fyzikální pohled na svět. A tak se zrodily na začátku 20. století dvě převratné teorie: speciální a posléze obecná teorie relativity, která zkoumá hmotné a velké předměty typu planet, hvězd a galaxií, a kvantová mechanika, která hledá zákonitosti mikrosvěta, kam patří atomy nebo elementární částice. Naše životní zkušenosti získáváme vesměs v prostoru velikosti řádově v metrech a za nízkých rychlostí pohybu ve slabých gravitačních polích, kdy jsou zákony newtonovské mechaniky jako aproximace teorie relativity (ať už speciální nebo obecné) a kvantové mechaniky většinou dostatečně přesné pro jejich praktické využití. Za objevy na hranicích obou těchto teorií bylo již uděleno mnoho Nobelových cen za fyziku. Přesto současní vědci s napětím očekávají, že se obě tyto hranice propojí pomocí sjednocené teorie kvantové gravitace. Komu se takový husarský kousek podaří anebo jej dokáže experimentálně prověřit, bude dozajista nepochybným adeptem na další NCF.

Vraťme se ale na počátek 20. století. Tehdy představil Max Planck (NCF 1918) výsledek výpočtu, který byl v souladu s experimentálně naměřeným spektrem vyzařování absolutně černého tělesa. K tomu ale potřeboval předpoklad, že elektromagnetické pole je absorbováno (nebo emitováno) po určitých porcích energie, a nikoliv spojitě. Albert Einstein Planckovu představu geniálně rozšířil tím, že ony porce energie světla jsou skutečné přírodní entity. Mohl tak objasnit fotoefekt, při kterém jsou z látky vyraženy dopadajícím světlem elektrony, za což získal v roce 1921 Nobelovu cenu. Chemik Gilbert Newton Lewis pro kvanta energie elektromagnetického pole razil od roku 1926 termín foton, který kvantová elektrodynamika chápe jako intermediální částici zprostředkující elektromagnetickou interakci. Mnoho dalších fyziků pak přispělo k dalšímu zkoumání mikrosvěta a mikročástic a jejich vzájemnému působení. V té době ještě nebyl internet a lidé se o svém výzkumu informovali hlavně poštou nebo na společných setkáních, které financovali mecenáši vědy, jako například Ernest Solvay.

V roce 1927 proběhla v Kodani 5. solvayská konference s tématem „Elektrony a fotony“. Zde se sešlo na třicet vynikajících vědců té doby, mezi nimiž bylo z dnešního pohledu 14 nositelů NCF. Na této konferenci vystoupili Niels Bohr (NCF 1922) a Werner Heisenberg (NCF 1932) s prezentací svých představ, jak vysvětlit kvantový popis částic pomocí vlnové funkce, později svými odpůrci nazvaná kodaňská interpretace kvantové mechaniky. Dnes je kodaňská interpretace většinou považovaná za synonymum indeterminismu, korespondenčního principu Nielse Bohra, statistické interpretace vlnové funkce Maxe Borny (NCF 1954) a Bohrovy komplementární interpretace určitých atomových fenoménů (podrobněji viz [1]). Hlavní myšlenky této teorie jsou:

- Fyzikální systém nemá přesně definované vlastnosti, dokud nejsou změřeny.
- Kvantová mechanika předpovídá pouze pravděpodobnosti výsledků měření.

- Kvantové stavy jsou popsány vlnovou funkcí, která je nelokální (pravděpodobnost nalézt částici kdekoli v prostoru je nenulová).
- Při měření dojde ke kolapsu vlnové funkce (částice se lokalizuje v určitém místě v určitém stavu podle výsledku měření).
- Pokud může být částice v různých stavech, potom může existovat i v superpozici těchto stavů.

Dá se říci, že tato interpretace zažila „křest ohněm“. Mnoho renomovaných fyziků ji nedokázalo přijmout. Nejznámější z nich byl Albert Einstein, např. ohledně pravděpodobnostního výsledku měření prohlásil, že „Bůh nehraje s vesmírem v kostky“. Spolu s Borisem Podolským a Nathanem Rosenem napsali v roce 1935 článek [2], ve kterém se snažili tuto teorii vyvrátit v myšlenkovém experimentu vedoucím k přesvědčení o neúplnosti kvantového popisu světa.

Podle kvantové teorie umožňuje princip superpozice existenci páru částic, které jsou popsány jednou společnou vlnovou funkcí, jsou tzv. kvantově provázané. Pokud by se provedlo měření na jedné částici z tohoto páru, došlo by ke kolapsu vlnové funkce (byl by již znám stav této částice) a současně bychom se dozvěděli, jaký je komplementární stav i druhé částice z páru. Pokud jsou ale tyto dvě částice dost daleko od sebe, mohlo by to znamenat nadsvětelnou rychlost šíření informace, což se samozřejmě Einsteinovi nelíbilo. Aby vysvětlili toto chování, zavedli Einstein, Podolsky a Rosen (EPR) teorii „skrytých parametrů“. Podle ní každou částici provázejí „elementy reality“, které vždy a v každém místě určují dopředu, jak by dopadlo měření na této částici, pokud by někdo měření provedl. Jelikož lidé jsou nedokonalí pozorovatelé, resp. technický pokrok je pomalý, jsou tyto elementy reality pro člověka skryté.

Přestože se komunita fyziků nejprve rozdělila na zastánce a odpůrce kvantové mechaniky, postupem času získávala kodaňská interpretace stále více přívrženců. Nicméně pořád chyběl experimentální důkaz, že žádné lokální skryté parametry nejsou a že výsledek měření kvantového stavu je čistě náhodný, pouze s nějakou pravděpodobnostní distribucí. Až v roce 1964 publikoval John Stuart Bell článek [3], ve kterém odvodil nerovnosti, které musí splňovat výsledky měření, pokud platí teorie skrytých parametrů. Podobně jako nelze poskládat trojúhelník ze stran, jejichž délky nesplňují trojúhelníkovou nerovnost. Pokud výsledky měření na provázaném stavu dvou částic povedou na porušení Bellových nerovností, potom nelze těmto částicím přiřadit konzistentní hodnoty skrytých parametrů. Z toho plyne, že Einsteinův předpoklad skrytých parametrů by byl mylný a Bohr s Heisenbergem by měli (nejspíš) pravdu.

O pár let později **John Clauser**, Michael Horne, Abner Shimony a Richard A. Holt zobecnili Bellovu nerovnost na tzv. CHSH nerovnost [4], která byla použitelná i pro ne úplně kvantově provázané stavy. Vše bylo teoreticky nachystáno a víceméně se čekalo, až bude experimentálně možné kvantově provázané stavy připravit a změřit. To se povedlo poprvé **Alainu Aspectovi**, Philippu Grangierovi a Gérardu Rogerovi v roce 1981, kdy provedli polarizační měření na provázaných fotonech vyzářených z atomu vápníku [5]. Výsledky jejich měření prokázali porušení Bellových (resp. CHSH) nerovností o několik standardních odchylek. Stále ale zůstali pochybovači, kteří argumentovali například tím, že de-

tektory měřící přítomnost fotonů s určitou polarizací byly blízko u sebe, a tak by se mohly nějak „skrytě“ domlouvat na výsledku. Tyto a další skulinky v interpretaci měření byly postupně v dalších experimentech všechny zaceleny, a tak můžeme s jistotou říci, že Einsteinovy pochybnosti o neúplnosti kvantové teorie byly mylné. Kvantová kodaňská interpretace se nakonec stala oficiálně uznávanou fyzikální teorií se všemi zvláštnostmi a „strašidelnými“ efekty, které povoluje. Ale Einstein může odpočívat v klidu, neboť k nadsvětelnému přenosu informace kolapsem vlnové funkce dojít nemůže. Pokud si chceme porovnat výsledky měření na kvantově provázaných částicích, musíme si tyto výsledky poslat na jedno společné místo, a to dokážeme nejvýše jen rychlostí světla.

Stejně tak jsme museli přijmout fakt, že kvantový stav se při měření změní, což označujeme jako kolaps vlnové funkce. Z toho plyne, že jedním měřením nelze zjistit neznámý kvantový stav. Nicméně kvantová teorie povoluje pomocí provázaného stavu provést tzv. kvantovou teleportaci, kdy se provede společné (tzv. bellovské) měření na neznámém stavu společně s jednou částicí provázaného páru. Ten neznámý stav je při měření samozřejmě zničen. Podle výsledku tohoto měření se udělá jednoduchá úprava druhé provázané částice, která potom bude mít kvantový stav onoho původního neznámého kvantového stavu. A tady se nám objevuje **Anton Zeilinger**, třetí laureát letošní Nobelovy ceny. Byl vedoucím týmu, který v roce 1997 experimentálně ověřil kvantovou teleportaci [6]. Jeho skupina přispěla v této oblasti i dalším významným experimentem, kdy prokázali kvantovou interferenci hmotnějších částic. Interference je typickou vlastností šířících se vln a jsme na ní zvyklí u fotonů, Zeilingerově skupině se však podařilo naměřit interferenci makroskopických uhlíkových molekul – fullerénů.



Anton Zeilinger (druhý zleva) s ředitelem FZÚ AV ČR Janem Řídkým (třetí zprava) v restauraci Nebozízek během návštěvy Prahy v červnu 2010. Anton Zeilinger tehdy přednesl přednášku o svých výsledcích na semináři FZÚ AV ČR. Fotografii při této příležitosti pořídili autoři článku.

Z předchozího textu je patrné, že na experimentálním zkoumání kvantově provázaných stavů více částic se podílelo po velmi dlouhou dobu opravdu mnoho lidí z celého světa. Těžko nyní hodnotit, kdo k tématu přispěl více. Každopádně laureátem Nobelovy ceny se může stát pouze živá osoba, což výběr možných kandidátů limituje. Někomu může napadnout, proč Nobelův výbor vybírá laureáty až s mnohaletým zpožděním po jejich objevech. Jedním z důvodů je to, že až po desetiletích se projeví, který objev vedl k výraznému průlomů ve vědecké oblasti a případně i k technologickému posunu.

A právě v této době se ukazuje dominance kvantových procesorů nad „klasickými“, tedy například to, že kvantový výpočet na kvantovém procesoru může být efektivnější než klasický. Druhým výrazným benefitem kvantové informatiky je bezpečnost kvantové kryptografie, která principiálně umožňuje bezpečný přenos informace. V současné době se připravují plány rozprostit kvantovou komunikační síť napříč celou Evropou. Kvantová provázanost je pouze jedním střípkem, který popisuje kvantová teorie. Nicméně střípkem zefektivňujícím mnoho procedur jak pro kvantové počítání, tak pro kvantový přenos informace. Ale hlavně tento střípek pomohl prokázat platnost kvantové teorie jako celku.

Jak bylo zmíněno na začátku, fyzikové postupují ve svém bádání pořád dál. Stále jsou před námi nevyřešené problémy, které leží na hranici našich pozorovacích možností. Ale snad se jednou dočkáme obecné teorie, která bude sjednocovat všechny známé interakce a jejíž rovnice budou tak jednoduché, že je bude možné nosit vytištěné na tričku.

Poděkování

Autoři článku děkují za finanční podporu od Grantové Agentury ČR v rámci projektu 20-17765S.

Reference

- [1] <https://plato.stanford.edu/entries/qm-copenhagen/>
- [2] Albert Einstein, Boris Podolsky and Nathan Rosen, *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?*, Phys. Rev. **47**, 777 (1935).
- [3] John Stewart Bell, *On the Einstein Podolsky Rosen Paradox*, Physics **1**, 195–200 (1964).
- [4] John Clauser, Michael Horne, Abner Shimony and Richard A. Holt, *Proposed experiment to test local hidden-variable theories*, Phys. Rev. Lett. **23**, 880–4 (1969).
- [5] Alain Aspect, Philipp Grangier and Gérard Roger, *Experimental Tests of Realistic Local Theories via Bells Theorem*, Phys. Rev. Lett. **47**, 460 (1981).
- [6] D. Bouwmeester, J. W. Pan, K. Mattle, M. Eibl, H. Weinfurter & A. Zeilinger, *Experimental Quantum Teleportation*, Nature **390**, 575–579 (1997).

Calculation of the point spread function for optical systems with a finite value of numerical aperture using scalar diffraction theory

A scalar theory is described for the calculation of the point spread function (PSF) of optical systems with larger numerical apertures. In our work, we derive exact and simple approximate relations that allow the calculation of the PSF for a diffraction-limited optical system with a finite value of the numerical aperture. The derived relations are converted into classical expressions that are commonly described in the literature for numerical aperture values approaching to zero. The derived relation is a generalization of the classical relation for calculation of the PSF in the case of larger numerical aperture using scalar diffraction theory.

Keywords: optical imaging, scalar diffraction theory, point spread function, numerical aperture

1. INTRODUCTION

The point spread function (PSF) is a fundamental characteristic of the imaging properties of optical systems. It is closely related to the resolving power and the optical transfer function of an optical system. In the optical literature [1–3], the PSF is usually reported only for the case of optical systems with a very small value of numerical aperture. These relations are sufficiently accurate for a wide range of optical systems encountered in practice, because the value of numerical aperture is relatively small for many optical systems (telescopes, camera lenses, etc.). However, the classical relation for the PSF calculation is not accurate enough for optical systems with a large value of numerical aperture. A typical representative of optical systems with the large numerical aperture is a microscope objective. Diffraction in optical systems with a large numerical aperture is described in Refs. [4–14]. References [15–21] deal with the application of Zernike polynomials to solve diffraction problems in the case of optical systems with aberrations.

The aim of this work is to show the effect of the numerical aperture value on the shape of the point spread function of an optical system using scalar wave theory. Furthermore, a simple analytical expression is also derived to calculate the PSF for the case of a diffraction limited (aberration free) optical system with a circular output pupil and a numerical aperture of finite value.

2. DIFFRACTION INTEGRAL

Let us consider a scalar wavefield. The applicability of the scalar diffraction analysis is practically limited to optical systems with the numerical aperture value $NA < 0.7$. Above these values of numerical aperture, polarization effects become significant [6–11]. As it is well-known from the theory of electromagnetic field [1–6], the amplitude of the wavefield $U(P)$ at any point P of an area bounded by the surface S can be determined if the amplitude of the wavefield $U(M)$ on this surface is known. It can be calculated from the diffraction integral

$$U(P) = -\frac{i}{\lambda} \iint_S U(M) \frac{\exp(ikr)}{r} \cos(\mathbf{n}, \mathbf{r}) dS, \quad (1)$$

where M is a point lying on the surface S , $\mathbf{r}$ is a vector given by points P and M , $r = \|\mathbf{r}\|$ is the distance between P and M , $\cos(\mathbf{n}, \mathbf{r})$ is the cosine of the angle between the normal $\mathbf{n}$ to surface S and the position vector $\mathbf{r}$, $k = 2\pi/\lambda$ is the spatial angular frequency (wave-number) and λ is the wavelength of light in a given optical medium.

Let us now calculate the integral (1) for the case of an optical system with aberrations. The surface S is identical to the wavefront exiting the optical system and the point $M(x, y, z)$ is any point lying on the wavefront S . The point $P(x_p, y_p, z_p)$, which lies in the image plane of the optical system, is the point at which we want to calculate the amplitude of the wavefield, and the point $P_0(x_0, y_0, z_0)$, which also lies in the image plane of the optical system, is the center of a reference sphere with the radius R . It holds for the distance r of point P from point M

$$r^2 = (x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 + (z - z_p)^2. \quad (2)$$

Furthermore, the radius of curvature of the reference sphere can be expressed as

$$R^2 = x_0^2 + y_0^2 + z_0^2, \quad (3)$$

and the equation of the wave front S is given by

$$(R + W/n)^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2, \quad (4)$$

where $W(x, y)$ is the wave aberration of the optical system, and n is the refractive index of the optical medium in the image space. If we denote

$$u = x_p - x_0, v = y_p - y_0, \quad (5)$$

then by using Eqs.(2), (3), (4), and (5) we obtain

$$r^2 = (R + W/n)^2 - 2[(x - x_0)u + (y - y_0)v] + u^2 + v^2. \quad (6)$$

If the wave aberration W is much smaller than the radius of curvature R (which is always satisfied in practice), then by using the approximate formula [24]

$$\sqrt{1+a} \approx 1 + a/2$$

and Eq. (6) we have

$$r \approx R + \frac{W}{n} - \frac{(x - x_0)u + (y - y_0)v}{R} + \frac{u^2 + v^2}{2R}. \quad (7)$$

If the surface S is described by a function $z = z(x, y)$, then the following holds for the element dS of this surface

$$dS = \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} dx dy = \sqrt{D} dx dy. \quad (8)$$

Using Eq. (4) we obtain

$$D = A / B, \quad (9)$$

where

$$A = (R + W/n)^2 + \delta x^2 + \delta y^2 + 2[\delta x(x - x_0) + \delta y(y - y_0)],$$

$$B = (R + W/n)^2 - (x - x_0)^2 - (y - y_0)^2,$$

and

$$\delta x = -\frac{R}{n} \frac{\partial W}{\partial x}, \quad \delta y = -\frac{R}{n} \frac{\partial W}{\partial y},$$

are transverse aberrations of the beam optical system. The previous relations can be simplified for small values of aberrations as follows

$$D = A_1 / B_1,$$

where

$$A_1 = 1 + 2[\delta x(x - x_0) + \delta y(y - y_0)] / R^2,$$

$$B_1 = 1 - [(x - x_0)^2 - (y - y_0)^2] / R^2.$$

If we denote

$$p = (x - x_0) / R, \quad q = (y - y_0) / R,$$

we obtain

$$\sqrt{D} = \frac{1 + (\delta x p + \delta y q) / R}{\sqrt{1 - p^2 - q^2}}. \quad (10)$$

Moreover, if we denote

$$F(p, q) = U(p, q) \sqrt{D} \exp(ik_0 W), \quad (11)$$

$$s = n \frac{u}{\lambda_0}, \quad t = n \frac{v}{\lambda_0},$$

where $k_0 = 2\pi/\lambda_0$, and λ_0 is the wavelength of light in vacuum, Eq. (11) can be written as follows ($\cos(\mathbf{n}, \mathbf{r}) \approx 1$)

$$U(s, t) = C \iint_S F(p, q) e^{-2\pi i(p s + q t)} dp dq, \quad (12)$$

where C is a constant. The relation (12) makes possible to determine the amplitude of the wavefield in the image plane of optical system with a finite value of the numerical aperture. From this relation it is clear that the field $U(s, t)$ is proportional to the Fourier transform of the function $F(p, q)$.

3. POINT SPREAD FUNCTION OF THE DIFFRACTION LIMITED OPTICAL SYSTEM

The imaging properties of a diffraction limited optical system are restricted only by diffraction of light. Such an optical system has no aberrations and the wavefront that exits such a system is spherical.

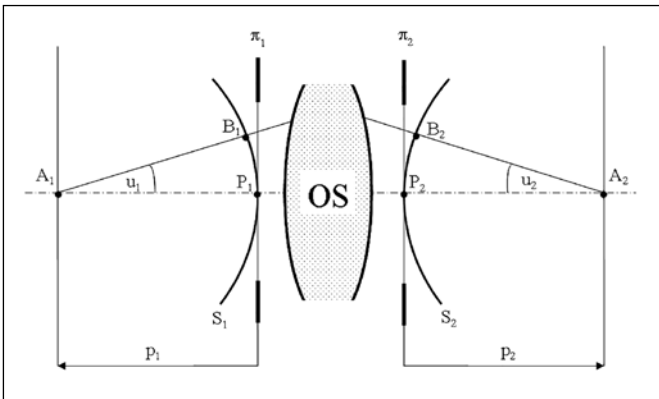


Fig. 1 Imaging by diffraction limited optical system

We will now examine the imaging of an axial point ($x_0 = 0, y_0 = 0$). The situation under investigation is shown schematically in Fig. 1. The axial point A_1 is imaged by the optical system OS into the point A_2 , π_1 and π_2 are the planes of the input and the output pupil of optical system, points P_1 and P_2 are the centers of the input and the output pupil, S_1 is the wavefront entering the optical system and S_2 is the exiting wavefront. The meaning of other symbols is clear from Fig. 1.

To determine the amplitude in the image plane of the optical system, we have to know the function $F(p, q)$, which is necessary to evaluate the integral (12). The function $F(p, q)$ is given by Eq. (11). In the case of a diffraction limited optical system, the wave aberration W is equal to zero ($W = 0$). Further, we have to determine the function $U(p, q) = U(x, y)$, which is the amplitude on the wavefront exiting the optical system. The law of conservation of energy [3, 4, 7, 10, 11, 13, 14] implies that

$$n_1 |U_1|^2 dS_1 = n_2 |U_2|^2 dS_2,$$

where U_1 is the amplitude on the wavefront entering the optical system, $U_2 = U(x, y)$ is the amplitude on the wavefront that exiting the optical system, dS_1 is the surface element on the wavefront S_1 , dS_2 is the surface element on the exiting wavefront S_2 , and n_1, n_2 are the refractive indices of the object and image medium. From previous relation we obtain

$$U_2 = U_1 \sqrt{\frac{n_1}{n_2} \frac{dS_1}{dS_2}}.$$

Now suppose that p_1 is the distance of the object plane from the input pupil of the optical system, p_2 is the distance of the image plane from the output pupil of the optical system, u_1 is the aperture angle in the object space, u_2 is the aperture angle in the image space, φ_1 is the polar angle coordinate in the plane of the input pupil and φ_2 is the polar angle coordinate in the plane of the output pupil. For the ratio of surface elements, we can write

$$\frac{dS_1}{dS_2} = \frac{p_1^2 \sin u_1 du_1 d\varphi_1}{p_2^2 \sin u_2 du_2 d\varphi_2}.$$

Let us now assume that the optical system satisfies the Abbe's sine condition

$$\frac{n_1 \sin u_1}{n_2 \sin u_2} = m,$$

where m is the transverse magnification of the optical system. By differentiation of the sine condition we have

$$n_1 \cos u_1 du_1 = m n_2 \cos u_2 du_2,$$

and thus

$$\frac{du_1}{du_2} = m \frac{n_2 \cos u_2}{n_1 \cos u_1}.$$

Substituting the previous equation and the sine condition into the relation for the ratio dS_1/dS_2 we obtain

$$\frac{dS_1}{dS_2} = \frac{p_1^2}{p_2^2} \left(\frac{n_2}{n_1} m \right)^2 \frac{\cos u_2}{\cos u_1},$$

where we used the fact that $d\varphi_1 = d\varphi_2$. The amplitude U_2 is then expressed by

$$U_2 = U_1 \sqrt{\frac{n_1}{n_2} \frac{1}{m_p} \frac{\cos u_2}{\cos u_1}}.$$

In the previous equation we used the relation

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{n_2}{n_1} m m_p,$$

where m_p is the transverse magnification of the optical system in the pupils. Using the sine condition, we have

$$U_2 = U_1 \sqrt{\frac{n_1}{n_2}} \frac{1}{m_p} \frac{(1 - \sin^2 u_2)^{1/4}}{\left[1 - \left(\frac{n_2}{n_1} m \sin u_2\right)^2\right]^{1/4}}.$$

For the expression $U\sqrt{D}$, which we need to calculate Eq. (11), we obtain

$$U\sqrt{D} = U_1 \sqrt{\frac{n_1}{n_2}} \frac{1}{m_p} \frac{1}{(1 - \sin^2 u_2)^{1/4} (1 - M \sin^2 u_2)^{1/4}},$$

where we denoted

$$M = \left(\frac{n_2}{n_1} m\right)^2.$$

If we denote T as the amplitude transmittance of the optical system, then it holds

$$F = T U\sqrt{D} = \left(U_1 \sqrt{\frac{n_1}{n_2}} \frac{T}{m_p}\right) \frac{1}{(1 - \sin^2 u_2)^{1/4} (1 - M \sin^2 u_2)^{1/4}}. \quad (13)$$

This equation can be used to determine the function F that is necessary to calculate the wavefield amplitude according to Eq. (12) for the case of an image of axial point. If we decompose the second term of Eq. (13) into a series, we have

$$F = \left(U_1 \sqrt{\frac{n_1}{n_2}} \frac{T}{m_p}\right) \sum_{k=0}^{\infty} A_k X^k. \quad (14)$$

The series (14) allows to approximately calculate the diffraction integral (12). The calculation of coefficients A_k is given in Appendix A.

If we introduce the polar coordinates r and φ in the plane of the output pupil and the polar coordinates ρ and ψ in the image plane, we can rewrite Eq. (12) in the form

$$U(\rho, \psi) = K \int_0^1 \int_0^{2\pi} U(r, \varphi) \exp[i\tau r \cos(\varphi - \psi)] \left(\sum_{k=0}^{\infty} A_k r^{2k} \sin^{2k} u_{2\max}\right) r dr d\varphi, \quad (15)$$

where we denote $X = r^2 \sin^2 u_{2\max}$, $u_{2\max}$ is the value of the aperture angle of the marginal ray (ray that goes through the edge of the output pupil), K is a constant, and τ is given by

$$\tau = k_0 \rho n_2 \sin u_{2\max} = \frac{\pi \rho}{\lambda_n c}, \quad (16)$$

where $c = 1/2n_2 \sin u_{2\max} = 1/2NA$ is the f -number of the optical system and NA is the numerical aperture of the optical system.

Let us now assume that the transverse magnification in the pupils of the optical system $m_p = 1$ and both the object and image media are air ($n_1 = n_2 = 1$). Assume further that the amplitude transmittance of the optical system is equal to one (or it is constant). Under these conditions, we can set $U(r, \varphi) = 1$ in Eq. (15). As is known from the theory of Bessel functions [22–24], for a zero coefficient of a first order Bessel function, the following holds

$$J_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp[ix \cos(\vartheta - \gamma)] d\vartheta, \quad (17)$$

where γ is an arbitrary real number. Substituting Eq. (17) into (15) leads to

$$U(\tau) = C \sum_{k=0}^{\infty} A_k \sin^{2k} u_{2\max} \int_0^1 r^{2k+1} J_0(\tau r) dr, \quad (18)$$

where C is a constant. By substitution $z = \tau r$, we obtain

$$U(\tau) = C \sum_{k=0}^{\infty} A_k \sin^{2k} u_{2\max} I_k = C \sum_{k=0}^{\infty} C_k I_k, \quad (19)$$

where

$$C_k = A_k \sin^{2k} u_{2\max}, I_k = \frac{1}{\tau^{2k+2}} \int_0^{\tau} z^{2k+1} J_0(z) dz. \quad (20)$$

The calculation of the integral I_k can be found in Appendix B. It holds that

$$I_k = \frac{1}{\tau^{2k+2}} \int_0^{\tau} z^{2k+1} J_0(z) dz = \sum_{p=0}^k B_{kp} \frac{J_{p+1}(\tau)}{\tau^{p+1}},$$

where

$$B_{kp} = (-2)^p \frac{k!}{(k-p)!}.$$

If we restrict ourselves to the first six terms only, then by substituting Eq. (20) into Eq. (19), we obtain

$$U(\tau) = C \left[U_1 \frac{J_1(\tau)}{\tau} - U_2 \frac{J_2(\tau)}{\tau^2} + U_3 \frac{J_3(\tau)}{\tau^3} - U_4 \frac{J_4(\tau)}{\tau^4} + U_5 \frac{J_5(\tau)}{\tau^5} - U_6 \frac{J_6(\tau)}{\tau^6} \right], \quad (21)$$

where we denoted

$$\begin{aligned} U_1 &= C_0 + C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5, \\ U_2 &= 2C_1 + 4C_2 + 6C_3 + 8C_4 + 10C_5, \\ U_3 &= 8C_2 + 24C_3 + 48C_4 + 80C_5, \\ U_4 &= 48C_3 + 192C_4 + 480C_5, \\ U_5 &= 384C_4 + 1920C_5, \\ U_6 &= 3840C_5. \end{aligned}$$

The maximum deviation of the previous approximate formula from the exact integral calculation is less than 0.5 % for a numerical aperture 0.7. To determine the constant C , let us set the condition that for $\tau = 0$ and for $u_{2\max} \rightarrow 0$, the amplitude $U(\tau) = 1$. From Eq. (21), we obtain

$$C = 2. \quad (22)$$

For small aperture angles i.e. for $u_{2\max} \rightarrow 0$, the relation (21) leads to the classical relation [1, 2, 3]

$$U(\tau) = \frac{2J_1(\tau)}{\tau}. \quad (23)$$

It can be seen that to calculate the *PSF* of optical systems with numerical aperture of finite value, it is necessary to use Eq. (19), which is accurate enough for most optical system in practice and not the simple classical relation (23) reported in the literature. According to the classical relation (23) the first zero of the amplitude function will be for $\tau = \tau_0 = 3.83171$. However, one can see from Eq. (19) that there will not be zero value of amplitude. The relation (19) enables us to calculate the wavefield amplitude for the case of optical systems with a finite value of the numerical aperture and it is a generalization of the relation (23). The relation (19) converts to (23) for the case that the numerical aperture tends to zero. It is sufficient to calculate the amplitude of the wavefield using the approximate relation (21), which is sufficiently accurate for most of optical systems in practice. The point spread function of an optical system can be calculated as

$$I(\tau) = U(\tau)U^*(\tau). \quad (24)$$

4. EXAMPLES

We will now show the effect of the value of numerical aperture and the transverse magnification on the point spread function of the optical system using several examples. Fig. 2 shows the depen-

dence of the point spread function of the diffraction limited optical system on the value of the numerical aperture. The graph presents the difference Δ_{PSF} between the point spread function with a given value of numerical aperture and the point spread function with zero value of numerical aperture.

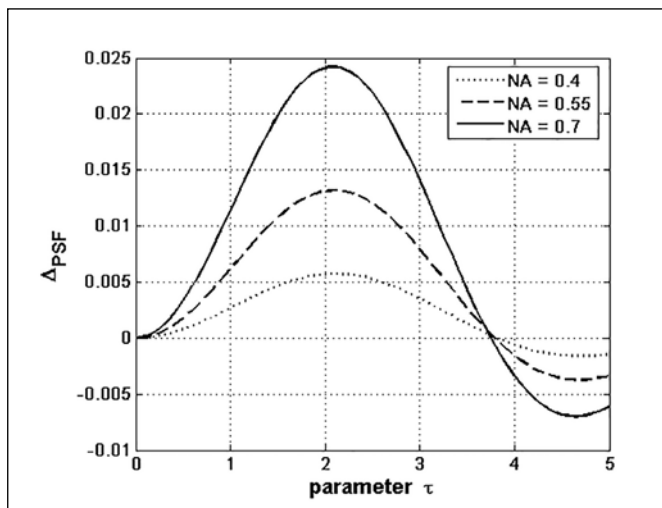


Fig. 2 Dependence of PSF on numerical aperture ($m = -1$)

It can also be concluded from the performed calculations that the value of the first minimum of the point spread function decreases only slightly with increasing numerical aperture. The central part of the Airy disc becomes narrower with increasing numerical aperture. Figure 3 shows the dependence of the Airy disc radius on the numerical aperture of the optical system. For both figures the transverse magnification of the optical system was chosen to be $m = -1$.

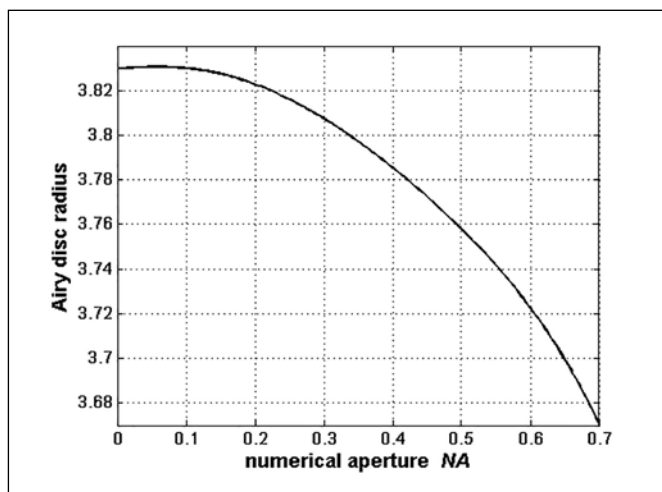


Fig. 3 Dependence of Airy disc radius on numerical aperture ($m = -1$)

From both figures it can be seen that the classical formula (23) is sufficiently accurate for optical systems with numerical aperture $NA \leq 0.5$, i.e. for optical systems with f-number larger than 1. For optical systems with larger numerical aperture it is more appropriate to use the derived formulas (19) or (21).

We now consider the effect of transverse magnification m on the point spread function of the optical system. Figure 4 presents the dependence of the point spread function of a diffraction limited optical system on the value of the transverse magnification. The numerical aperture of the optical system was chosen to be $NA = 0.7$. Figure 4 shows two curves for different magnifications and these curves are compared with the curve for $NA = 0$.

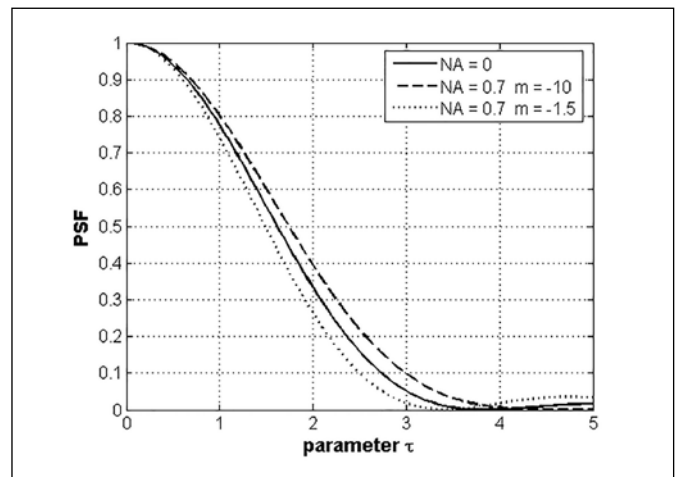


Fig. 4 Dependence of PSF on transverse magnification

Figure 5 presents the dependence of the Airy disc radius on the transverse magnification m of the optical system for a given value of the numerical aperture ($NA = 0.7$).

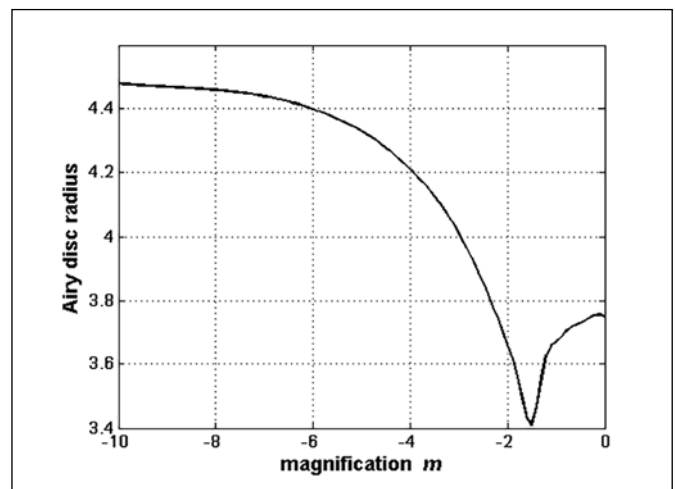


Fig. 5 Dependence of Airy disc radius on transverse magnification ($NA = 0.7$)

5. CONCLUSION

The paper introduced the problem of calculating the point spread function based on scalar wavefield theory. A formula for calculation of the amplitude of the wavefield in the image plane of an optical system with aberrations was derived. This equation holds also for systems with the large numerical aperture. Furthermore, a simple analytical formula was derived for evaluating the wavefield amplitude of an optical system without aberrations with a finite value of numerical aperture. It was shown that the classical relation for the point spread function is only a limiting case for a numerical aperture value approaching to zero. The derived relation represents a general formula for calculating the amplitude in the image plane of the optical system. This problem is closely related to the problem of the resolving power of optical systems. Exact and approximate formulas have been given for calculating the wavefield amplitude of a diffraction limited optical system with a numerical aperture of finite value, constant amplitude transmittance, and imaging with a given transverse magnification. From derived equations can be seen that the point spread function of an optical system depends on the transverse magnification and the value of numerical aperture of the optical system. The dependence of the shape of the point spread function was presented for different values of numerical aperture and magnification in the examples. As can be seen from the

examples, the central part of the point spread function (Airy disc) becomes narrower when the value of numerical aperture increases. However, for optical systems with a small numerical aperture, this is a practically negligible effect.

Appendix A

We can expand the function

$$\frac{1}{(1 - \sin^2 u_2)^{1/4} (1 - M \sin^2 u_2)^{1/4}} \quad (A1)$$

in Eq. (13) into series. It can be done in the following way. Let us denote

$$X = \sin^2 u_2, Y = MX. \quad (A2)$$

If we consider that for real values of n

$$(a \pm b)^n = \sum (\pm 1)^k \binom{n}{k} a^{n-k} b^k, \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots$$

where

$$\binom{n}{k} = \frac{n(n-1)(n-2)\dots(n-k+1)}{k!},$$

we obtain for $a = 1$, $b = X$, and $n = -1/4$

$$\frac{1}{(1-X)^{1/4}} = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + a_3 X^3 + a_4 X^4 + a_5 X^5 + \dots, \quad (A3)$$

where

$$a_k = (-1)^k \binom{n}{k}.$$

The series (A3) is convergent for $|X| < 1$. For the first six coefficients $a_0 = 1$, $a_1 = 1/4$, $a_2 = 5/32$, $a_3 = 15/128$, $a_4 = 195/2048$, $a_5 = 663/8192$.

Using Eq. (A3) we can write

$$\frac{1}{(1-X)^{1/4} (1-Y)^{1/4}} = \sum_{k=0}^{\infty} X^k \sum_{s=0}^k a_s a_{k-s} M^s = \sum_{k=0}^{\infty} A_k X^k, \quad (A4)$$

where we denote

$$A_k = \sum_{s=0}^k a_s a_{k-s} M^s.$$

For the first six coefficients A_k

$$\begin{aligned} A_0 &= 1, \\ A_1 &= a_1(1+M), \\ A_2 &= a_2(1+M^2) + a_1^2 M, \\ A_3 &= a_3(1+M^3) + a_1 a_2 M(1+M), \\ A_4 &= a_4(1+M^4) + a_1 a_3 M(1+M^2) + a_2^2 M^2, \\ A_5 &= a_5(1+M^5) + a_1 a_4 M(1+M^3) + a_2 a_3 M^2(1+M). \end{aligned} \quad (A5)$$

Appendix B

Let us now show the calculation of the integral required for Eq. (19), i.e.

$$I_k = \frac{1}{\tau^{2k+2}} \int_0^\tau z^{2k+1} J_0(z) dz. \quad (B1)$$

In order to solve the integral (B1), we need to calculate integrals of the type

$$I = \int x^m J_n(x) dx. \quad (B2)$$

Because it holds that [23, 24]

$$\int x^n J_{n-1}(x) dx = x^n J_n(x). \quad (B3)$$

and integrating per partes

$$\int u dv = uv - \int v du,$$

where

$$u = x^{m-n-1}, dv = x^{n+1} J_n(x) dx,$$

we obtain the following recurrent formula

$$\int x^m J_n(x) dx = x^m J_{n+1}(x) - (m-n-1) \int x^{m-1} J_{n+1}(x) dx. \quad (B4)$$

We use this recurrent formula to find the solution of the integral (B1). Reusing (B4), we obtain

$$\frac{1}{x^{2k+2}} \int x^{2k+1} J_0(x) dx = \sum_{p=0}^k (-2)^p \frac{k!}{(k-p)!} \frac{J_{p+1}(x)}{x^{p+1}} = \sum_{p=0}^k B_{kp} \frac{J_{p+1}(x)}{x^{p+1}}, \quad (B5)$$

where

$$B_{kp} = (-2)^p \frac{k!}{(k-p)!}.$$

The integral given by Eq. (B1) can be calculated using formula

$$I_k = \tau \frac{1}{\tau^{2k+2}} \int_0^\tau z^{2k+1} J_0(z) dz = \sum_{p=0}^k B_{kp} \frac{J_{p+1}(\tau)}{\tau^{p+1}}. \quad (B6)$$

Using Eq. (B6), we obtain the following values for the first six integrals

$$\begin{aligned} I_0 &= \frac{1}{\tau^2} \int_0^\tau J_0(z) z dz = \frac{J_1(\tau)}{\tau}, \\ I_1 &= \frac{1}{\tau^4} \int_0^\tau J_0(z) z^3 dz = \frac{J_1(\tau)}{\tau} - 2 \frac{J_2(\tau)}{\tau^2}, \\ I_2 &= \frac{1}{\tau^6} \int_0^\tau J_0(z) z^5 dz = \frac{J_1(\tau)}{\tau} - 4 \frac{J_2(\tau)}{\tau^2} + 8 \frac{J_3(\tau)}{\tau^3}, \\ I_3 &= \frac{1}{\tau^8} \int_0^\tau J_0(z) z^7 dz = \frac{J_1(\tau)}{\tau} - 6 \frac{J_2(\tau)}{\tau^2} + 24 \frac{J_3(\tau)}{\tau^3} - 48 \frac{J_4(\tau)}{\tau^4}, \\ I_4 &= \frac{1}{\tau^{10}} \int_0^\tau J_0(z) z^9 dz = \frac{J_1(\tau)}{\tau} - 8 \frac{J_2(\tau)}{\tau^2} + 48 \frac{J_3(\tau)}{\tau^3} - 192 \frac{J_4(\tau)}{\tau^4} + 384 \frac{J_5(\tau)}{\tau^5}, \\ I_5 &= \frac{1}{\tau^{12}} \int_0^\tau J_0(z) z^{11} dz = \frac{J_1(\tau)}{\tau} - 10 \frac{J_2(\tau)}{\tau^2} + 80 \frac{J_3(\tau)}{\tau^3} \\ &\quad - 480 \frac{J_4(\tau)}{\tau^4} + 1920 \frac{J_5(\tau)}{\tau^5} - 3840 \frac{J_6(\tau)}{\tau^6}. \end{aligned}$$

Acknowledgement

This work has been supported by grant SGS21/092/OH-K1/2T/11 of Czech Technical University in Prague.

References

- [1] Goodman JW: Introduction to Fourier Optics. McGraw-Hill, New York 1968.
- [2] Havelka B: Geometrical Optics I. NCSAV, Prague 1955.
- [3] Klein MV: Optics. John Wiley & Sons, Inc., New York 1970.
- [4] Born M, Wolf E: Principles of Optics. Oxford University Press, New York 1964.
- [5] Mikš A: Applied Optics. CTU Publishing, Prague 2009.
- [6] Bowkamp CJ: Diffraction Theory, Rep. Prog. Phys. 17 (1954), 35–100.
- [7] Ignatowsky VS: Diffraction by a Lens Having Arbitrary Opening, Trans. Opt. Inst. Petrograd 1, paper 4 (1919).
- [8] Burtin R: Two Problems of Optical Diffraction at Large Relative Apertures, Opt. Acta 3 (1956), 104.

- [9] Focke J: On Wave-Optical Imagery in Systems with Large Relative Aperture, *Opt. Acta* 4 (1957), 124.
- [10] Wolf E: Electromagnetic Diffraction in Optical Systems I. An Integral Representation of the Image Field, *Proc. R. Soc. London Ser. A* 253 (1959), 349.
- [11] Richards B, Wolf E: Electromagnetic Diffraction in Optical Systems II. Structure of the Image Field in an Aplanatic System, *Proc. R. Soc. London Ser. A* 253 (1959), 358.
- [12] Asakura T: Diffraction of Partially Coherent Light by High Numerical Aperture Systems Obeying the Sine Condition. *Optik* 35 (1972), 404–420.
- [13] Osterberg H, Wilkins JE: The Resolving Power of Coated Objective, *J. Opt. Soc. Amer.* 39 (1949), 7, 553–557.
- [14] Bennett AH, Jupnik J, Osterberg H, Richards OW: *Phase Microscopy*. J. Wiley and Sons, Inc., New York 1951.
- [15] Braat JJM, Dirksen P, Janssen A, Haver S, van de Nes A: Extended Nijboer-Zernike approach to aberration and birefringence retrieval in a high-numerical-aperture optical system. *JOSA A*, Vol. 22, Issue 12, 2635–2650.
- [16] Janssen A: Extended Nijboer-Zernike approach for the computation of optical point spread function, *J. Opt. Soc. Am. A* 19 (2002), 849–857.
- [17] Braat JJM, Dirksen P, Janssen A: Assessment of an extended Nijboer-Zernike approach for the computation of optical point spread function, *J. Opt. Soc. Am. A* 19 (2002), 858–870.
- [18] Dirksen P, Braat JJM, Janssen A, Juffermans CAH: Aberration retrieval using the extended Nijboer-Zernike approach, *Journal of Microlithography, Microfabrication, and Microsystems* 2 (2003), 61–68.
- [19] Braat JJM, Dirksen P, Janssen A, van de Nes A: Extended Nijboer-Zernike representation of the field in the focal region of an aberrated high-aperture optical system, *J. Opt. Soc. Am. A* 20 (2003), 2281–2292.
- [20] Janssen A, Braat JJM, Dirksen P: On the computation of the Nijboer-Zernike aberration integrals at arbitrary defocus, *J. Mod. Opt.* 51 (2004), 687–703.
- [20] van der Avoort C, Braat JJM, Dorosen P, Janssen A: Aberration retrieval from the intensity point spread function in the focal region using the extended Nijboer-Zernike approach, *J. Mod. Opt.* 52 (2005), 1695–1728.
- [22] Hanka L: *Theory of Electromagnetic Field*. SNTL, Prague 1975.
- [23] Arsenin VJ: *Mathematical Physics*. Nauka, Moscow 1966.
- [24] Rektorys K: *Survey of Applied Mathematics*. Elsevier, Amsterdam 1999.

prof. RNDr. Antonín Mikš, CSc., ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra fyziky, Thákurova 7, 166 29 Praha 6 – Dejvice, e-mail: miks@fsv.cvut.cz
 prof. Ing. Jiří Novák, Ph.D., ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra fyziky, Thákurova 7, 166 29 Praha 6 – Dejvice, e-mail: novakji@fsv.cvut.cz
 doc. Ing. Pavel Novák, Ph.D., ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra fyziky, Thákurova 7, 166 29 Praha 6 – Dejvice, e-mail: pavel.novak.3@fsv.cvut.cz

Jedná se o odborný článek

Oči mezi hvězdami

OČI MEZI HVĚZDAMI (Ilustrovaný průvodce noční oblohou), autoři původní publikace **Looking Up © Flying Eye Books 2021**; text © **Jacob Kramer**, 2020 a ilustrace © **Stephanie Scholzová**, 2020; překlad © **Jiří Petrá**, 2021. Nakladatelství Práh, Praha. ISBN: 978-80-7252-900-1. Rozměry 236 × 311 × 11, tvrdé desky. 56 stran (i s deskami), obsah na str. 7, věcný rejstřík na str. 55. Podle uvedeného: Obálka a grafická úprava převzaty z originálu. Bez odvolávek na literaturu, pouze v úvodních několika řádcích uvedeno, že první autor čerpal inspiraci z knihy **Eyes on the Sky: A Spectrum of Telescopes** od **Sira Francise Grahama-Smitha**.

Národní technická knihovna v Praze: Signatura B 19783; QB88: K73124 .T97 2021 (pořízeno v r. 2022, 258 Kč).

V poslední době se mi zdá, že ubývají nové tituly z oboru optiky pořizované NTK, které by byly z mého úhlu pohledu vhodné jako objekt mé recenze do tohoto časopisu. Dříve jsem měl stále doma nějakou učebnici, monografii či jinou knihu z optiky, procházel jí a napsal recenzi. V tento okamžik jsou již všechny recenze opublikovány a v nových knihách se nic vhodného nevyskytlo. A tak jsem se chopil příležitosti projít si výpravnou knížku o astronomických dalekohledech psanou pro děti.

Protože jde o knížku určenou pro děti spíše z prvního stupně základní školy, je použit silnější papír, knížka je slaboulinka, ale s většími rozměry. Nikdy jsem nepsal žádné publikace pro děti a neměl příležitost děti provázet populárně naučnou literaturou, takže se nemohu vyjadřovat všeobecně k obsahu. Zdá se mi, že dítě bude knihou listovat a snažit se pochopit obrázky. Pokud knížka dítě zaujme, bude se obracet na dárce a požadovat vysvětlení. Ten bude muset být připraven odpovídat velmi věcně.

Je celkem jasné, že populárně naučná literatura nemůže vždycky přesně odrážet skutečnost, vždy bude muset v důsledku zjednodušování něco poněkud zkreslit. Zde je ovšem nebezpečí, že toto zkreslení si



dítě může zapamatovat a v budoucnu nebude schopno pochopit, že musí hledat přesnější výklad.

Chtěl bych se nyní zastavit právě u některých z těch sporných záležitostí. Tak např. nevím, zda vyjádření „někteří lidé vidí různé barvy, jiní je rozlišit nedokáží“ vzniklo až volným překladem, nebo bylo již v originále; čekal bych, že vhodnější by bylo uvést, že „většina lidí vidí různé barvy, ale někteří je rozlišit nedokáží“. Toto sousloví o některých lidech se pak ještě vrací vícekrát. O funkci čočky se píše, že „ohýbá světlo“, v angličtině by šlo o „to bend“; je tomu tak opravdu, nebo je užito slovo „to deviate – odchylovat“? Už někde jsem se vyjádřil, že českému mluvčímu jakoby výraz „ohýbat (se)“ byl zadřen pod kůží: viz výstraha ve vlaku „nenahýbejte se z oken“, která nepoužívá přiléhavější a vžitější slovo „vyklánět se“. Také bojuji proti tomu, aby se nenahrazoval termín „difrakce – difraktovat“ překladem z němčiny „Beugung – beugen“ jako „ohyb – ohýbat (se)“. Ale to je mimo okruh termínů v této knížce! Termín „zaoblená zrcadla“ je velmi zavádějící, stejně jako „plochá zrcadla“; mělo být „rovinná zrcadla“ a snad „nerovinná zakulacená“ jako „vypouklá nebo vydutá“. Nevím, zda vyjádření „ta nejčervenější červená“ a „nejfialovější fialová“ se příliš nepodbízejí dětské mluvě na úkor přesnějšího přístupu. „Neviditelné červené světlo“ není též šťastné vyjádření. Také mi není jasné, proč se komplikují vyjádření pro velké hodnoty mezinárodně nepoužívanými výrazy jako např. kvadriliony nebo biliardy, když se dítě už seznámilo s gigabajty a už asi slyšelo předpony tera nebo i peta. Může mu být dokonce bližší vyjádření v desítkových mocninách a tím v počtu nul.

Ještě bych chtěl poznamenat něco k obrázku oka. Je snad příliš stylizováno a je zavádějící. Čočka v oku, či jak říkáme oční čočka, je umístěna na samém začátku oční bulvy, ne uprostřed, jak to vyplývá z obrázku. Snad by to s sebou nepřineslo nějakou nepřekonatelnou obtíž, kdyby se to uvedlo přesněji.

Pokračování článku na str. 224

Laser na hliníkových nohou

Článek reflektuje využití hliníkových konstrukčních systémů v podmínkách vědeckého výzkumného Centra HiLASE, které je součástí Fyzikálního ústavu AV ČR. Konstrukce využívající hliníkové profily zažívají během posledních dekád výrazný boom díky jejich pokročilým konstrukčním i uživatelským vlastnostem. V mnoha případech představují vítanou alternativu vůči technologicky složitějším řešením, jako jsou například konstrukce svařované. Uvědomujeme si, že i přes množství pozitivních vlastností nepředstavují tyto systémy univerzální všelék na veškeré konstrukční překážky. Nicméně se snažíme hledat způsoby, jak tyto pozitivní vlastnosti maximálně využít a eliminovat negativa. V článku představíme naši filozofii využití hliníkových konstrukčních systémů, porovnáme jejich výhody a nevýhody oproti jiným řešením, a na příkladech ukážeme míru využití těchto systémů v podmínkách našich laserových laboratoří.

Klíčová slova: aluminium, hliníkový profil, konstrukční systém, vedení svazku, LSP, stavebnicový systém, laser, HiLASE

1. ÚVOD

Hliníkové profily představují v současnosti jeden z celosvětově nejrozšířenějších konstrukčních systémů. Setkat se s nimi lze na nejrozmanitějších místech nejrozmanitějších odvětví – typicky např. v automobilovém průmyslu nebo méně typicky v designu nekonfekčního nábytku. Důvodů pro jejich použití je celá řada počínaje variabilitou, přes moderní vzhled a konče montážní jednoduchostí.

V několika následujících odstavcích vysvětlíme, jaké konstrukční systémy v Centru HiLASE používáme, jakou motivaci pro jejich použití máme a dále jaké konstrukční výzvy se nám s jejich použitím daří (a někdy i nedaří) řešit.

2. BUDOUCNOST PATŘÍ ALUMINIU

Hliníkové (v tomto případě jde o obecné pojmenování, obvykle se jedná o přírodně eloxovanou slitinu EN AW 6060 – používanou např. firmami Alutec KK, Bosch, Paletti nebo EN AW 6063 – využívanou např. firmou Kanya) profily se aplikují od roku 1980, kdy byl v Solingenu navržen vůbec první systém tohoto typu (obchodní název item). Během čtyř dekád své existence dokázaly hliníkové profily poměrně významně ovlivnit tvář moderní mechaniky [1]. V Čechách profily vyrábí firma ALUTEC KK již od roku 1994 [2].

2.1 Hliník versus železo

Není složité si představit, co způsobilo masivní rozšíření těchto konstrukčních systémů. Hliníkové profily najdeme nejčastěji jako součást konstrukcí, které by jinak pravděpodobně byly svařované a montované z ocelových profilů (jáklů). Takovéto konstrukce ovšem ve srovnání vycházejí jako technologicky výrazně náročnější, těžší (až třikrát) s variabilitou limitně se blížící nule.

Standardní operace při práci s hliníkovými konstrukčními systémy představují přířez profilů a jednoduché zavrtání otvorů pro rohové spojovníky (dle konkrétního výrobce). Naproti tomu typický postup při práci s ocelovým materiálem obvykle zahrnuje kromě přířezu i svařecí operace, povrchové úpravy (v případě běžných konstrukčních ocelí) a v případě, že je požadována i určitá variabilita, pak nezanedbatelné množství operací třískového obrábění. Samostatnou kapitolou jsou případné změny nebo úpravy, obvykle vyžadující použití rozbrušovačky, zámečnického kladiva a následně opět svařčky. Tyto nežádoucí průvodní vícepráce jsou při využití hliníkových profilů v drtivé většině případů eliminovány systémem drážek a pestrout škálou spojovacích prvků.

Velkou výhodou použitého materiálu jsou i jeho ekologické aspekty. Jako konstrukční materiál má v důsledku vysoké odolnosti proti korozi dlouhou životnost. Hliníkové konstrukční systémy lze snadno přestavovat, a tím jednotlivé prvky efektivně používat znovu. Ve chvíli, kdy konstrukce už opravdu v laboratoři doslouží, ji lze dobře recyklovat. Druhotný hliník může projít bez kvalitativních ztrát mnoha výrobními cykly – v současnosti se až 90 % materiálu vrací ke zpracování do výrobního oběhu [3]. Ukládáním či likvidací hliníkového odpadu zároveň nedochází k žádné zátěži životního prostředí.

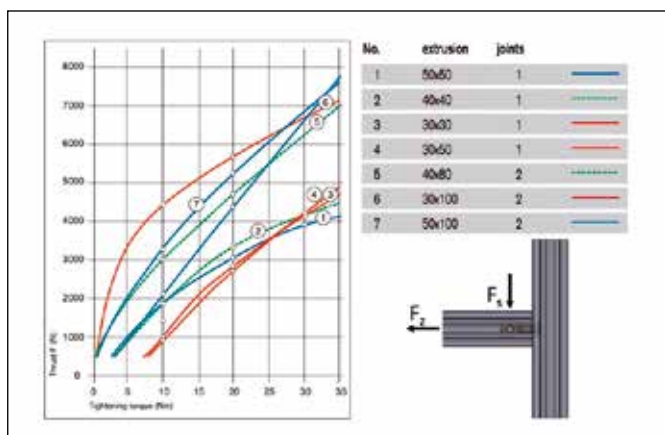
2.2 Kolik to unese?

Častým námětem k diskuzi bývá celková tuhost hliníkových konstrukčních systémů ve srovnání se svařenci. Zde nám může posloužit jednoduchý příklad. Máme obecně zadaný spoj tvaru T, který lze vyřešit dvěma svařenými ocelovými (ČSN 11 373) 40×40 jákly nebo dvěma hliníkovými 40×40 profily spojenými univerzální spojkou Kanya (obr. 1).



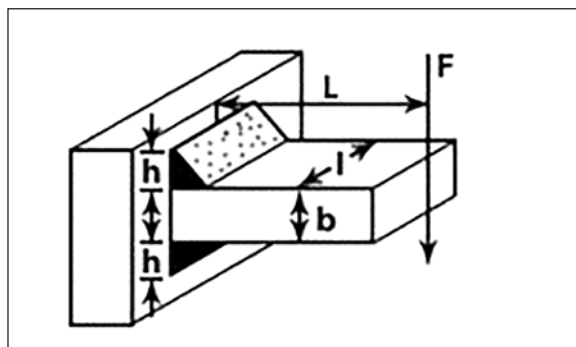
Obr. 1 Spoj tvaru T – svařenec (vlevo) a hliníkové profily (vpravo), zdroj vlastní

V případě hliníkových profilů činí střížná síla F_s (tj. zatěžující síla působící kolmo na spojkou a vyvolávající porušení integrity spoje) cca 4 000 N při utahovacím momentu 30 Nm – vzájemně velmi blízko pro profily 30×30, 40×40 a 50×50. Tažná síla F_z (síla v ose spojky, kterou je spoj upevněn) je pro profil 40×40 14 000 N (obr. 2) [4].



Obr. 2 Střížné síly a utahovací momenty univerzálních spojek, zdroj [4]

Pokud použijeme stejné hodnoty zatížení pro kontrolu svařovaného spoje (rameno síly délky L odpovídá umístění univerzální spojky na hliníkovém profilu), můžeme z výstupních hodnot snadno určit předdimenzování daného spoje (tab. 1/obr. 3) – více než dvojnásobně dle koeficientu kombinované bezpečnosti k_{red} (uvažujeme porušení integrity spoje). Pro zjednodušení byl použit výpočet koutového svaru z portálu e-konstrukter.cz [5].



Obr. 3 Kontrola svařovaného spoje dle portálu e-konstrukter.cz, zdroj [5]

Tab. 1 Kontrola svařovaného spoje dle portálu e-konstrukter.cz, zdroj [5]

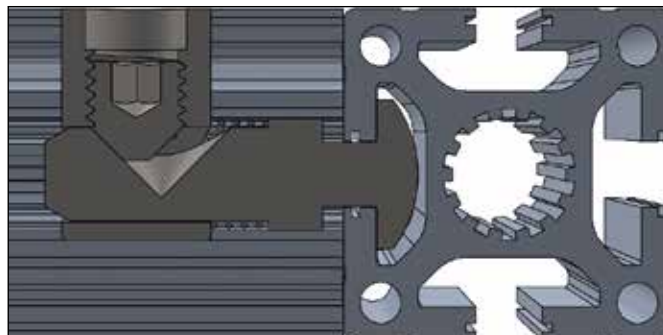
Vstupní parametry (materiál běžná konstrukční ocel 11 373)			
parametr	označení	jednotka	hodnota
délka svaru	l	mm	24
tloušťka	b	mm	40
výška svaru	h	mm	4
rameno síly	L	mm	25
mez kluzu v tahu	Re	MPa	220

Výstupní hodnoty			
normální napětí ve svaru	σ	MPa	44,598
tečné napětí ve svaru	τ	MPa	29,458
koef. bezpečnosti σ	k_1		3,206
koef. bezpečnosti τ	k_2		4,845
kombinované napětí	σ_{red}	MPa	67,767
kombinovaná bezpečnost	k_{red}		2,11

Je však nutné si uvědomit, do jaké míry se vyšší tuhost svařovaného spoje vyplácí, bereme-li v potaz jeho výše zmíněné negativní průvodní vlastnosti. Obvyklý výsledek těchto úvah pak favorizuje využití hliníkového konstrukčního systému, kdy jeho uživatelská přívětivost vyvažuje do určité míry horší mechanické vlastnosti. Podstatný je i fakt, že v dnešní době se běžně používají i speciální hliníkové profily a spojky (např. od firmy Controlled Dynamics) určené pro vysokou zátěž, které dále rozšiřují paletu možných konstrukčních řešení.

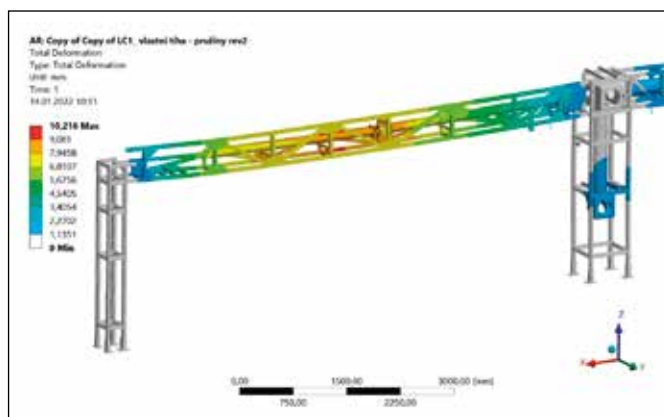
2.3 Jak se to dá spočítat?

Poměrně málo známou negativní vlastností spojů hliníkového konstrukčního systému je jejich obtížná definovatelnost pro účely statických a dynamických analýz. Tam, kde je definice svařovaného spoje geometricky relativně jednoduchá (vyplývající z jednoduchých tvarů obou profilů i obou svarových housenek), definice spoje konstrukčního systému představuje výrazně složitější zadání. Významnou roli hraje provedení spoje dle výrobce (může jít i o prosté prošroubování nebo o spojení pomocí úhelníků), ovšem v nejčastějším případě, kdy je použita univerzální spojka, geometrie spoje zahrnuje minimálně jeden šroubový spoj s tažnou kotvou v drážce jednoho z profilů. Tyto šroubové spoje mohou být např. umístěny excentricky mimo osy spojovaných profilů (systém item) nebo mohou na tažnou kotvu v ose profilu působit kuželovým stykem mezi šroubem a kotvou (např. systém Kanya – uvedeno v modelovém příkladu). Připočteme-li do úvahy, že část kontaktních ploch v rámci spojky a profilu je válcová nebo kuželová (což je při započtení výrobních a montážních tolerancí efektivně redukuje na kontaktní přímky), dojdeme k závěru, že takto provedený spoj je geometricky mnohem komplikovanější (obr. 4).



Obr. 4 Řez spojem profilů Kanya, zdroj vlastní

To samo o sobě nepředstavuje významnější problém v případě analýzy jednoho spoje s „rozumně“ zadaným zatížením (v uvedeném příkladu jde o zatížení osamocenou silou kolmo na průřezík os šroubu a kotvy). Pokud se ovšem jedná o analýzu komplikova-



Obr. 5 Analýza deformace vyztuženého úseku distribučního systému, zdroj [6]

nější konstrukce, která zahrnuje větší množství spojů a je zatížená kombinací sil a spojitých zatížení, může se velmi reálně stát, že pro provedení analýzy buď nebude dostatek výpočetního výkonu, nebo že takováto analýza zabere neúměrné množství času (jak pro její zadání, tak i výpočet). Proto se pro účely takových simulací používá náhradní řešení s pružnými vazbami (s empiricky definovanou konstantní tuhostí) [6]. Takové řešení lze ve většině aplikací pokládat za dostatečné, v některých případech (např. u velmi dlouhých konstrukcí) však může dané zjednodušení způsobit významný odklon simulace od reality. V případě našeho Centra jsme na tuto komplikaci narazili během rozšíření systému distribuce laserových svazků (viz dále), kde došlo k výraznému prohnutí vodorovných úseků podpůrné konstrukce. Problém byl řešen přepracováním výpočtového modelu (redefinováním vazeb dle nově nabytých znalostí) a vyztužením kritických míst (obr. 5).

2.4 A kolik to vlastně stojí?

Pro cenové porovnání hliníkového konstrukčního systému a svařence použijeme modelovou situaci. Jedná se o výrobu jednoduché nosné konstrukce o rozměrech 500 mm × 505 mm × 235 mm s použitím Al profilů, resp. ocelových jablek modulu 50×50. Součástí hliníkové konstrukce jsou zpevňovací úhelníky, upevňovací patky, krytky a vkládací matice. Ocelová konstrukce má na sobě připraveny otvory pro upevnění neseného zařízení a je zároveň zinkována (obr. 6).

V případě hliníkové konstrukce jsme obdrželi tři cenové nabídky, v případě konstrukce ocelové jednu [7]. Nabídky jsou uvedeny v tab. 2.

Tab. 2 Porovnání cenových nabídek

Dodavatel	Typ konstrukce	Cena bez DPH	Poznámka k ceně
1	Hliníkové profily	3 400 Kč	Cena za samotný materiál bez vyčištění, montáže a dopravy
2	Hliníkové profily	4 400 Kč	
3	Hliníkové profily	11 200 Kč	Cena včetně vyčištění, montáže a dopravy
4	Ocelový svařenec	2 500 Kč	Cena za svařenou konstrukci s PÚ, bez dopravy

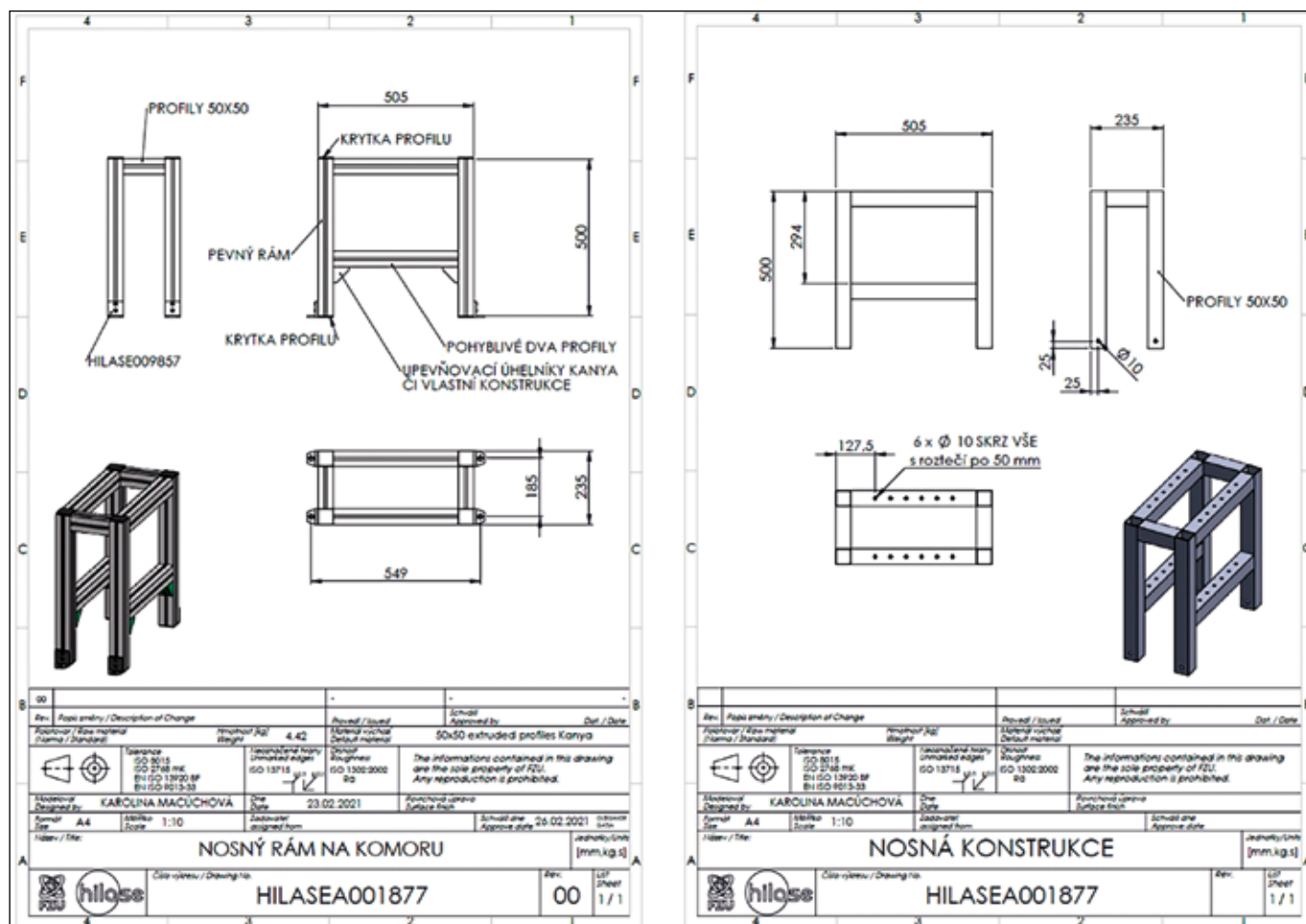
Takto významný (v extrémním případě) cenový rozdíl je poměrně důrazným argumentem při rozhodování mezi montovanou hliníkovou konstrukcí a svařencem. V takové situaci, kdy se v zásadě jedná o jednoúčelovou konstrukci, je vhodné důkladně zvážit, zda jsou výše zmíněné výhody významné natolik, aby opodstatnily (v daném případě) vyšší cenu. (Nabídky byly vytvořeny v první polovině roku 2021 a v tomto článku slouží pouze pro vzájemné porovnání.)

3. JAK LASERAŘI K HLINÍKU PŘIŠLI

V Centru HiLASE, kde intenzivně vyvíjíme laserové systémy pro vědecké a průmyslové aplikace, nalezly hliníkové konstrukční systémy široké uplatnění.

Motivací pro jejich využití byla zejména zmíněná:

1. Vysoká variabilita konstrukcí. Jako vědecká instituce se nikdy nespokojíme s tím, co máme a neustále něco vylepšujeme.



Obr. 6 Porovnání hliníkové a ocelové konstrukce, zdroj vlastní

2. Snadná montáž a transportovatelnost. Což oceňujeme v častých případech, kdy je nutno konstrukce postavit v hustě zastavěných částech laboratoří.

3. Velký výběr doplňujícího sortimentu, jako jsou např. madla, panty, pojezdy, polykarbonátové, mřížové nebo dibondové (sendvičové) panely.

4. Moderní, funkční vzhled, protože desítky metrů dlouhé hliníkové konstrukce zkrátka vypadají elegantně a působivě.

Nejčastěji využíváme profily firmy Kanya AG, dodávané firmou APM Engineering s.r.o., se kterou máme dlouholetou spolupráci. Měli jsme možnost otestovat i systémy jiných výrobců, řešení Kanya nám však nejvíce vyhovuje z pohledu přesnosti a montážní nenáročnosti. Velkou devizou je pro nás domluvený standard s dodavatelem, kdy jsou komponenty určené do čistých prostor laboratoří kvality ISO 7 dodávány kompletně vyčištěny a dvojité zabaleny. To nám umožňuje rychlou montáž bez nutnosti ztrácet čas čištěním, které je u hliníkových profilů složité a zdoluhavé.

Hliníkový konstrukční systém nachází v Centru HiLASE široké využití. Uvádíme proto pouze pár reprezentativních příkladů.

3.1 Nosná konstrukce mikroobráběcí hlavy

Jednou z menších konstrukcí, při kterých byly použity hliníkové profily, je rám mikroobráběcí hlavy Pulsar Photonics FBS (FlexibleBeamShaper) umožňující její montáž k optickému stolu a připojení k tenkodiskovému laserovému systému Perla B (obr. 7). Výrazným prvkem je využití hliníkových (EN AW 6063) přírubových desek pro upevnění konstrukce k desce optického stolu. Konstrukce je dále doplněna rychle demontovatelnými plechovými kryty (EN AW 6063).



Obr. 7 Hlava Pulsar Photonics FBS na nosné konstrukci s demontovanými kryty, zdroj vlastní



Obr. 8 Kabina LSP stanice, zdroj vlastní

3.2 Kabina pro LSP

Proces LSP (Laser Shock Peening) neboli laserové vyklepávání spočívá ve zpevňování povrchu kovových materiálů pomocí kompresní rázové vlny generované pulzním laserem. Během procesu je kovový vzorek orientován vůči laserovému svazku pomocí robotického ramene Fanuc, které je součástí tzv. LSP stanice. Významnými průvodními efekty procesu jsou vznik zplodin a rozstřík vodní clony při dopadu laserového svazku. Aby tyto efekty negativně neovlivňovaly okolní prostředí, navrhli jsme procesní kabínu s odsáváním zplodin a omezením šíření vodního rozstříku (obr. 8). Součástí kabiny je i komora se zakladačem pro výměnu vzorků bez nutnosti vstupu do pracovního prostoru. Zakladač byl realizován jako rozšíření vybavení kabiny – díky použití hliníkových profilů jsou obdobná doplňková řešení snadno realizovatelná a předpokládáme, že budou dále přibývat.

Limitujícím faktorem je v tomto případě inherentní netěsnost spojů jednotlivých profilů. Zde bylo třeba použít polyuretanový těsnicí tmel, kterým jsou v místech spojů vyplněny drážky profilů. V ostatních případech lze netěsnosti eliminovat poměrně jednoduše – podlahové dílce ze slízkového plechu QUINTETT jsou těsněny pomocí plochých gumových pásů a svislé výplňové panely z polykarbonátu a hliníkového plechu jsou utěsněny pomocí standardních těsnění Kanya vkládaných do drážek profilů spolu s panely. Pohyblivé díly jsou utěsněny pomocí standardních gumových lišt Kanya. Příruba robotického ramene a mezera mezi kabinou a stropem LSP stanice jsou utěsněny pomocí gumových pásových manžet.

Tímto řešením se nám podařilo dosáhnout dostatečného utěsnění vnitřního prostoru kabiny od zbytku laboratoře. Je na místě zdůraznit, že smyslem těchto těsnění je v první řadě snaha o maximální omezení průniku zplodin mimo pracovní prostor a dále o minimalizaci průsaku vody podlahou. V další řadě jsme také mysleli na snazší údržbu povrchů pracovního prostoru. Takto utěsněný prostor ovšem nelze pokládat za vodotěsný nebo vzduchotěsný. Těsnění hliníkových profilů je obecně problematické, tím spíše, pokud jsou součástí konstrukce i pohyblivé díly (např. dveře), nebo pokud je nutno těsnit i obecné tvary (v našem případě základnu robotického ramene).

Stručně řečeno, pokud je cílem návrhu např. nádrží na kapalinu nebo přetlaková/podtlaková komora, hliníkový konstrukční systém není ideální volbou. Pokud je ovšem požadováno pouze omezení (usměrnění) uvažovaného média, mohou být hliníkové profily vážným kandidátem. Hliníkové profily jsme zvolili i z toho důvodu, že kabinu bylo nutno postavit ve stísněném prostoru stanice a zároveň obestavět její veškeré vybavení – robotické rameno, přírady energie a médií, osvětlení, požární hlásiče stanice a další. To bylo významně usnadněno právě snadnou montáží a transportovatelností. Proto i přes nedokonalou těsnost hliníkových profilů považujeme řešení za úspěšné a efektivní.

3.3 Laserové clony

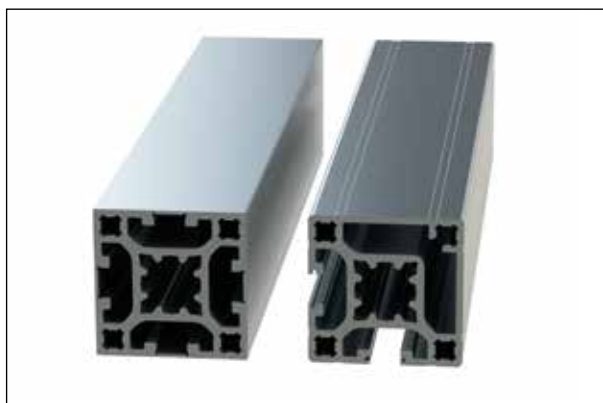
Součástí laserové bezpečnosti jsou clony poblíž vstupních dveří do laboratoře. Cílem je zamezit při otevření dveří průchodu laserového svazku z laboratoře (kde je nutné nosit odpovídající ochranné pracovní prostředky) do bezpečného prostoru (kde jsou tyto prostředky uloženy). Jako ochranné clony používáme bezpečnostní závěsy LASERVISION a Kentek se závěsnými oky a podélnými spojkami. Závěsy se upevňují na jednoduché rámy z hliníkových profilů, které jsou konstruovány jako pevné (obvykle připojené k bezpečnostním příčkám Protect Laserschutz) nebo jako samostatně stojící – pohyblivé (obr. 9).

V případě samostatných ráků (u kterých se nepředpokládá připojení k jiným systémům) se pro laboratorní podmínky osvědčilo použití profilů SOFTLINE, které mají trvale kryté všechny čtyři drážky. (Nejedná se ovšem o profily s jednou nebo více plnými stěnami, kde tyto stěny nahrazují drážky – porovnání viz obr. 10.) Krytí lze v příslušných místech relativně snadno odstranit (vyломit



Obr. 9 Fixní (vlevo) a pohyblivá (vpravo) laserová clona, zdroj vlastní

nebo odfrézovat), čímž je umožněno spojení profilů při zachování čistých vnějších linií. To je mimořádně výhodné nejen z estetického hlediska, ale i z pohledu čistoty laboratorních prostorů, kdy jsou tyto profily mnohem lépe čistitelné než profily standardní s otevřenými drážkami.



Obr. 10 Profily Kanya C10-0 40x40 SOFTLINE (vlevo) a C01-7 40x40 CORNER (vpravo), zdroj vlastní

3.4 Laboratorní policový systém

Policový systém pro optické stoly v laboratoři tenkodiskových laserů maximálně využívá modularitu hliníkových profilů. Hlavní myšlenkou je návrh unifikovaných příčných (vzhledem k optickým stolům) podstavců – tzv. bran, které jsou podle potřeby vzájemně propojovány podélnými profily. Celková odkládací plocha představuje 75 m² na 100 m² plochy optických stolů. Systém dále slouží jako nosný prvek pro energie (rozvod 220 V, koše pro přípojné a prodlužovací kabely), média (technických plynů, chladicí vody) i vedení laserového svazku optickým vláknem (obr. 11).

Využití standardizovaného konstrukčního systému dodatečně umožňuje části vzájemně propojovat, případně připojovat nové sestavy – v našem případě jde např. o propojení s podpůrnou konstrukcí pro vedení kapalného dusíku ke kryogennímu laseru.

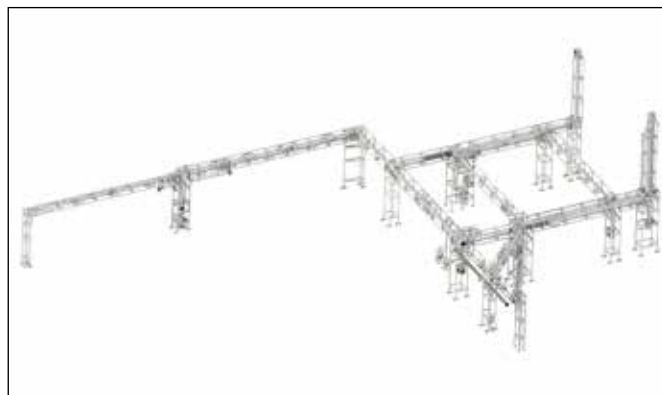
Zajímavostí je v tomto případě nejen použití profilů s částečně plnými stěnami, ale i využití odlehčených a zesílených profilů. Ty jsou při vnějším pohledu prakticky nerozeznatelné od standardního profilu se čtyřmi drážkami, liší se však lehčí nebo naopak robustnější vnitřní strukturou. Důvod pro jejich použití je nasnadě – v méně zatěžovaných oblastech lze použít lehkou (a v případě některých modulů i super lehkou) variantu, která kromě snadnější manipulace nabízí i určitou finanční úsporu; pro přenos vyšších zatížení je naopak vhodné použít robustní „HEAVY DUTY“ variantu.



Obr. 11 Police pro systém D+G GigaPulse, zdroj vlastní

3.5 Systém distribuce laserových svazků

Systém distribuce laserových svazků představuje vrcholné využití hliníkových profilů v Centru HiLASE. Jedná se o vedení laserového svazku z místa jeho vzniku do místa jeho aplikačního využití pomocí optických a vakuových prvků nesených podpůrnou konstrukcí z hliníkových profilů (obr. 12). Tento systém prochází budovou Centra a jeho maximální rozměry jsou 26 700 mm × 15 850 mm × 6 100 mm s přesností < 0,1 mm. Únosnost konstrukce je navržena a vypočtena pro zadaná provozní i mimořádná zatížení a maximální deformace vlivem statického a dynamického zatížení [8]. Systém byl založen v roce 2015 a v letech 2019 a 2021 několikrát významně rozšířen. Během těchto rozšíření se jako naprosto klíčová vlastnost systému ukázala jeho variabilita. Jedním z výrazných prvků konstrukce je využití škály profilů odvozených od použitého základního modulu 50x50 (např. 100x200).



Obr. 12 Systém distribuce laserových svazků, zdroj vlastní

Distribuční systém je ukotven do odtlučené podlahy laserové laboratoře, kde je za běžného provozu řízená teplota 21 °C ± 1 °C. V případě, že tuto hodnotu nelze dodržet (např. z důvodu výpadku nebo odstávky vzduchotechniky), může se během několika hodin teplota prostředí změnit v řádu jednotek °C. Tím způsobená změna rozměrů by mohla mít za následek výrazné rozladění celého optického systému, v horším případě i poškození některé z jeho komponent.

Výrobce udává teplotní roztažnost hliníkových profilů je 0,0232 mm/m/Δt [4]. Tento údaj získává zvláštní důležitost v případě takto rozměrných konstrukcí, na které jsou zároveň kladeny nároky na přesnost a spolehlivé plnění funkce za specifické teploty. Z toho důvodu systém využívá ve vhodně zvolených bodech suvné uložení, které funguje jako kompenzátor tepelné dilatace (obdobně, jako se pomocí pohyblivého uložení kompenzuje dilatace mostních konstrukcí – viz obr. 13).



Obr. 13 Ukotvení distribučního systému do podlahy (vlevo), provedení suvného uložení (vpravo), zdroj vlastní

4. ZÁVĚR

Hliníkové stavebnicové systémy představují moderní způsob řešení rámových konstrukcí. Našly široké uplatnění nejen v průmyslu, ale i ve vědecko-výzkumném prostředí, jako je Centrum HiLASE. Ukázali jsme různé příklady aplikace těchto systémů v podmínkách našich laserových laboratoří a nastínili další možnosti rozvoje i použití těchto systémů.

Na závěr uvádíme tabulku se stručným porovnáním hliníkových profilů a svařenců z běžných konstrukčních ocelí. Tabulka je do určité míry zobecněná, protože různé aplikace obvykle mají odlišné požadavky na jednotlivé konstrukční vlastnosti (např. estetičnost, která je značně subjektivní a v tabulce má spíše doplňující funkci).

Tab. 3 Porovnání vlastností hliníkových profilů a ocelových svařenců

	Hliníkové profily	Ocelové svařence
Modularita	+	–
Hmotnost	+	–
Technologická náročnost	+	–
Transportovatelnost	+	–
Snadnost montáže a demontáže	+	–
Recyklovatelnost	+	–
Estetičnost	(+)	(–)
Mechanické vlastnosti	–	+
Vodotěsnost a vzduchotěsnost	–	+
Náročnost na výpočty a simulace	–	+
Cena	–	+

Poděkování

Práce na tomto článku byla finančně podpořena Evropským fondem pro regionální rozvoj a státním rozpočtem České republiky (Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání; projekt HiLASE CoE, čís. CZ.02.1.01/0.0/0.0/15_006/0000674; program NPU I, projekt čís. LO1602).

Reference

- [1] The item story [online]. 2022 [cit. 2022-06-07]. Dostupné z <https://timeline.item24.com/index.php/en>
- [2] ALUTEC KK [online]. 2022 [cit. 2022-06-07]. Dostupné z <https://www.aluteckk.cz/>
- [3] Infinitely Recyclable [online]. 2022 [cit. 2022-06-07]. Dostupné z <https://www.aluminum.org/Recycling>
- [4] Kanya general catalogue [online]. 2022 [cit. 2022-06-07]. 141. Dostupné z https://www.kanya.com/fileadmin/kanya/service/Kataloge_EN/Gesamtkatalog_KANYA_CH_e_low.pdf
- [5] Pevnostní výpočet koutového svaru [online]. 2022 [cit. 2022-06-07]. Dostupné z <https://e-konstrukter.cz/technicke-vypocty/16-koutove-svary/67-pevnostni-vypocet-koutoveho-svaru>
- [6] Kožíšek, L. (2022). Výpočet nosníku teleskopu T3 a T4 Revize 03. Powerpoint
- [7] Cenové nabídky – Alusic; APM Engineering; Marek; Zihos
- [8] Macúchová, K., Brajer, J., Cerný, E., Hermánek, J., Kaufman, J., Muresan, M., Mocek, T. (2019). Modular laser beam distribution system for the HiLASE center. Paper presented at the *Proceedings of SPIE – the International Society for Optical Engineering*, 11385 doi:10.1117/12.2542519

Ing. Jan Heřmánek, e-mail: jan.hermanek@hilase.cz, tel. +420 314 007 771, Ing. Pavel Crha, Ing. Karolina Macúchová, Ph.D., Ing. Helena Picmausová, Ing. Martina Řeháková, Ing. Luděk Švandrlík, Ing. Marie Thunová, Ing. Tomáš Mocek, Ph.D., Centrum HiLASE, Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i., Za Radnicí 828, 25241 Dolní Břežany, Česká republika

Jedná se o odborný článek

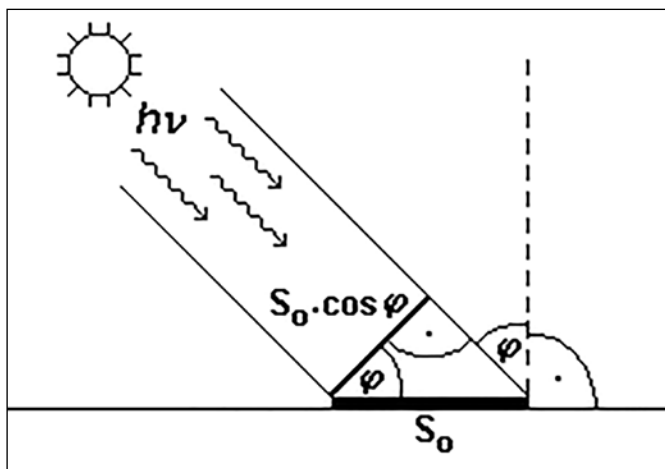
Vlastnosti fotovoltaických systémů s automatickými pohyblivými stojany

Během posledních 10 let došlo k výraznému zlevnění fotovoltaických panelů. Význam automatických pohyblivých stojanů se sledovací Slunce se tak na čas snížil, ale nyní opět roste. Nejefektivnější jsou pohyblivé stojany s vodorovnou rotační osou, protože minimalizují efekt vzájemného stínění jednotlivých stojanů.

Problematickou pohyblivých stojanů pro solární fotovoltaické systémy jsme se intenzivně zabývali před deseti až dvaceti lety a i na stránkách Jemné mechaniky a optiky jsme o tom informovali [1–4]. Tehdy ve střední Evropě probíhal solární boom. Ceny kvalitních fotovoltaických panelů se pohybovaly kolem 3 Euro za 1 W instalovaného nominálního výkonu. Taková cena byla poměrně vysoká. Mírně zvýšenou investicí do pohyblivého stojanu je možné získat během slunečného dne až o 40 % více elektrické energie v porovnání se stejnými fotovoltaickými panely instalovanými na pevném stojanu. Během posledních 10 let cena kvalitních fotovoltaických panelů klesla na cca 0,3 Euro za 1 W instalovaného výkonu a důsledek tohoto poklesu diskutujeme níže.

Teoretický výpočet je poměrně jednoduchý, vychází z toho, že na povrch Země dopadá na rovinu kolmo ke směru přímého slunečního záření maximální intenzita záření kolem $I = 1100 \text{ W m}^{-2}$. Při účinnosti kvalitních fotovoltaických panelů na bázi krystalického křemíku cca 20 % lze z plochy panelu $S = 1 \text{ m}^2$ získat maximální výkon kolem $P_{\text{max}} = 200 \text{ W}$. Při šikmém dopadu záření tato hodnota klesá. Pokud máme u fotovoltaického systému instalováno zařízení schopné sledovat pohyb Slunce po obloze a natáčet panely po celý den kolmo ke směru slunečního záření, mohou vyprodukovat více elektrické energie v porovnání s panely instalovanými na pevném stojanu, neboť množství vyrobené elektrické energie W je dáno vztahem $W = \int_{\Delta t} P dt$, kde t je čas.

Průměrný denní čas, po který je Slunce nad obzorem, je $t = 12 \text{ h} = 43200 \text{ s}$ a porovnáváme fotovoltaický panel, který ideálně



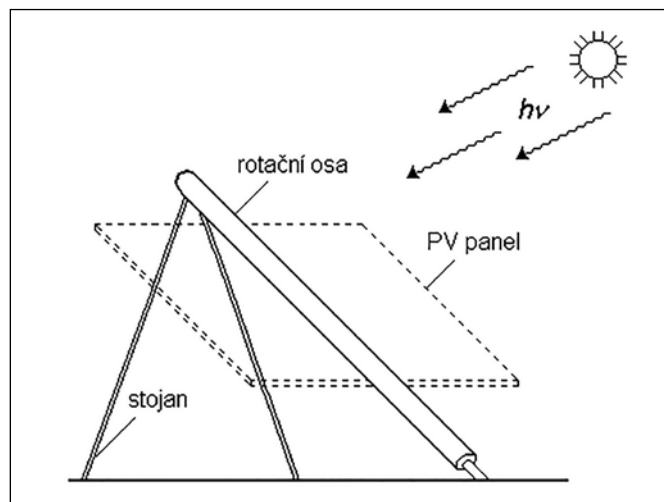
Obr. 1 Průmět plochy fotovoltaického panelu do roviny kolmé ke směru záření

sleduje Slunce s panelem pevným, který je orientován kolmo ke směru dopadajícího záření pouze v pravé poledne. Plochu panelu označíme S_0 .

a) Potom pro pevný panel průmět této plochy do směru kolmého ke směru záření je $S = S_0 \cos \varphi$ (viz obr. 1), přičemž φ je úhel dopadu a během dne se mění v intervalu $\varphi \in \langle -\pi/2, \pi/2 \rangle$. Pro úhlovou rychlost pohybu Slunce po obloze platí $\omega = 2\pi/T = 7,27 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, kde T je perioda. Pro diferenciál dopadající energie platí $dW = IS dt$. Neuvažujeme-li vliv atmosféry, můžeme vypočítat energii, která dopadne na plochu fotovoltaického panelu $S_0 = 1 \text{ m}^2$ za 1 den

$$W = \int_{-21600 \text{ s}}^{21600 \text{ s}} IS_0 \cos(\omega t) dt = 8,41 \text{ kWh}.$$

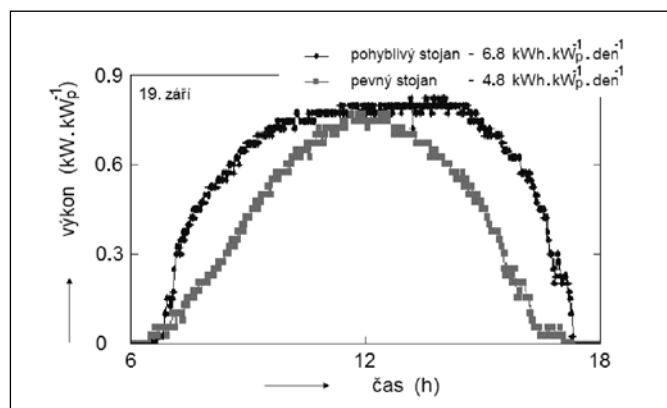
b) Pro pohyblivý fotovoltaický panel, který ideálně sleduje Slunce (viz obr. 2, rovnodennost, sklon rotační osy odpovídá zeměpisné šířce), můžeme vypočítat energii, která dopadne na plochu $S_0 = 1 \text{ m}^2$ za 1 den, pokud opět neuvažujeme vliv atmosféry $W = IS_0 t = 13,2 \text{ kWh}$.



Obr. 2 Fotovoltaický systém s pohyblivým stojanem

Navýšení dopadající energie (po vynásobení účinností i vyrobené energie) bez uvážení vlivu atmosféry tedy činí 57 %. Například na povrchu Měsíce bychom takového navýšení pravděpodobně dosáhli. V pozemských podmínkách musíme počítat s tím, že po východu a před západem svítí Slunce přes silnou vrstvu atmosféry, tedy intenzita záření dopadajícího na plochu orientovanou kolmo ke směru záření je mnohem menší než v poledne. Slunce však může

svítit ve vyšších zeměpisných šířkách i déle než 12 h denně. Rovněž musíme uvážit složky difúzního cirkumsolárního záření a difúzního izotropního záření. Na povrchu Země tedy navýšení množství vyrobené energie může krátkodobě během několika dnů činit až 40 %, což jsme i experimentálně naměřili (viz *obr. 3*). Odpoledne obvykle bývá nižší vlhkost atmosféry, tedy i nižší absorpce blízkého infračerveného záření, které je nejvýznamnější pro fotovoltaickou přeměnu energie ve fotovoltaických panelech na bázi krystalického křemíku. Proto odpoledne bývá více vyrobené elektrické energie než dopoledne, což je na našem měření rovněž vidět. Z hlediska celoročního provozu pochopitelně musíme počítat s tím, že zejména ve střední Evropě zdaleka nejsou všechny dny slunečné.



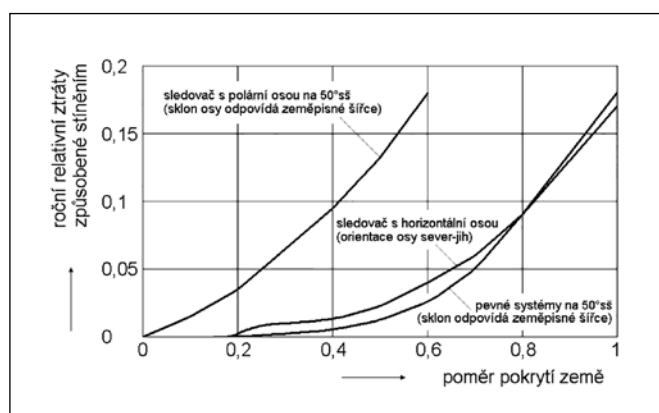
Obr. 3 Závislost okamžitého výkonu na čase během slunečného dne blízko rovnodennosti



Obr. 4 Fotovoltaická elektrárna s pohyblivými stojany typu TRAXLE v Číně



Obr. 5 Fotovoltaická elektrárna s pevnými stojany fotovoltaických panelů na střeše Technické fakulty ČZU v Praze



Obr. 6 Závislost ročních relativních ztrát způsobených stíněním na poměru pokrytí země ve střední Evropě

Sledovače Slunce pracují na různých principech a jejich přehled jsme podrobněji uvedli v knize [5]. Námi vyvinuté sledovače typu TRAXLE byly instalovány v řadě fotovoltaických elektráren. Na *obr. 4* je příklad jejich instalace v elektrárně v Číně. Na *obr. 5* je instalace s pevným stojanem fotovoltaických panelů na našem pracovišti na střeše Technické fakulty ČZU v Praze.

Pohyblivé stojany se sledovači Slunce s polární osou umožňují roční navýšení vyrobené elektrické energie až 35 % v oblastech s vysokým počtem slunečných dnů. Ve vyšších zeměpisných šířkách ale sklon rotační osy způsobí, že jednotlivé stojany si navzájem stíní a je třeba je umístit dále od sebe, jak je vidět na *obr. 4*. Tím se snižuje využití plochy fotovoltaické elektrárny. Výše zmíněné výrazné snížení ceny fotovoltaických panelů v posledních deseti letech proto vedlo k tomu, že hlavně ve střední Evropě investoři raději instalovali větší počet fotovoltaických panelů na pevných stojanech a více tak využili plochu elektrárny, protože plocha pozemku je drahá hlavně v rozvinutých zemích. Význam pohyblivých stojanů se sledovači Slunce se tak na čas snížil, ale nezankl. Naopak v současné době prožívají pohyblivé stojany renesanci. Roste jejich význam pro instalace malých fotovoltaických systémů nebo pro velké fotovoltaické elektrárny například v pouštích nebo málo zalidněných oblastech, kde je cena pozemku nízká a počet slunečných dnů vysoký. Efekt stínění je téměř eliminován v případě vodorovné instalace rotační osy. Na *obr. 6* je pro porovnání graf závislosti ročních relativních ztrát způsobených stíněním na poměru pokrytí země fotovoltaickými panely ve střední Evropě pro polární a vodorovnou osu [6]. Instalace s vodorovnou rotační osou je neefektivnější v tropických oblastech s nízkou zeměpisnou šířkou, kde umožňuje roční navýšení vyrobené elektrické energie až 35 %. Ve střední Evropě tato konstrukce umožňuje roční navýšení vyrobené elektrické energie cca 10 %, což už je pro investory



Obr. 7 Fotovoltaická elektrárna v Chile s automatickými pohyblivými stojany, rotační osy orientované vodorovně ve směru sever-jih



Obr. 8 Fotovoltaická elektrárna v České republice s automatickými pohyblivými stojany, rotační osy orientované vodorovně ve směru sever-jih

zajímavé. Příkladem takové instalace je na obr. 7 fotovoltaická elektrárna v Chile na 31° jižní šířky, kde je vysoký počet slunečných dnů v roce a roční navýšení vyrobené elektrické energie činí cca 30 %. Rotační osy jsou orientované vodorovně ve směru sever-jih.

V současné době probíhá nový solární boom hlavně ve střední Evropě v souvislosti se zvyšováním cen energií. Malé fotovoltaické

systémy se instalují hlavně na střechy či fasády obytných domů a tam jsou vhodné konstrukce s pevnými fotovoltaickými panely. Ale na volných prostranstvích nebo na vodorovných střechách se dají použít pohyblivé stojany fotovoltaických panelů s vodorovnou rotační osou. Na obr. 8 je taková instalace v České republice, kde navýšení vyrobené elektrické energie činí cca 10 %.

Literatura

- [1] V. Poulek, M. Libra, Zařízení pro orientaci kolektorů solární energie, *Jemná mechanika a optika*, 1997, 42(11–12), 354–357.
- [2] V. Poulek, M. Libra, Nový, levný, pohyblivý, hřebenový koncentrátor záření, *Jemná mechanika a optika*, 1999, 44(9), 282–283.
- [3] M. Libra, V. Poulek, Ekonomické porovnání pevného a pohyblivého stojanu kolektorů solární energie, *Jemná mechanika a optika*, 2001, 46(9), 297–299.
- [4] V. Poulek, M. Libra, A. Khudysh, Nový sledovač Slunce se zvýšenou přesností pro automatické, pohyblivé, fotovoltaické systémy, *Jemná mechanika a optika*, 2016, 61(10), 262–264.
- [5] M. Libra, V. Poulek, Fotovoltaika, teorie i praxe využití solární energie. Kniha-monografie v češtině, ILSA, Praha, 2010, 165 stran, ISBN 978-80-904311-5-7.
- [6] J.M. Gordon, a kol. Central-station solar photovoltaic systems: Field layout, tracker and array geometry sensitivity studies. *Solar Energy*, 1991, 46(4), 211–217.

prof. Ing. Vladislav Poulek, CSc., Ing. Martin Pelikán, Ph.D., prof. Ing. Martin Libra, CSc., prof. Dr. Ing. Eloy Fernández Cusimamani, Česká zemědělská univerzita v Praze, Kamýcká 129, 16500, Praha 6 – Suchbátka
Ing. Václav Beránek, Ph.D., Solarmonitoring, s.r.o., U Zátíší 545/3, 147 00 Praha 4 – Hodkovičky

Jedná se o odborný článek

Dokončení článku ze str. 215

Zajímavé je, že se v celém světě zavedlo pojmenovávat Galileia Galileiho či Galileia zkráceně jeho (křestním) jménem Galileo a ne jeho příjmením Galilei! Domníval jsem se, že je to jenom u nás, jako např. s přídomkem „de“ u Tychona Braha, ale teď jsem si to ověřil i v knize, z které čerpal původní autor.

Již v titulku této recenze bylo napsáno, že obálka a grafická úprava jsou převzaty z originálu. Domnívám se, že je tím míněno, že všechny obrázky byly převzaty. Texty v obrázcích byly samozřejmě přeloženy do češtiny. Mně se tento způsob elektronické povahy obrázků pro takovou literaturu líbí. Abstrahuje z obrázků ty nejcharakterističtější vlastnosti a pomíjí detaily. A to má pro dětskou literaturu jistě co do sebe!

Vcelku hodnotím tento vklad do dětské populárně naučné literatury velmi kladně a doporučuji rodičům obdarovat své potomky touto knížkou.

Teď ještě mi dovoluji ztratit několik slov o knížce, kterou jsem si půjčil společně s recenzovaným dílem. Je to ta kniha, o které autor textu prohlásil, že byla jeho inspirací: **Eyes on the Sky: A Spectrum of Telescopes** od **Sira Francise Grahama-Smitha**. Kniha vyšla v nakladatelství OXFORD University Press v r. 2016 pod ISBN 978-0-19-873427-7. V NTK má signaturu A 54849 a byla pořízena v r. 2019. Má běžné rozměry a 235 stran (ekologický nahnědlý hrubý papír). Řekl bych, že je to typická populárně naučná literatura i podle tisku: větší font, velké mezery mezi řádky, černobílé obrázky, dva krát čtyři vložené lesklé listy s barevnými atraktivními fotografiemi. Je tam v závěru souhrn poznámek v jednotlivých kapitolách uvedených jako horní index za slovy. Zřejmě mělo jít o poznámky

pod čarou na spodu stránek, ale tiskaři si ulehčili úlohu. Jde spíše o seznam odborných článků. Kromě toho následuje na jedné stránce seznam doporučených knih k dalšímu čtení. Kniha je velmi vhodná pro procvičování se v angličtině u studentů příslušných oborů.

Spolu s těmito dvěma knihami jsem si však vypůjčil ještě třetí, která mě přitahovala na první pohled. Má totiž stejné rozměry jako ta kniha pro děti, ale každé její otevření na libovolné stránce je pastvou pro oči. Jsou tam překrásné barevné fotografie jak různých konstrukcí dalekohledů, tak fotografií oblohy. Jde o dílo **EYES ON THE SKIES** (parafráze titulu inspirativní knihy) s podnadpisem **400 Years of Telescopic Discovery** (400 let objevu teleskopu) evropských autorů **Goverta Schillinga** a **Larse Lindberga Christensena**, které vyšlo, jak už je z podnadpisu zřejmé, ke čtyřstému výročí prvního použití dalekohledu pro astronomické zkoumání. Knihu vydalo nakladatelství WILEY-VCH v r. ©2009. V NTK má signaturu B 15320. Obsahem jsou vlastně fotografie s popiskami, a je tam také průběžný text, který se týká sedmi kapitol: Nové pohledy na oblohu, Větší je lepší, Technologie na pomoc, Od stříbra ke křemíku, Vidění neviditelného, Za Zemí, Co dál? Je třeba uvést, že popisky obrázků jsou tištěny nějakým velmi malým písmem, a zvláště na barevných podkladech stránek, kterých je většina, vyžadují dobré světelné podmínky, aby se to vůbec dalo číst. Navíc, celá kniha je vytištěna bezpatkovým písmem Ariel, které je obecně hůře čitelné než patkové písmo, jakým je např. Times New Roman. Nicméně přes všechny mé výtky knihu doporučuji zainteresovaným osobám pro potěšení se z dokonalých barevných fotografií.

Miroslav Miler

Doc. RNDr. Miroslav Miler, DrSc., Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v. v. i., Chaberská 57, 182 51 Praha 8 – Kobylisy, e-mail: miler@ufe.cz

Hydrofobní ochrana geopolymérů a pískovce

Výzkum se zabývá testováním různých komerčně dostupných nátěrů a jejich schopností hydrofobizovat povrch. Vzorky geopolymérů a pískovce byly v této studii nejdříve upraveny vybranými nátěry a následně byla měřena smáčivost povrchu pomocí kapkové metody. Nátěry, které prokázaly adekvátní schopnost hydrofobizovat povrch geopolymérů a pískovce, byly poté testovány pomocí lineárně vratného tribologického testu a analýzy na konfokálním mikroskopu pro hodnocení koeficientu tření a otěruvzdornosti. Některé nátěry, především ty na bázi siloxanů či epoxidové pryskyřice, dokážou hydrofobizovat povrch geopolymérů a pískovce a zároveň zvýšit jejich otěruvzdornost. Tyto nátěry budou využity při dalším výzkumu.

Klíčová slova: geopolimer, pískovec, hydrofobizace, povrchové úpravy, koeficient tření, otěruvzdornost

1. ÚVOD

Geopolymery jsou anorganické polymery vyráběné z různých prekurzorových materiálů, včetně metakaolinu [1], odletového popílku [2] nebo granulované vysokopecní strusky [3]. Tyto materiály se obvykle skládají z oxidu křemičitého, oxidu hlinitého a dalších oxidů. Geopolymery vznikají polykondenzací prekurzorů v silně zásaditém prostředí, dosaženém pomocí alkalických aktivátorů, obvykle vodných roztoků hydroxidů a oxidů alkalických kovů. Při reakci vzniká zeolitická (mikroporézní) struktura, podobná přírodním zeolitům [4]. Ve srovnání s materiály na bázi portlandského cementu mají geopolymery vyšší pevnost v tlaku [5], odolnost proti vysokým teplotám [6] či chemickým látkám a nižší tepelnou vodivost [7]. Při výrobě geopolymérů je spotřebováno méně energie než pro výrobu portlandského cementu. Nicméně jsou geopolymerní materiály dražší a pro vytvoření vyžadují žíravý aktivátor, zatímco portlandský cement stačí smíchat s vodou.

Oba typy materiálů jsou obvykle využívány pro výrobu kompozitů s využitím rozličných plniv (písku, šamotu či kameniva, vláken) [8], která zvyšují jejich pevnost v tahu a za ohybu [9]. Jakožto vyztuž lze u geopolymérů i cementu použít vlákna uhlíková [10], čedičová [11], různých polymerů [12] a dalších látek. Kompozity lze ještě vyztužit pomocí organických látek, včetně konopí [13] či lnu [14]. Vzhledem k zásaditosti geopolymérů, materiál využitý pro vyztužení musí být odolný vůči alkalickému prostředí, proto nelze používat běžné sklo či lehké kovy [4].

Geopolymery a materiály na bázi portlandského cementu jsou náchylné k mikrobiální degradaci, především ve vlhkém prostředí. V suchém prostředí je chráněny jejich zásaditostí. Mnohem náchylnější k degradaci jsou v případě využití v silně znečištěném či kontaminovaném prostředí, například v nádržích na odpadní vody či v kanalizačních systémech. V případě dlouhodobé vlhkosti může být jejich povrch kolonizován síru oxidujícími bakteriemi (např. *Acidithiobacillus thiooxidans*). Tyto bakterie produkují biogenní kyselé látky, včetně sulfanu či kyseliny sírové, které snižují pH povrchu a umožňují jeho kolonizaci dalšími mikroorganismy, včetně dalších bakterií, řas, hub, lišejníků apod. Tento proces může vést k chemickému či mechanickému poškození povrchu [15]. Geopolymerní materiály a portlandský cement mohou být například částečně přeměněny na síran vápenatý, který je rozpustný ve vodě a může tedy být odplaven [16].

Jeden ze způsobů, jak mikrobiální degradaci zabránit, je hydrofobní povrchová úprava, formou hydrofobních nátěrů. Výzkum je zaměřen na volbu vhodných nátěrů pro modifikace povrchu, například pomocí antimikrobiálních nanočástic, mikročástic či jiných látek. Konkrétně byly otestovány penetrační nátěry (využívané pro

předúpravu povrchů před nanesením dalších vrstev nátěru či pro hydrofobizaci) určené pro beton. Důvodem je zachování vzhledu povrchu upravovaného materiálu. Dále byly otestovány epoxidové pryskyřice, neboť některé studie prokázaly jejich účinnost při ochraně geopolymérů proti mikrobiální degradaci. Funkčnost epoxidových pryskyřic byla otestována i na povrchu pískovce pro zjištění, zda jsou vhodné pro ochranu historických pískovcových struktur, budov, soch apod.

Cílem výzkumu je prozkoumat, porovnat a zhodnotit účinek různých úprav na výsledné vlastnosti povrchu sledovaných materiálů (geopolimer a pískovec), za účelem snížení smáčivosti povrchu a zvýšení jeho otěruvzdornosti, čímž lze prodloužit životnost zkoumaných materiálů.

2. MATERIÁLY A METODY

2.1 Materiály

Pro účely tohoto výzkumu byly připraveny vzorky geopolymérů a pískovce. Pískovec byl nakoupen v hobbymarketu (Bauhaus Liberec) a nařezán do požadovaných rozměrů (zhruba 10 mm × 10 mm × 20 mm). Geopolymerní vzorky byly připraveny na Katedře materiálů, Technické univerzitě v Liberci. Kromě metakaolinového geopolymerního pojiva (Mefisto L05 vyráběného v Českých lupkových závodech) a alkalického aktivátoru na bázi oxidu draselného a hydroxidu draselného, obsahovaly geopolymerní vzorky také křemičitý písek, siliku (nanočástice oxidu křemičitého) a uhlíková vlákna. Písek se běžně využívá jako výplň a spolu se silikou zlepšuje mechanické vlastnosti a chemickou odolnost. Uhlíková vlákna zvyšují pevnost v tlaku a ohybu, která je u geopolymérů bez plniv (i portlandského cementu) velmi nízká. Složení geopolymerních vzorků je specifikováno v tab. 1. Použité materiály jsou vypsány v hmotnostním poměru vzhledem ke geopolymernímu pojivu.

Tab. 1 Složení geopolymérů

Materiál	Hmotnostní poměr
Geopolymerní pojivo	100
Aktivátor	90
Písek	100
Silika	8
Uhlíková vlákna	1

2.2 Nátěry

Pro úpravu povrchu geopolymery a pískovce bylo použito několik komerčně dostupných produktů, včetně penetračních/hydrofobizačních nátěrů, barev, laků a epoxidových pryskyřic. Všechny produkty, vyjma epoxidových pryskyřic, jsou výrobcem určeny pro použití na beton či jiné minerální materiály. Při úpravě povrchu geopolymery byly nátěry použity v souladu s technickými listy. Pokud bylo vyžadováno naředění, byl použit nejnižší doporučený poměr. Popisy výrobků jsou specifikované v *tab. 2* (penetrační nátěry), *tab. 3* (laky a barvy) a *tab. 4* (epoxidové pryskyřice). Výrobky jsou popsány obchodním názvem a obecným popisem jejich složení uvedeného v technických listech. Penetrační nátěry jsou založené na siloxanech či styren-akrylátovém kopolymery, zatímco většina barev a laků je založena na epoxidové pryskyřici. Penetrační a hydrofobizační nátěry jsou v jedné tabulce, neboť se obecně dají používat pro oba účely.

Tab. 2 Penetrační a hydrofobizační nátěry

Nátěr	Složení
Stoprim micro	Koncentrovaná vodou ředitelná emulze siloxanů (ředění 1:4)
Lukofob klasik	Siloxanová pryskyřice ve směsi organických rozpouštědel
Repesil Aqua	Vodní emulze siloxanů
Fortesil hydrofobizant	Vodní emulze siloxanů
Repesil BKH	Siloxanový polymer v lakovém benzínu
Hlubková penetrace nano	Styren-akrylátová kopolymerní disperze s nanočásticemi ve vodě
PENECO	Styren-akrylátová kopolymerní disperze ve vodě
PENECO K	Koncentrovaná verze PENECO (ředění 1:4)
Fortesil penetrace S	Styren-akrylátový kopolymer ve vodě (ředění 1:2)
Fortesil hlubková penetrace	Styren-akrylátová kopolymerní nanodisperze ve vodě
Penesil	Styren-akrylátový kopolymer s příměsí siloxanů ve vodě

Tab. 3 Barvy a laky

Nátěr	Složení
Sinepox S 2636	Dvojsložková epoxidová základní barva s protikoročním pigmentem
ECOLOR BKH	Akrylátová barva
Gorepox G	Dvojsložkový epoxidový nátěr
Izolak	Dvojsložkový epoxidový nátěr

Tab. 4 Epoxidové pryskyřice

Nátěr	Složení
CHS Epoxy 324	Vysokoviskózní epoxidová pryskyřice
CHS Epoxy 474	Nízkoviskózní epoxidová pryskyřice používaná pro impregnaci či penetraci povrchů a jako pojivo
CHS Epoxy 531	Nízkoviskózní epoxidová pryskyřice používaná pro impregnaci povrchů či přípravu kompozitů s cementem

2.3 Metody

Pro zjištění smáčivosti povrchů vzorků (efektivita hydrofobizace nátěrů) byl proveden test pomocí kapkové metody na přístroji Surface energy evaluation system, který se používá pro měření kontaktního úhlu kapky na povrchu vzorku. Při hodnocení smáčivosti povrchu byla použita deionizovaná voda o objemu kapky 4 μ l. Na povrchu všech vzorků probíhalo měření v rozmezí 5 minut s intervaly mezi měřeními o délce 1 minuty. Rychlost vsakování vody pak byla aproximována jako změna kontaktního úhlu za čas. Za hydrofobní je považován povrch s minimální změnou kontaktního úhlu kapky během 5 minut (k změně úhlu může dojít i v důsledku odpařování vody). Provedené testy určují schopnost nátěrů zajistit hydrofobitu povrchu geopolymery a pískovce (kontaktní úhel vyšší než 90°) s minimálními změnami v čase. U obou sledovaných materiálů byl měřen kontaktní úhel na povrchu řezu. Povrch geopolymery může mít velice různorodé vlastnosti (dané například formou použitou při přípravě), zatímco materiál v řezu je většinou silně hydrofilní a voda se do něj vsakuje v řádu jednotek sekund, kvůli zeolitické (mikroporézní) struktuře geopolymery [4].

Penetrační nátěry a laky se používají ke zpevnění povrchu a ochraně proti opotřebení. Proto v rámci výzkumu byla také otestována odolnost modifikovaných povrchů proti opotřebení, pomocí lineárně vratného tribologického testu na přístroji od firmy Anton Paar. Principem zkoušky je vtlačování pevně uchyceného tělíska (kuličky z materiálu Si_3N_4), s definovaným zatížením (10 N) do zkušební vzorku (povrch materiálů). Na povrchu každého vzorku bylo provedeno 833 lineárně vratných cyklů na pracovní délce 12 mm s rychlostí 26 mm/s. Změřena byla průměrná hodnota koeficientu tření a jeho směrodatná odchylka. Opotřebení povrchu vzorků bylo následně měřeno na konfokálním mikroskopu S Neox 3D Sensofar.

3. VÝSLEDKY A DISKuze

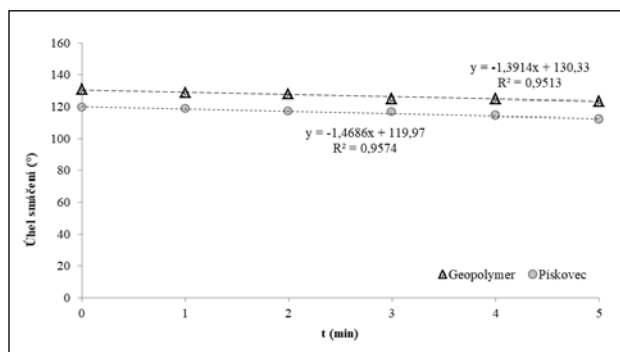
3.1 Testy hydrofobity

V první fázi výzkumu byly otestovány všechny nátěry pro zjištění, zda jsou schopny zajistit požadovanou hydrofobitu povrchu geopolymery a pískovce. Konkrétní barvy, laky a epoxidové pryskyřice dokázaly zabránit vsakování vody do povrchu. Pouze některé penetrační nátěry zajistily velmi dobrou hydrofobitu povrchu. Některé ze zkoumaných nátěrů nedokázaly zabránit vsakování vody na povrchu vzorků. Vybrané nátěry a jejich výsledky jsou zobrazeny v *grafech 1–4*.

Neupravený povrch řezu geopolymery nasakuje vodu v řádu jednotek sekund, zatímco počáteční povrchový úhel na neupraveném pískovci byl pouze 17° a po jedné minutě byl již nezměřitelný. Naměřené hodnoty byly použity jako referenční.

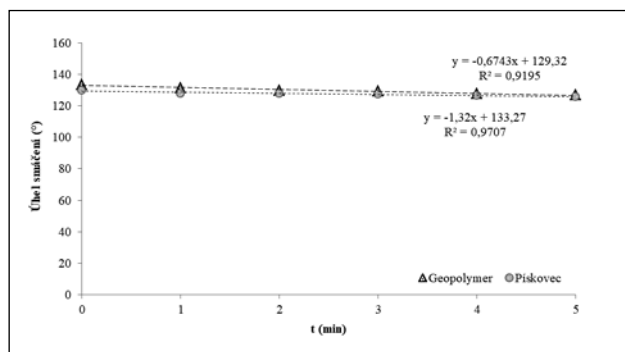
3.1.1 Penetrační a hydrofobizační nátěry

• *Stoprim micro* – siloxanový nátěr hydrofobizoval povrch geopolymery i pískovce, přičemž počáteční povrchový úhel dosáhl u geopolymerního vzorku 130,5° a po 5 minutách se snížil na 123,6°, zatímco u pískovce povrchový úhel dosáhl 119,5° a po 5 minutách se snížil na 111,9°. Změny povrchových úhlů při použití nátěru Stoprim micro jsou zobrazeny v grafu 1.



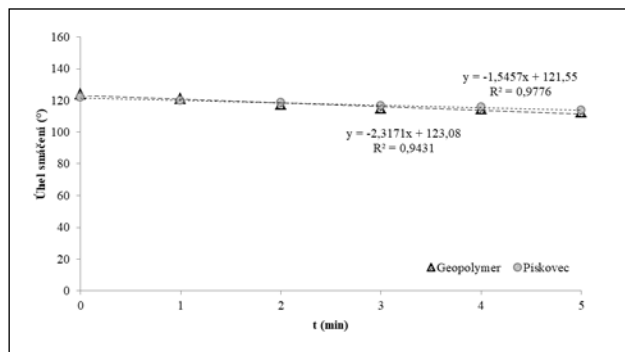
Graf 1 Smáčivost povrchu – nátěr Stoprim micro

- *Lukofob klasik* – pozitivní výsledek byl dosažen použitím siloxanového nátěru, přičemž počáteční povrchový úhel dosáhl u geopolymerního vzorku 133,8° a po 5 minutách se snížil na 127°, zatímco u pískovce povrchový úhel dosáhl 129,8° a po 5 minutách se snížil na 126°. Změny povrchových úhlů, při použití nátěru *Lukofob klasik* jsou zobrazeny v grafu 2.



Graf 2 Smáčivost povrchu – nátěr Lukofob klasik

- *Repesil AQUA* – další pozitivní výsledek prokázal i tento siloxanový nátěr, přičemž počáteční povrchový úhel dosáhl u geopolymerního vzorku 124,2° a po 5 minutách se snížil na 112,4°, zatímco u pískovce povrchový úhel dosáhl 121,9° a po 5 minutách se snížil na 113,9°. Změny povrchových úhlů, při použití nátěru *Repesil AQUA* jsou zobrazeny v grafu 3.



Graf 3 Smáčivost povrchu – nátěr Repesil AQUA

Kromě těchto tří nátěrů dokázaly zabránit vsakování vody do povrchu vzorků i některé další penetrační a hydrofobizační nátěry, byť s nižším povrchovým úhlem (< 90°). Konkrétně Peneco NANO, Fortesil hloubková penetrace a Penesil. Ostatní použité nátěry nezabránilly vodě ve vsakování do povrchu geopolymerního. Všechny nátěry, které hydrofobizovaly povrch, jsou založeny na



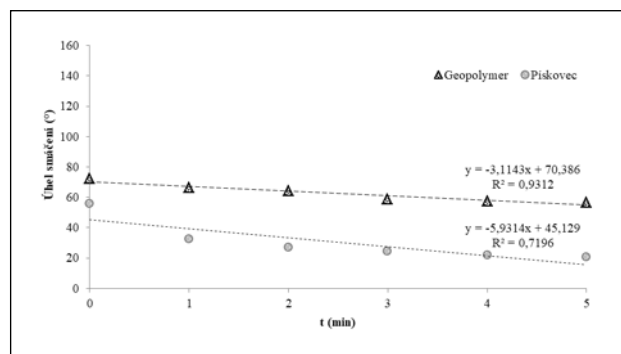
Obr. 1 Geopolymer a pískovec natřené nátěrem Lukofob klasik

siloxanech. Jejich výrazný hydrofobizační účinek je pravděpodobně způsoben lepší schopností se navázat do struktury materiálů, neboť geopolymery a pískovec také obsahují křemík.

Nátěry s komerčními názvy Stoprim Micro, Lukofob Klasik a Repesil Aqua byly vybrány pro další testy povrchových vlastností. Významnou vlastností nátěrů je, že nemění vzhled geopolymerního ani pískovce. Proto jsou vhodné pro použití v případech, kdy je vhodné zachovat „přírodní“ vzhled, například při ochraně historických budov. Vzhled geopolymerního a pískovce upravených pomocí penetračního nátěru je zobrazen v obr. 1.

3.1.2 Epoxidové pryskyřice

Přestože všechny testované epoxidové pryskyřice zabránily vsakování vody do povrchu vzorků, žádná z nich nezajistila úplnou hydrofobitu povrchu. Nejlepšího výsledku bylo dosaženo pomocí CHS Epoxy 531 (nizkoviskózní epoxidová pryskyřice používaná pro impregnaci povrchů či přípravu kompozitů s cementem), u které dosáhl počáteční povrchový úhel na geopolymerního hodnoty 72,1° a po pěti minutách klesl na 56,8°, zatímco u pískovce dosáhl počáteční povrchový úhel hodnoty 55,7° a po pěti minutách se snížil na 20,8°. Změny kontaktního úhlu při použití nátěru *CHS Epoxy 531* jsou zobrazeny v grafu 4.



Graf 4 Smáčivost povrchu – nátěr CHS Epoxy 531

Epoxidové pryskyřice výrazně mění vzhled povrchu geopolymerního i pískovce (obr. 2), které po aplikaci mají viditelnou krustu a „mokrý“ vzhled, nicméně jejich povrch je pak hladší. Z těchto důvodů jsou epoxidové pryskyřice nevhodné pro použití v případech, kdy je potřeba zachovat původní vzhled materiálu. Fotografie vzorků geopolymerního a pískovce po nanesení epoxidovou pryskyřicí je vidět na obr. 2.

Cena za nátěr 1 m² epoxidovou pryskyřicí je navíc výrazně vyšší než u jiných výrobků, včetně penetračních nátěrů a laků. Cena za natření 1 m² čistou epoxidovou pryskyřicí je přibližně 41 EUR, zatímco nátěr 1 m² pomocí přípravku Repesil AQUA je přibližně 1,5 EUR. Tyto hodnoty byly vypočítány na základě ceny



Obr. 2 Geopolymer a pískovec natřené CHS Epoxy 531

za největší dostupné balení v ceníku firmy Stachema (od které byly oba výrobky pořízeny) a doporučeného množství na úpravu 1 m² specifikovaného v technických listech [17–19].

3.1.3 Laky a nátěry

Otestované laky a nátěry zabránily vsakování vody do povrchu geopolymeru i pískovce, nicméně žádný z nich nezajistil povrchu úplnou hydrofobitu (kontaktní úhel > 90°). Nejlepšího výsledku dosáhl výrobek Sinepox S 2636, se kterým byl počáteční povrchový úhel na geopolymeru 88,3° a 79,5° na pískovci. Barvy i laky výrazně mění vzhled povrchů a jsou tedy nevhodné pro použití, při kterých je důležité zachovat původní vzhled materiálu. Cena laků a nátěrů za 1 m² je srovnatelná s cenou při použití penetračních a hydrofobizačních nátěrů. Vzorky upravené pomocí dvou vybraných laků (Sinepox S 2636 a Ecolor BKH) jsou zobrazeny na obr. 3.



Obr. 3 Geopolymer a pískovec natřený přípravky Sinepox S 2636 (a) a Ecolor BKH (b)

1.2. Tribologické testování

V další fázi výzkumu bylo vybráno několik druhů hydrofobizačních siloxanových nátěrů (Stoprim Micro, Lukofob Klasik a Repesil Aqua) podle výsledků testů hydrofobizace povrchu geopolymeru a pískovce. Spolu s nimi byla vybrána i CHS Epoxy 531, která dosáhla nejlepších výsledků z otestovaných epoxidových pryskyřic. Vzorky upravené vybranými nátěry byly následně otestovány lineárně vratným tribologickým testem, pomocí kterého byly změřeny hodnoty koeficientu tření. Následně byla pomocí konfokálního mikroskopu měřena míra opotřebení povrchu.

Otestované penetrační a hydrofobizační nátěry měly pouze minimální vliv na koeficient tření (graf 5). Pouze Repesil Aqua mírně snížil koeficient tření, byť je výsledek stále v rozsahu směrodatné odchylky, jak ukazuje graf 5. Ostatní testované penetrační/hydrofobizační nátěry koeficient tření na geopolymerních vzorcích mírně zvyšovaly. Na druhou stranu mírně snižovaly koeficient tření na pískovcových vzorcích, byť opět zanedbatelně. Hodnoty koeficientů tření a směrodatné odchylky jsou vypsány v tab. 5. Následně hodnocení konfokálním mikroskopem monitoruje, zda na povrchu dochází ke zvýšení odolnosti proti opotřebení.

Tab. 5 Koeficient tření vzorků upravených penetračními/hydrofobizačními nátěry

Nátěr	Koeficient tření [-], geopolymer	Koeficient tření [-], pískovec
Bez nátěru	0,62 ± 0,02	0,73 ± 0,04
Stoprim Micro	0,64 ± 0,02	0,72 ± 0,04
Lukofob Klasik	0,71 ± 0,03	0,71 ± 0,03
Repesil Aqua	0,62 ± 0,03	0,65 ± 0,04

Epoxidová pryskyřice CHS Epoxy 531 výrazně snížila koeficient tření u geopolymeru. Tribologický test nezanechal na povrchu geopolymerního vzorku žádnou viditelnou stopu poškození.

Epoxidová pryskyřice může sloužit jako ochrana proti opotřebení povrchu. Na povrchu pískovcového vzorku se stopa po tribologickém testu objevila, což naznačuje, že tato vrstva nebyla zcela jednolitá, o čemž svědčí i vysoká hodnota směrodatné odchylky a vyšší koeficient tření. Hodnoty koeficientu tření a směrodatné odchylky jsou vypsány v tab. 6.

Tab. 6 Koeficient tření vzorků upravených pomocí CHS Epoxy 531

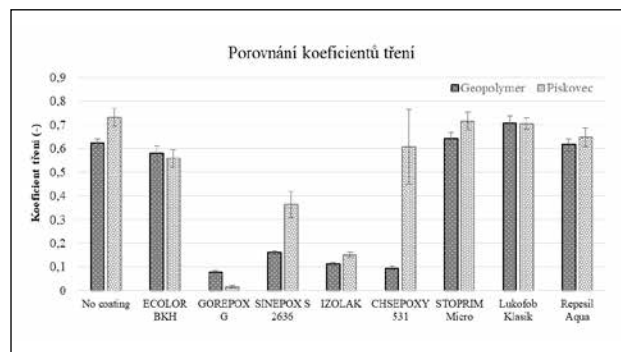
Nátěr	Koeficient tření [-], geopolymeru	Koeficient tření [-], pískovce
Bez nátěru	0,62 ± 0,02	0,73 ± 0,04
CHS Epoxy 531	0,09 ± 0,01	0,61 ± 0,16

Otestované laky a barvy snížily naměřenou hodnotu koeficientu tření. Nejhorších výsledků bylo dosaženo pomocí akrylátové barvy ECOLOR BKH, která jako jediná není založena na epoxidové pryskyřici. Ostatní tři laky výrazně snížily koeficient tření ve srovnání s neupravenými vzorky geopolymeru a pískovce. Hodnoty koeficientu tření a směrodatné odchylky jsou vypsány v tab. 7.

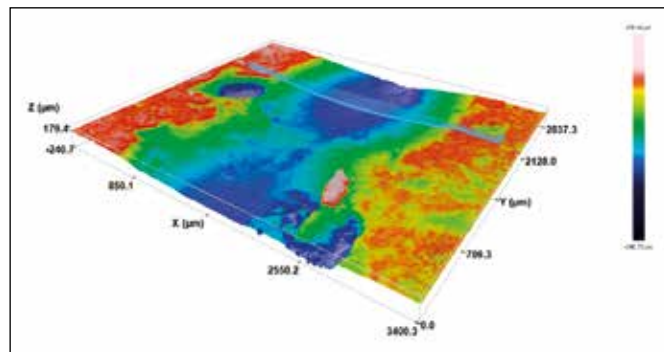
Tab. 7 Koeficient tření vzorků upravených pomocí laků a barev

Nátěr	Koeficient tření [-], geopolymer	Koeficient tření [-], pískovec
Bez nátěru	0,62 ± 0,02	0,73 ± 0,04
Ecolor BKH	0,58 ± 0,06	0,56 ± 0,04
Gorepox G	0,08 ± 0,01	0,02 ± 0,01
Sinepox	0,16 ± 0,01	0,36 ± 0,06
Izolak	0,11 ± 0,01	0,15 ± 0,01

Naměřené hodnoty koeficientu tření a směrodatných odchylek jsou zobrazeny v grafu 5.



Graf 5 Porovnání koeficientů tření



Obr. 4 Snímek opotřebení povrchu neupraveného geopolymeru

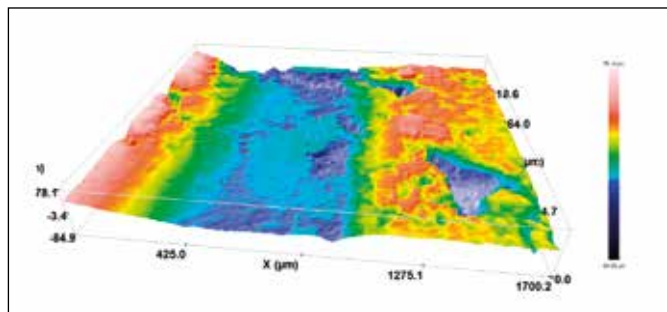
3.3 Analýza na konfokálním mikroskopu

Po tribologickém testu na povrchu vzorku či vrstvě nátěru většinou zůstaly viditelné rýhy. Hodnocení otěruvzdornosti povrchu upravených vzorků bylo provedeno na konfokálním mikroskopu. Byla měřena především hloubka těchto rýh. Snímek neupraveného geopolymery je na obr. 4.

Při použití penetračních/hydrofobizačních nátěrů byl zjištěn zpevňující efekt na povrchu pískovce. Tribologické stopy na neupraveném povrchu vzorku byly mnohem hlubší než ty na vzorcích upravených pomocí Repesil Aqua a Stoprim micro (ze 108 μm na 42 μm a 46 μm). Na rozdíl od těchto dvou nátěrů byla tribologická stopa na vzorku upraveném pomocí přípravku Lukofob Klasik velice heterogenní a její rozměry se výrazně lišily. Tento jev může být způsoben nehomogenní strukturou tohoto přírodního materiálu nebo organickými rozpouštědly, ze kterých je Lukofob klasik vyroben. Výrobek není vhodný pro zvýšení otěruvzdornosti pískovce, lze jej ale použít pro zajištění hydrofobity povrchu, protože z testovaných penetračních/hydrofobizačních nátěrů dosáhl nejlepšího výsledku. Možným vysvětlením je, že nedokáže dostatečně proniknout do struktury materiálu a vytváří silnější vrstvu siloxanů na jeho povrchu.

Hodnocení efektu penetračních/hydrofobizačních nátěrů na geopolymerních vzorcích také ukázalo jisté zpevnění jejich struktury. Zatímco nátěry Stoprim micro a Repesil Aqua snížily hloubku tribologické stopy jen mírně (ze 192 μm na 156 μm a 173 μm), Lukofob klasik snížil hloubku tribologické stopy na 31 μm . Výsledek svědčí o tom, že jsou organická rozpouštědla nevhodná pro zpevnění struktury pískovce, fungují ale dobře na povrchu geopolymery. Povrch geopolymery natřeného přípravkem Lukofob Klasik je zobrazen na obr. 5.

Mnoho otestovaných penetračních a hydrofobizačních nátěrů dokáže zajistit hydrofobitu povrchu geopolymery i pískovce. Nejlepších výsledků dosahují přípravky na bázi siloxanů (ve vodě či organických rozpouštědlech), pravděpodobně díky tomu, že struktura geopolymery (polysialáty) a pískovce (složeného primárně z křemičitého písku a živců) je též založena na křemíku. Tyto nátěry dokázaly s různorodým účinkem zpevnit povrch geopolymery i pískovce.

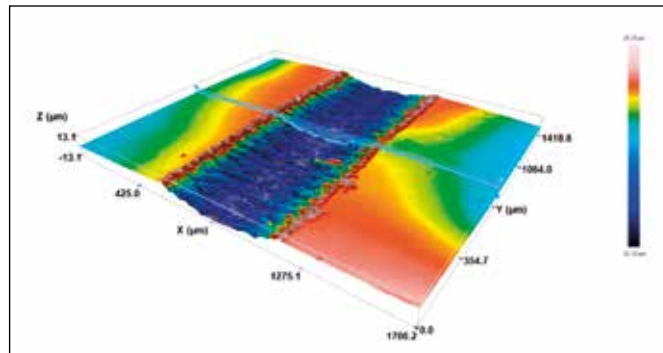


Obr. 5 Snímek opotřebení povrchu geopolymery natřeného přípravkem Lukofob klasik

Při analýze pískovce pokrytého pryskyřicí CHS Epoxy 531 byla na povrchu viditelná tribologická stopa, nicméně na geopolymerním povrchu nebylo zaznamenáno žádné poškození po tribologickém testu, což opět potvrzuje vysokou odolnost epoxidové pryskyřice proti opotřebení. Rozdíl ve výsledcích na povrchu geopolymery a pískovce je pravděpodobně způsoben nehomogenním povrchem pískovcového řezu (pískovec je tvořen zmy).

Všechny otestované laky a nátěry (především na geopolymery) dosáhly lepších výsledků než neupravený povrch. Nejhoršího výsledku dosáhla barva Ecolor BKH, u které byla změřena hloubka tribologické stopy 53 μm . Tribologické stopy na vzorcích upravených pomocí přípravků Sinepox a Izolak byly 22 μm a 13 μm hluboké. U přípravku Gorepox nebylo poškození povrchu měřitelné, byl na povrchu viditelné mírné opotřebení. Vzhledem k tomu, že

epoxidový lak Gorepox G nejvíce snížil hodnoty koeficientu tření, je možné konstatovat, že z testovaných nátěrů je tento nátěr nejlepší volba pro povrchovou ochranu geopolymery i pískovce. Příklad geopolymerního povrchu upraveného pomocí epoxidového laku je zobrazen na obr. 6.



Obr. 6 Snímek opotřebení povrchu geopolymery upraveného přípravkem Izolak

4. ZÁVĚR

Byly zkoumány tři druhy nátěrů (penetrační/hydrofobizační nátěry, epoxidové pryskyřice a laky/barvy) jakožto možnost pro zlepšení povrchových vlastností geopolymery a pískovce. Smáčivost modifikovaných povrchů byla změřena pomocí kapkové metody, zatímco opotřebení povrchu a změny koeficientu tření byly měřeny pomocí lineárního vratného tribologického testu a analýzy na konfokálním mikroskopu. Mnoho testovaných nátěrů dokázalo zajistit hydrofobitu povrchů geopolymery i pískovce. Nejlepších výsledků dosáhly siloxanové nátěry (ve vodě či organických rozpouštědlech), pravděpodobně díky křemičité struktuře geopolymery (polysialáty) i pískovce (primárně křemičitý písek a živce). Nátěry také povrch do jisté míry zpevňovaly, ale výrazně nesnižovaly koeficient tření.

Otestované epoxidové pryskyřice se ukázaly jako velice odolné nátěry, které brání vsakování vody do povrchu, výrazně snižují koeficient tření a brání opotřebení povrchu. Je potřeba počítat s tím, že jsou mnohem dražší než jiné nátěry, a navíc mění vzhled materiálu. Otestované laky a nátěry také dokázaly zajistit hydrofobitu povrchu, byť ne tak účinně jako siloxanové hydrofobizační nátěry. Snížení koeficientu tření a zvýšení odolnosti proti opotřebení zajistily především epoxidové nátěry.

Další studie budou zaměřeny na zajištění antimikrobiálního efektu nátěrů, které se ukázaly jako efektivní pro povrchovou úpravu geopolymery a pískovce, a to jak penetračních/hydrofobizačních nátěrů, tak barev a laků. Antimikrobiálního efektu lze dosáhnout příměsí antimikrobiálně působících kovů (stříbra, mědi apod.) ve formě nanočástic nebo mikročástic. Mikročástice mohou být vhodnější pro hustší laky a barvy, které je mohou lépe udržet ve stavu suspenze a zabránit jejich rychlé sedimentaci. Bude otestována i předúprava povrchů pomocí atmosférického plazmatu jako možný způsob zlepšení adheze mezi povrchem a nátěrem.

Zvláštní poděkování

Tato práce byla podpořena Studentskou grantovou soutěží Technické univerzity v Liberci v rámci projektu č. SGS-2022-5066.

Reference

- [1] MEFISTO L05, Available online: <https://www.cluz.cz/en/mefisto-l05> (accessed on 1.3.2022)
- [2] Ferenc Kristály, Roland Szabó, Ferenc Máda, Ákos Debreczeni, Gábor Mucsi. Lightweight composite from fly ash geopolymer and glass foam. Journal of Sustainable Cement-Based Materials 2020, 10, 1–22

- [3] Quyen V. Trinh, Gábor Mucsi, Thai V. Dang, Ly P. Le, Van H. Bui, Sándor Nagy. The influence of process conditions on ground coal slag and blast furnace slag based geopolymers properties. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik* 2020, 35, 15–20
- [4] Vojtěch Růžek. Effect of combustion product addition and plasma treatment on surface properties of geopolymers. Diploma thesis, Technical university of Liberec, 2020
- [5] Rihards Gailitis, Kinga Korniejenko, Andina Sprince, Leonids Pakrastins. Comparison of the long-term properties of foamed concrete and geopolymer concrete in compression. 3rd National conference on current and emerging process technologies – Concept 2020 2020, 2239, 020012
- [6] Van Su Le, Petr Louda, Huu Nam Tran, Phu Dong Nguyen, Totka Bakalova, Katarzyna Ewa Buczkowska, Iva Dufkova. Study on Temperature-Dependent Properties and Fire Resistance of Metakaolin-Based Geopolymer Foams. *Polymers* 2020, 12, 2994. <https://doi.org/10.3390/polym12122994>
- [7] Karol Prałat, Justyna Ciernicka, Artur Koper, Katarzyna Ewa Buczkowska, Piotr Łoś, Comparison of the Thermal Properties of Geopolymer and Modified Gypsum. *Polymers* 2021, 13, 1220. <https://doi.org/10.3390/polym13081220>
- [8] Kinga Korniejenko, Michał Łach, (2020). Geopolymers reinforced by short and long fibres – innovative materials for additive manufacturing. *Current Opinion in Chemical Engineering*. 28. 167-172. 10.1016/j.coche.2020.06.005
- [9] Kinga Korniejenko, Michał Łach, Shih-Yu Chou, Wei-Ting Lin, An Cheng, Maria Hebdowska-Krupa, Szymon Gądek, Janusz Mikula. Mechanical Properties of Short Fiber-Reinforced Geopolymers Made by Casted and 3D Printing Methods: A Comparative Study. *Materials* 2020, 13, 579. <https://doi.org/10.3390/ma13030579>
- [10] Rihards Gailitis, Jnis Sliseris, Kinga Korniejenko, Janusz Mikula, Michał Łach, Leonids Pakrastins, Andina Sprince. (2020). Long-Term Deformation Properties of a Carbon-Fiber-Reinforced Alkali-Activated Cement Composite. *Mechanics of Composite Materials*. 56. 10.1007/s11029-020-09862-w.
- [11] Hiep Le Chi; Petr Louda; Su Le Van; Lukas Volesky; Vladimir Kovacic; Totka Bakalova. Composite Performance Evaluation of Basalt Textile-Reinforced Geopolymer Mortar. *Fibers* 2019, 7, 63. <https://doi.org/10.3390/fib7070063>
- [12] Barbara Kozub, Patrycja Bazan, Dariusz Mierzwiński, Kinga Korniejenko. Fly-Ash-Based Geopolymers Reinforced by Melamine Fibers. *Materials* 2021, 14, 400. <https://doi.org/10.3390/ma14020400>
- [13] Eyerusalem A.Taye, Judith A. Roether, Dirk W. Schubert, Daniel T. Redda, Aldo R. Boccaccini. Hemp Fiber Reinforced Red Mud/Fly Ash Geopolymer Composite Materials: Effect of Fiber Content on Mechanical Strength. *Materials* 2021, 14, 511. <https://doi.org/10.3390/ma14030511>
- [14] Patrycja Bazan, Barbara Kozub, Kinga Korniejenko, Rihards Gailitis, Andina Sprince. Tribo-Mechanical Behavior of Geopolymer Composites with Wasted Flax Fibers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2021, 1190, 012030. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1190/1/012030>
- [15] Shiping Wei, Zhenglong Jiang, Hao Liu, Dongsheng Zhou, Mauricio Sanchez-Silva. Microbiologically induced deterioration of concrete--a review. *Braz J Microbiol.* 2014;44(4):1001-1007. Published 2014 Mar 10. doi:10.1590/S1517-83822014005000006
- [16] Ali Allahverdi, František Škvára. (2005). Sulfuric acid attack on hardened paste of geopolymer cements Part 1. Mechanism of corrosion at relatively high concentrations. *Ceramics - Silikaty*. 49. 225-229.
- [17] Stachema – product list [online]. [cit. 2021-6-23]. Available at: <https://www.stachema.cz/files/files/CENIK-ZAKLADNI.pdf>
- [18] Repesil Aqua technical sheet [online]. [cit. 2021-7-25]. Available at: <https://www.stachema.cz/files/files/TL-REPE-SIL-AQUA.pdf>
- [19] CHS EPOXY-531 [online]. [cit. 2021-6-23]. Available at: <https://www.stachema.cz/produkty/epoxidove-pryskyrice:c254/chs-epoxy-531-epoxy-110-bg-15:p799.htm>

Ing. Vojtěch Růžek (vojtech.ruzek@tul.cz), Ing. Totka Bakalova, Ph.D. (totka.bakalova@tul.cz), Ing. Martina Ryvolová (martina.ryvolova@tul.cz), Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra materiálů, Studentská 2, 461 17 Liberec

Jedná se o odborný článek

Ing. Jiří Kršek – jubileum 90 let

Ing. Jiří Kršek, dlouholetý pracovník Ústavu přístrojové techniky AV ČR v Brně, se dožívá významného životního jubilea. Jiří se narodil 17. listopadu v Brně v době, kdy tento den ještě nebyl spojován s historickými událostmi naší vlasti. Po ukončení povinné školní docházky navázal na rodinné řemeslo a v roce 1950 se vyučil optikem a mechanikem. Svou odbornost dále prohloubil na průmyslové škole jemné mechaniky a optiky v Přerově, po jejím absolvování v roce 1952 dostal umístěnku do n.p. Chronotechna Šternberk, ale krátce poté byl přeložen do její brněnské pobočky, kde pracoval jako mechanik-nástrojař, vstupní kontrolor a kontrolor v nářadovně. V Brně pokračoval ve studiích na vyšší průmyslové škole strojní pro pracující a po jejím zakončení maturitou byl v roce 1954 doporučen vedením podniku k vysokoškolskému studiu na strojní fakultě ČVUT v Praze. Po čtyřech ročnících základního studia se specializoval na jemnou mechaniku a optiku a v roce 1959 úspěšně ukončil studium. V prosinci 1959 nastoupil do nově založeného Ústavu přístrojové techniky ČSAV v Brně (ÚPT) do skupiny Ing. Františka Petrů. Této skupině i ÚPT zůstal věrný i v následujících letech. Bohužel čas člověk nezastaví. Své aktivní působení v ÚPT ukončil v roce 2019, avšak i nadále zůstává v telefonickém kontaktu se svými bývalými spolupracovníky.

V ÚPT se postupně věnoval konstrukci optomechanických částí infračervených spektrofotometrů, optických zařízení pro měření odraznosti a propustnosti dielektrických zrcadel a byl členem týmu, který v Československu úspěšně zrealizoval první He-Ne laser (16. 10. 1963). V následujících letech se na pozici vedoucího optické skupiny oddělení kvantových generátorů světla věnoval optickým rezonátorům, transformační optice laserových svazků a laserové interferometrii. Díky svému praktickému zaměření intenzivně spolupracoval s vývojovým oddělením s.p. Metra Blansko, kde byly výsledky výzkumu uplatňovány v laserovém výrobním programu. Optické měřicí metody, na kterých se Jiří podílel, dosáhly světové úrovně a umožnily velmi přesné určení geometrických parametrů hranolové optiky.

V roce 1979 zahájil i svou pedagogickou dráhu, nejprve jako člen státní zkušební komise pro státní závěrečné zkoušky na strojní fakultě VUT v Brně, a v letech 1980–1981 vyučoval na zahraniční fakultě Vojenské akademie v Brně předměty zaměřené na infračervenou a laserovou techniku. Na doporučení autorit ÚPT předložil



v roce 1981 kandidátskou disertační práci „Optické soustavy laserových interferometrů a interferenční kontrola jejich stavebních prvků“. Práce byla oponenty pozitivně hodnocena, ale veřejná rozprava již nebyla realizována, patrně kvůli odchodu jeho syna do zahraničí. Krátké satisfakce se dočkal po roce 1989, kdy v ÚPT zastával pozice vědeckého tajemníka a vedoucího útvaru ředitele, byl členem Komory volených zástupců pracovišť ČSAV a v letech 1990–1991 členem Ústřední komise ČSAV pro nápravu křivd.

V důsledku restrukturalizace ČSAV v roce 1993 se stal zaměstnancem Ústavu fyzikálního inženýrství Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně (FSI VUT). Na VUT a později na Lékařské fakultě Masarykovy univerzity pokračoval ve svém pedagogickém působení. Studenty byl ceněn pro své dlouholeté praktické zkušenosti, které jim předával v laboratorních praktikách a předmětech zaměřených na technologii optické výroby, brýlovou optiku a optometrii. Vedl 18 diplomových prací, byl členem oborové rady postgraduálního studia pro obor Fyzikální a materiálové inženýrství na FSI VUT a pokračoval ve svém působení ve státních zkušebních komisích na VUT. Během své odborné dráhy je autorem téměř stovky odborných publikací a desítek autorských osvědčení a vynálezů.

Jiří je rovněž známý svou obětavou činností v československé optické komunitě. V období let 1987 až 2017 bez přerušení, působil v redakční radě časopisu Jemná mechanika a optika. V letech 1974–1988 zastával funkci tajemníka a později předsedy (1988–2007) ústřední odborné sekce jemné mechaniky a optiky Československé vědecko-technické společnosti, která soustřeďovala svou činnost na odborné vzdělávání v oborech aplikované optiky, infračervené radiometrie, jemné mechaniky, laserové měřicí techniky a optiky pro využití sluneční energie. Od roku 1993 působil 10 let v představenstvu společnosti Meopta-optika v Přerově.

Spolu s manželkou Alenou vychovali dceru a syna, v roli prarodičů „rozmazlovali“ dva vnuky a dvě vnučky a nyní se těší i z několika pravnuků.

Jiří, přejeme Ti pevné zdraví, neutuchající duševní svěžest a životní optimismus.

*prof. RNDr. Pavel Zemánek, Ph.D.
a spolupracovníci z ÚPT AV ČR*

‘Spooky’ quantum-entanglement experiments win physics Nobel (freely adapted from the article of D. Castelvecchi and E. Gibney) 207

Nobel Prize for experiments with quantum entanglement (A. Černoch, J. Soubusta) 208

Looking Up © Flying Eye Books 2021 (M. Miler) 215

Laser on aluminium feet (J. Heřmánek, P. Crha, K. Macúchová, H. Picmausová, M. Řeháková, L. Švandrlík, M. Thunová, T. Mocek) 216

This paper describes the use of aluminium profile systems in laboratory environment of HiLASE Centre. During the last few decades, utilization of aluminium profiles in structural design has been going through a period of rapid development, mostly due to their advantageous material properties and ease of use. Often, they present a welcome alternative to more technologically demanding solutions like welded constructions. Keeping in mind that despite their numerous advantages, these systems don't provide a universal answer to every design challenge, we strive to maximise their benefits and eliminate any subsequent drawbacks. In this article we present our approach to the use of modular aluminium profile systems, we compare their pros and cons with alternative solutions and demonstrate the extent to which these systems are employed in our laser laboratories.

Keywords: aluminium, aluminium profile, design system, beam distribution, LSP, modular system, laser, HiLASE

Properties of photovoltaic systems with automatic tracking stands (V. Poulek, M. Pelikán, M. Libra, V. Beránek, E. Fernández Cusimamani) 222

During the last 10 years, there has been a significant reduction in the price of photovoltaic panels. The importance of the photovoltaic systems with automatic tracking stands thus decreased for a time, but now it is growing again. Tracking stands with a horizontal axis are the most effective, as they minimize the mutual shielding effect of individual stands.

Hydrophobic protection of geopolymers and sandstone (V. Růžek, T. Bakalová, M. Ryvolová) 225

This paper deals with investigation of various commercially available coatings and their ability to hydrophobize the surface of geopolymers and sandstone. In this study, geopolymer and sandstone samples were coated with selected coatings and their wettability was measured by drop test. Coatings exhibiting adequate geopoly-

mer/sandstone hydrophobization capability were then tested using a linear reciprocating tribological test and confocal microscope analysis to determine their coefficients of friction and wear resistance compared to uncoated samples. Various coatings, usually based on siloxanes or epoxy resin, have been confirmed to be able to make the geopolymer/sandstone surface hydrophobic and increase its wear resistance. These will be used in further studies.

Keywords: geopolymer, sandstone, hydrophobic, surface treatment, coefficient of friction, abrasion resistance

Ing. Jiří Kršek – 90 years anniversary (P. Zemánek) 231

ANOTACE

Výpočet rozptylové funkce bodu pro optické soustavy s konečnou hodnotou numerické apertury použitím skalární difrakční teorie (A. Mikš, J. Novák, P. Novák) 210

Je popsána skalární difrakční teorie zobrazení pro výpočet rozptylové funkce bodu (PSF) optických soustav s vyšší numerickou aperturou. V práci jsou odvozeny přesné a aproximativní vztahy pro výpočet rozptylové funkce bodu pro fyzikálně dokonalou optickou soustavu s konečnou hodnotou numerické apertury. Odvozené vztahy v limitním případě numerické apertury blížící se nule přecházejí ve známý klasický vztah pro PSF uváděný v literatuře. Odvozený vztah je tak zobecněním klasického vztahu pro výpočet PSF pro případ vyšší numerické apertury s využitím skalární difrakční teorie optického zobrazení.

Klíčová slova: optické zobrazení, skalární teorie difrakce, rozptylová funkce bodu, numerická apertura

Katedra experimentální fyziky

Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci

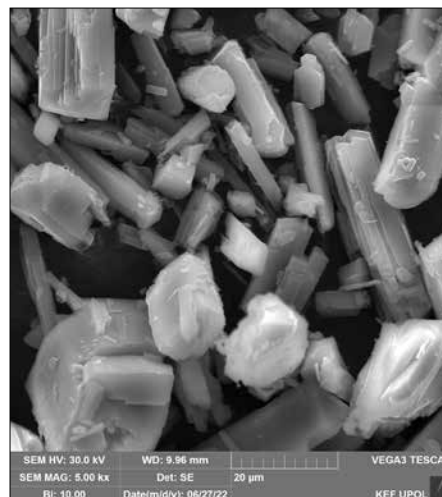
Fotografie ze skenovacího elektronového mikroskopu byly pořízeny studenty doktorského studijního programu Nanotechnologie (autoři fotografií Mgr. Vítězslav Heger, Mgr. Michal Kořenek, Mgr. Soňa Lísniková)



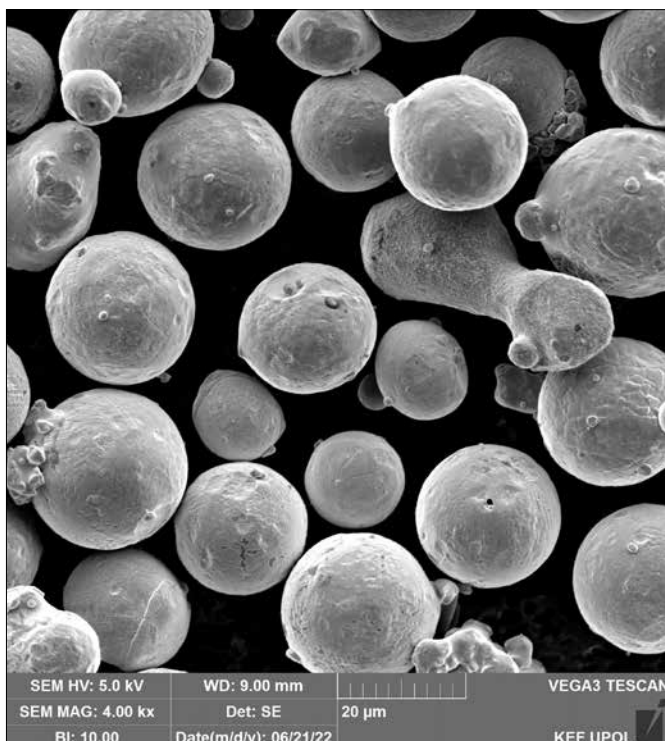
Zárodky nanovláken na ocelových mikrokuličkách pro 3D tisk



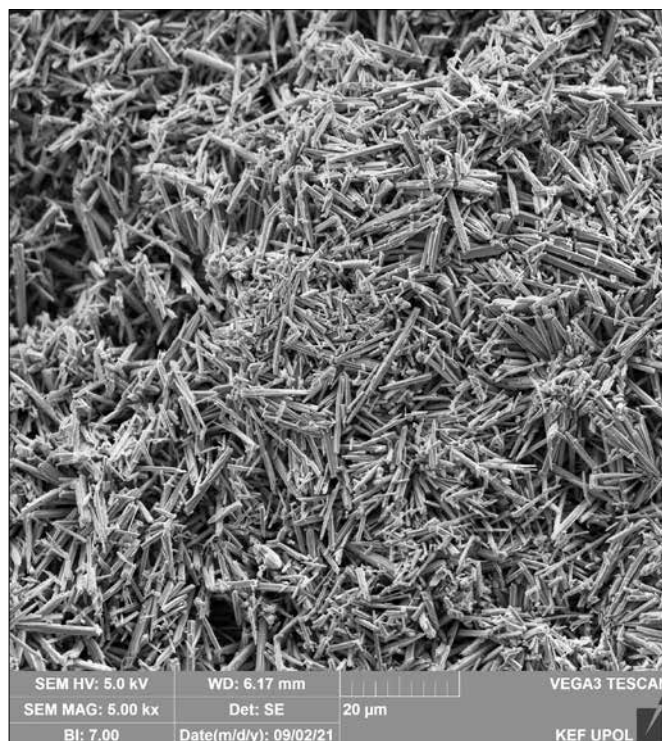
Uhlíkové „saze“ rostoucí na kovovém substrátu



Krystaly šťavelanu železnatého



Ocelové kuličky pro 3D tisk



Jehličkovité krystaly feritu

Katedra experimentální fyziky

Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci

Fotografie z výukových a vědeckých laboratoří (autorka Mgr. Pavla Šretrová)



Laboratoř aplikované fyziky – kryostat pro měření mössbauerovských spekter za nízkých teplot



Výuková laboratoř elektroniky, elektřiny a magnetismu



Výuková laboratoř molekulové fyziky



Laboratoř aplikované fyziky – rentgenovský difraktometr

Kontakt: doc. Mgr. Vít Procházka, Ph.D., vedoucí katedry,
adresa pracoviště: 17. listopadu 1192/12, 771 46 Olomouc, e-mail: v.prochazka@upol.cz, www: <http://kef.upol.cz>