

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
KATEDRA SKLÁŘSKÝCH STROJŮ A ROBOTIKY
TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
DEPARTMENT OF GLASS PRODUCING MACHINES AND ROBOTICS

ČESKÁ SKLÁŘSKÁ SPOLEČNOST
CZECH GLASS SOCIETY

SBORNÍK ABSTRAKTŮ
CONFERENCE PROCEEDINGS OF ABSTRACTS

XVI. MEZINÁRODNÍ KONFERENCE SKLÁŘSKÉ STROJE
16th INTERNATIONAL CONFERENCE ON GLASS PRODUCING MACHINES

A
AND

SEMINÁŘ KOVY VE SKLÁŘSKÝCH TECHNOLOGIÍCH
SEMINAR OF METALS IN GLASS PRODUCING TECHNOLOGIES

6. ZÁŘÍ 2023, LIBEREC, ČESKÁ REPUBLIKA
6th SEPTEMBER 2023, LIBEREC, CZECH REPUBLIC

EDITOR: MARIE STARÁ

© 2023

Vydavatelství ČSS, s.r.o., Sportovní 554, 468 41 Tanvald

ISBN 978-80-904044-5-8

Obsah (Content)

Sklářské stroje (Glass Producing Machines)

<i>Hotař Vlastimil, Kunc Štěpán, Nikendey Holubová Barbora, Máková Veronika, Stará Marie</i> <i>Technická univerzita v Liberci</i> Technologie 3D tisku ze skla	6
<i>Kasch Susane, Schmidt Thomas</i> <i>IFW Jena, Germany</i> Use of lasers in modern glass production	10
<i>Lesche Klaus, Bredl Tobias</i> <i>iPROTec, Germany</i> Laser filament cutting	14
<i>Weinberger Christoph</i> <i>Forma Glas, Austria</i> Achievable qualities in the blow-blow process and a efficiency increasing technology	17
<i>Altgott Michael</i> <i>Waltec, Germany</i> ESERVO-Technology - energy saving in glass production	19
<i>Hauschwitz Petr</i> <i>HiLASE, Praha</i> Laserové technologie pro moderní sklářský průmysl Laser technology for modern glass industry	20
<i>Polák Miroslav, Brada Jiří, Trochta Miroslav</i> <i>Glass Service, Vsetín</i> Numerical modelling of industrial glass furnaces	21
<i>Polák Jaroslav</i> <i>Polpur, Turnov</i> Experience in the utilization of 3-axes CNC Machines in Glass Processing	22
<i>Abdelkader Mohamed, Hotař Vlastimil</i> <i>Technická univerzita v Liberci</i> Directed energy deposition 3D glass printing (DED) for realizing customized optical sensors	24
<i>Burget Matěj, Vrábek Peter</i> <i>Rona, Slovakia</i> Optimalizácia životnosti oleja v zváracom stroji OCMI-SA48 Optimization of oil life in OCMI-SA48 welding machine	26

<i>Kehlerová Gabriela</i>	
<i>Technická univerzita v Liberci</i>	
Možnosti využití počítačové simulace procesu izotermického tvarování skleněných komponent	
Application possibilities of numerical simulation for isothermal shaping of glass products	 30
 <i>Šen Hugo</i>	
<i>Vetropack Moravia Glass, Kyjov</i>	
Nestacionární teplotní pole při tvarování baňky dvakrát foukacím způsobem výroby	
Non-stationary temperature field in double blow moulding process	
molding proces	 35
 <i>Příbrský Dušan</i>	
<i>Colt International, Praha</i>	
Odvod tepelné zátěže a chlazení průmyslových (sklářských) provozů	
Heat dissipation and cooling of industrial (glass) plants	 36
 <i>Jirman Pavel</i>	
<i>IKI, Liberec</i>	
Analýza spojování různých typů skel při tavení	
Analysis of fusion bonding of different types of glass	 37
 <i>Smrček Josef</i>	
<i>SVPD, Praha</i>	
Využití odpadního tepla při tavení a tvarování skla	
Utilisation of waste heat in glass melting and shaping	 39
 <i>Salač Petr</i>	
<i>Technická univerzita v Liberci</i>	
Variety konstrukce chladicí dutiny razníku při lisování velkých skleněných výrobků	
Design variants of the plunger cooling cavity in pressing of large glass products	 40
 Kovy ve sklářských technologiích (<i>Metals in Glass technologies</i>)	
<i>Macháček Jan, Horkavcová Diana, Hotař Adam, Hruška Branislav, Tesař Jiří</i>	
<i>VŠCHT, Praha; Technická univerzita v Liberci</i>	
Charakterizace skelných vrstev na kovech pomocí konfokální mikroskopie	
Characterization of glass layers on metals by confocal microscopy	 43
 <i>Šípál Petr, Hotař Adam, Pazourková Prokopčáková Petra, Hotař Vlastimil</i>	
<i>Technická univerzita v Liberci</i>	
Korozní chování aluminidů železa na bázi Fe-28Al-5Si-X v bezolovnaté sklovině Crystalin	
Corrosion behaviour of iron aluminides based on Fe-28Al-5Si-X	 44
 <i>Krafka Michal, Bakalova Totka, Svobodová Lucie, Daďourek Karel, Stránský Robert</i>	
<i>Technická univerzita v Liberci; SANS SOUCI, Praha</i>	
Využití oxidických vrstev jako ochrana povrchu skla proti poškození	
The use of oxide layers to protect the glass surface against damage	 51

Úvod

Z pověření výboru České sklářské společnosti zajistila Katedra sklářských strojů a robotiky společně s Katedrou materiálu Technické univerzity v Liberci odbornou garancí i organizačně v pořadí již XVI. Mezinárodní konferenci Sklářské stroje a seminář Kovy ve sklářských technologiích, přičemž tato tradiční konference je pořádána v tříletém intervalu.

Organizačnímu výboru se podařilo připravit toto reprezentativní setkání sklářských odborníků z oblasti výzkumu, vývoje a výroby sklářských strojů v konfrontaci s výrobcí skla – uživateli této techniky.

Předkládaný sborník obsahuje 18 příspěvků, přičemž obsah referátů zahrnuje všechny odborné okruhy vytýčené organizátory pro tuto konferenci. Referáty zpracované na vysoké odborné úrovni dávají možnost předpokládat, že problémy naznačené v referátech zaujmou a budou dobrým základem k odborné diskusi a otevřené výměně zkušeností v hlavním jednání i v kuloárech konference.

PŘÍPRAVNÝ VÝBOR KONFERENCE

Introduction

Being authorized by the committee of the Czech Glass Society the Department of Glass Producing Machines and Robotics together with the Department of Material Science of the Technical University of Liberec has provided the organisational and technical guarantee for the 16th International Conference on Glass Producing Machines and seminar Metals in Glass Technologies, during this traditional conference which has been already organised in three-year sequence.

Organisation committee succeeded in preparation of this prestigious meeting allowing a confrontation of specialists from the sphere of research, development and production of glass machines and glass producers – users of this technology.

The proceedings conclude 18 abstracts and their contents involve all specialised topics of the Conference. The papers are prepared on a high technical level and the presumption is that problems suggested in the lectures will lead to a wide-ranging discussion and open exchange of experience.

PREPARATORY COMMITTEE

Vlastimil Hotař, Štěpán Kunc, Barbora Nikendey Holubová, Veronika Máková, Marie Stará

Úvod

Aditivní výrobní technologie jsou často spojovány s moderními technologiemi a jsou nazývány technologiemi budoucnosti. Přesto, technologie výroby skleněných produktů pomocí přidávání materiálů je jedním z nejstarších principů. Nabalování a navíjení skla bylo využíváno již v Egyptě kolem roku 1500 před Kristem. Také nalepování dalšího skla při tvarování výrobku je typické nejen pro ruční výrobu [1].

Přesto, aditivní technologie je považován za novou techniku a to díky používaným materiálům, jako jsou plasty a především použitou automatizační technikou pro samotnou výrobu. Především tzv. 3D tisk je velmi zajímavou technologií, která umožňuje flexibilně vyrábět objekty, které by se nedaly jinou technologií vyrobit, nebo by to bylo velmi nákladné a náročné.

3D tisk je komerčně využíván od konce 80. let minulého století. Od té doby se velmi zdokonalil a rozšířil. Vzniklo mnoho technologií, které mají různé specifické výhody a nevýhody [2]. Podle normy ISO/ASTM 52900:2015(en) Additive manufacturing — General principles — Terminology [3]:

1. Materiálová extruze (material extrusion),
2. Fotopolymerizace (photopolymerization, SLA a DLP),
3. Fúze z práškového lože (powder bed fusion, SLS a SLM),
4. Tryskání materiálu (material jetting),
5. Tryskání pojiva (binder jetting),
6. Laminace plátů (sheet lamination, LOM),
7. Přímé energetické nanášení (directed energy deposition, DED).

Pozitivní je, že v každé skupině lze identifikovat minimálně jednu technologii, která je zkoušena pro adaptaci pro 3D tisk skleněných produktů. Výsledkem nebývá vždy transparentní sklo, ale přesto mají produkty zajímavé vlastnosti [4, 5, 6].

Další rozdělení je na přímé získání objektu ze skla (objekt je po procesu 3D tisku celý ve skelném stavu) a nepřímé získání objektu ze skla (z 3D tisku je získáno green body a následně je objekt převážně tepelně exponován pro následné získání materiálu objektu ve skelném stavu). Vedle těchto dvou procesů lze získat také kompozitní materiály, které obsahují materiály ve skelném stavu spolu s dalšími materiály, především plasty. Takovéto kompozitní objekty (green body) nejsou dále tepelně upravovány při vysokých teplotách.

Například princip mikrotavení je možné využít v technologiích přímého získání objektu ze skla. Princip „mikrotavení skla“ je založen na tavení malého množství vstupních surovin v oblasti desítek až stovek mikrometrů pomocí vysokoteplotního ohřevu (především vhodným laserem). Vstupními surovinami může být samotný sklotvorný oxid (nejčastěji je používán SiO_2), sklotvorný oxid s dalšími modifikujícími oxidy nebo již utavené sklo (například ve formě jemně mletého prášku nebo mikrovláken). Mikrotavení skla lze využít pro 3D tisk skla několika technologiemi.

V rámci výzkumu na Katedře sklářských strojů a robotiky na Technické univerzitě v Liberci jsou zkoumány dvě technologie: Přímého energetického nanášení (DED) a fúze z práškového lože (SLM).

DED – Direct energy deposition

Technologie přímého energetického nanášení (DED) vytváří součásti přímým natavením materiálů a jejich nanášením na výrobek vrstvu po vrstvě. Stroj sestává většinou z trysky a velmi silného zdroje tepelné energie. Základním rozdílem proti materiálové extruzi (např. FFF) je pohyblivost trysek, které se mohou pohybovat ve více směrech. Technologie DED disponuje pohybem až v pěti různých osách (pět stupňů volnosti) ve srovnání s pouze třemi u materiálové extruze. Dalším rozdílem je tavení nanášeného materiálu až přímo na tištěném objektu.

Na základě poznatků z prvotních testů je připravováno experimentální zařízení pro tento typ technologie. Dávkovací hlava bude umožňovat tisk ze dvou vláken (filamentů) modifikovaného složení. Testován bude mimo jiné tisk optických senzorů.

SLM – Selective Laser Melting

Na principu Powder bed fusion (fúze z práškového lože) je založeno několik technologií. Nejčastěji aplikovanou je Selective Laser Sintering (selektivní sintrování materiálu pomocí laseru, SLM) a Selective Laser Melting (selektivní tavení materiálu pomocí laseru, SLM). Tato technologie je založena na principu, kdy je na pracovní plochu nanесena tenká vrstva práškového materiálu. Paprsek se soustředí na jemný prášek, který se díky laseru taví a vzniká jedna z mnoha vrstev. Hotová vrstva se pokryje další vrstvou prášku a proces se opakuje.

Výsledky prvotních testů ovlivní vývoj experimentálního zařízení pro tuto technologii. Cílem je ověření možností tisku z velmi jemného prášku pod 30 μm a shluků nanočástic. Nutné bude také řešit vliv tvaru částic s jejich distribucí (kombinace větších a menších částic). Připravované experimentální zařízení by mělo přinést výsledky základního výzkumu pro další vývoj zařízení pro pokročilé testy.

Závěr

Významným poznatkem je relativně nízká energie potřebná k utavení mikroobjemů, což ale odpovídá potřebným teoretickým energiím. Mikrotavení se tak stává zajímavým konceptem pro 3D tisk ze skla, přípravu mikro a nanovláken.

3D tisk skla více rezonuje mediálním prostorem než je jeho praktické využití. Současný výzkum se jen pomalu překlápá z roviny základního do aplikovaného, a to jen v některých vybraných technologiích. Zásadním problémem 3D tisku skla jsou především rozdílné materiálové vlastnosti oproti plastům nebo kovům a také striktní požadavek na transparentci skla, který u jiných materiálů není požadován – není u nich vidět dovnitř.

Na Technické univerzitě v Liberci na Katedře sklářských strojů a robotiky byl v posledních letech etablován základní výzkum mikrotavení skla a 3D tisku skla. Byla navržena a zkonstruována dvě unikátní zařízení pro základní výzkum aditivních technologií ze skla. Jedná se o zařízení pracující s principem přímého energetického nanášení (zdroj skloviny jsou mikrovlákná) a selektivní tavení skleněného prášku pomocí laseru. V obou případech je používáno sklo na bázi SiO_2 a tavení pomocí CO_2 laseru. Nyní jsou zařízení zprovoznována. Cílem je získat výsledky základního výzkumu, které budou publikovány v prestižních mezinárodních časopisech. Získané znalosti budou následně použity pro návrh koncepce technologií, které by v budoucnu mohly být použity pro průmyslový 3D tisk ze skla.

Velmi důležitý je také přesah výzkumu vně Technické univerzity v Liberci. Na vývoji perspektivních technologií 3D tisku ze skla spolupracujeme s Ústavem fotoniky a elektroniky

AV ČR a s Ústavem skla a keramiky na VŠCHT Praha. Základní výzkum této problematiky tuto spolupráci nutně potřebuje.

Neméně důležitým aspektem tohoto základního výzkumu je také vznik „vedlejších produktů výzkumu“, jako je porézní skleněná plastelína (Porous Glass Plasticine), která vznikla z „nepovedeného“ experimentu.

Poděkování

Článek byl podpořen projektem s názvem „Research of micro-melting glass principles and properties of such obtained glasses“ v rámci vnitřní grantové soutěže PURE na Technické univerzitě v Liberci, PURE-30006. Tento projekt je financován institucionální podporou, z prostředků Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy.

Literatura

- [1] LE BOURHIS, Eric. 2014. Glass: mechanics and technology. 2nd ed. Weinheim: Wiley.
- [2] BARNATT, Christopher. 2013. 3D printing: the next industrial revolution. ExplainingTheFuture.com.
- [3] ISO. /ASTM 52900:2015(en) Additive manufacturing — General principles — Terminology. 2015. ISO.org. Accessed July 30, 2021. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en>
- [4] ZHANG, H, L HUANG, MY TAN, SQ ZHAO, H LIU, ZF LU, JH LI a ZZ LIANG. Overview of 3D-Printed Silica Glass. MICROMACHINES [online]. 2022, 13(1). ISSN 2072-666X. Dostupné z: doi:10.3390/mi13010081
- [5] HOTAŘ V., M. STARÁ, V. MÁKOVÁ, B. NIKENDEY HOLUBOVÁ. Present state of 3D printing from glass. Pure and Applied Chemistry. PURE AND APPLIED CHEMISTRY [online]. 2022, 94(2), 169–179. ISSN 0033-4545. Dostupné z: doi:10.1515/pac-2021-0707
- [6] ZHANG, D, XF LIU a JR QIU. 3D printing of glass by additive manufacturing techniques: a review. FRONTIERS OF OPTOELECTRONICS [online]. 2021, 14(3), 263–277. ISSN 2095-2759. Dostupné z: doi:10.1007/s12200-020-1009-z

Anotace

Zásadním problémem 3D tisku skla jsou především rozdílné materiálové vlastnosti oproti plastům nebo kovům a také striktní požadavek na transparentci skla, který u jiných materiálů není požadován. Na Technické univerzitě v Liberci na Katedře sklářských strojů a robotiky byl v posledních letech etablován základní výzkum mikrotavení skla a 3D tisku skla. Byla navržena a zkonstruována dvě unikátní zařízení pro základní výzkum aditivních technologií ze skla. Jedná se o zařízení pracující s principem přímého energetického nanášení (zdroj skloviny jsou mikrovlákná) a selektivní tavení skleněného prášku pomocí laseru. V obou případech je používáno sklo na bázi SiO₂ a tavení pomocí CO₂ laseru. Získané znalosti budou následně použity pro návrh koncepce technologií, které by v budoucnu mohly být použity pro průmyslový 3D tisk ze skla.

Summary

GLASS 3D PRINTING TECHNOLOGY

The main problem with 3D printing of glass is the different material properties compared to plastics or metals and the strict glass transparency requirement, which is not required for other materials. At the Technical University of Liberec, Department of Glass Producing Machines and Robotics, basic research on glass micro-melting and 3D glass printing has been established recently. Two unique facilities for basic research on additive technologies from glass have been designed and constructed. These devices work with the principle of direct energy deposition (the source of the glass is microfibers) and selective melting of glass powder using a laser. In both cases, SiO₂-based glass and CO₂ laser melting are used. The knowledge gained will then be used to design concept technologies that could be used for industrial 3D printing from glass in the future.

Use of lasers in modern glass production

Susanne Kasch and Thomas Schmidt

Introduction

The material glass is encountered in many areas of daily life. From bottles, drinking glasses and food packaging to solar thermal energy, window panes, furniture, lamps, mirrors, televisions, tablets, mobile phones and automotive, etc., this material is everywhere. The list could be extended. However, hardly anyone thinks about the fact that not all glass is the same and how glass becomes what we use almost every day. Many people are familiar with both cold and hot processing methods. This article is intended to provide an overview of the processing possibilities of glass using laser radiation, at which points the laser can replace conventional processing methods and which processes are only possible using laser radiation. Different wavelengths will be highlighted and the 3 main topics of cutting, joining and surface processing will be discussed.

Fundamentals

Laser beam sources are available with a wide variety of wavelengths, powers and pulse regimes. Of particular interest for glass processing is the CO₂ laser with its wavelength of 10.6μm, since it has a very high absorption on any glass, and the UKP laser with wavelengths around 1μm and shorter, which can be used for processing despite the transparency of the glass due to the nonlinear optical effects. This is achieved by pulse lengths in the pico- and femtosecond range, which can reach pulse peaks of up to several terrawatts. In addition to the laser beam source, a laser machine also consists of the beam guide to direct the laser beam to the processing location, the laser beam shaping to focus the laser beam or adapt it to the processing task, and a motion system to move either the laser beam or the component relative to each other.

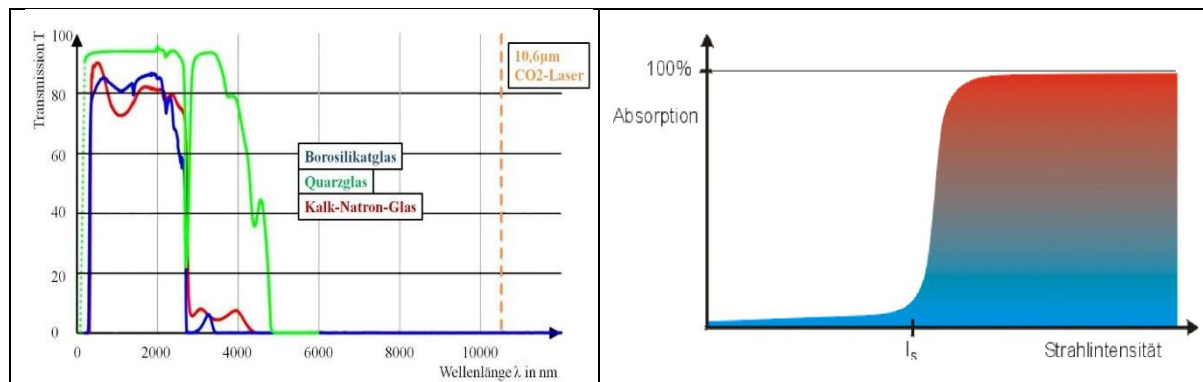


Fig. 1 Transmission of different glasses and nonlinear optical effects

The glasses most commonly applied industrially are fused silica, borosilicate glass and soda-lime glass. The decisive properties for laser processing are, in addition to the material thickness, the coefficient of thermal expansion, the thermal conductivity and the processing temperature, which differ considerably from each other.

Tab. 1 Important properties of different glasses

	Soda-Lime-Glas	Borosilikat-Glas	Quarzglas
Thermal expansion [10^{-6}K^{-1}]	9	3,3	0,5
Heat conductivity [$\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\text{m}^{-1}$]	0,9	1,2	1,38
Melting point [$^{\circ}\text{C}$] (working temperature)	1200	1250	1700 - 2000

Separating methodes

When cutting glass, a distinction must be made between cold and hot processes. The conventional cold processes include, for example, scribing and breaking, sawing or blasting. Melting can be counted among the hot processes. Cold as well as hot cutting is possible by means of laser radiation, whereby the type of glass plays a very important role.

UKP lasers are used to cut thin flat glasses, which preferably have a high coefficient of thermal expansion and may also be chemically toughened. During so-called filamentation, a stress line or contour is inscribed in the glass, at which the glass breaks either on its own or by subsequent local heating along the contour. Separation can also be ablative, with the laser beam working its way through from top to bottom. For thicker glasses, ablation can also be performed from bottom to top, resulting in no flank angle.

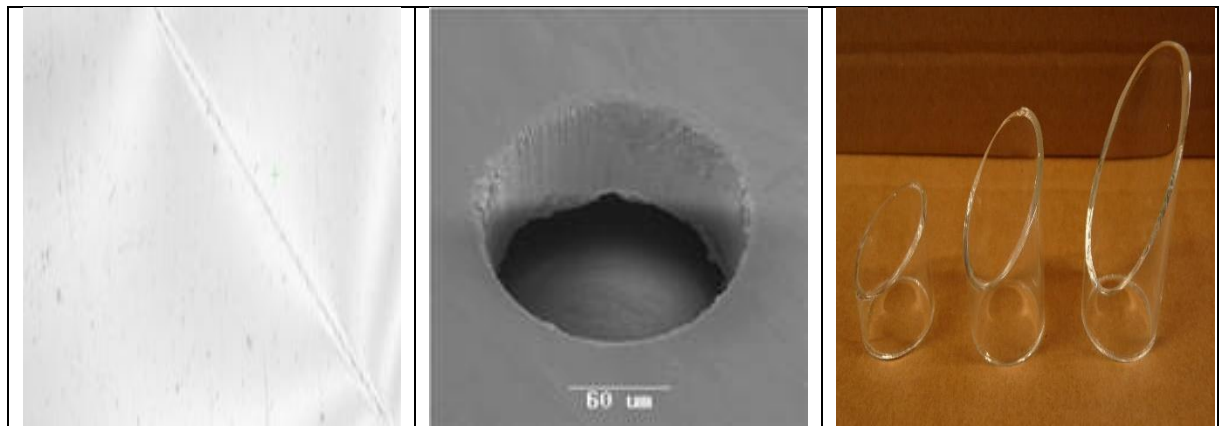


Fig. 2 Filament line, drilled hole and bevel cuts ($\varnothing 36$ mm), using TLS process

The TLS process is mainly used for straight cuts. Here, too, a high coefficient of expansion is advantageous. After the mechanical introduction of an initial crack at the edge of the plate, a CO_2 laser is used to heat the glass along a line starting from there, followed immediately by abrupt cooling by an aerosol. The controlled stresses thus generated in the glass lead to a crack that follows the CO_2 laser beam.

This process is closely related to the blasting of glass tubes. In this process, the pipe is provided with an initial crack on the outside, set in rotation and heated from the inside with a CO_2 laser. At the location of the crack, the tube is cleanly cut off. Using CNC technology, this principle is also used to produce bevel cuts and unwinds.

The desired edge of every glazier is the fire-polished C-grind. This can also be produced directly with the CO_2 laser during glass tube cutting. The rotating glass tube is softened at the point to be cut until it can be pulled apart. The remelted cutting edges are of a very high quality.

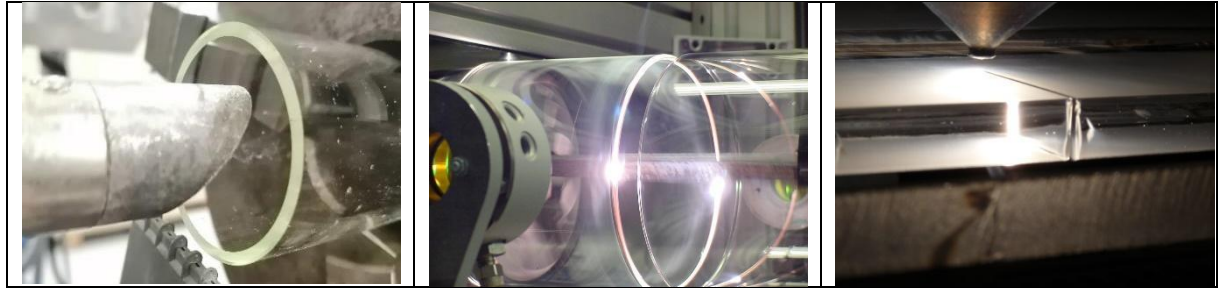


Fig. 3 Blow up B33 ($\varnothing 36$ mm), hot softening separation B33 ($\varnothing 150$ mm) and cutting of fused silica ($d=6$ mm)

Fire-polished edges are also produced when cutting quartz glass with the CO_2 laser. Since this is sublimation cutting, it can only be used for quartz glass, which is a single-component glass. On tube as well as plate material, this can be used up to a thickness of 8 mm.

For thicker glass, waterjet cutting can be used, regardless of the type of glass. The only limitations are a minimum inner diameter of approx. 150 mm for tubes and no pre-stressing of the glass.

Joining methodes

There are also cold and hot processes for joining. In principle, glass can also be glued, which is often out of the question due to factors such as aging resistance, temperature resistance, chemical resistance, transparency and impermeability, but can still be a quick and easy solution.

"Cold" processes include soldering, for example. The solder is usually matched to the thermal expansion coefficient of the glass, but can also bridge differences in thermal expansion if different types of glass are to be combined. The melting temperature of the solder is usually below the transformation temperature of the glass, which is why it can be referred to as a "cold" process.



Fig. 4 Laser soldering Al_2O_3 ($\varnothing 20$ mm), processing of measurement cylinder (500 ml) and glass-metal-bond ($\varnothing 120$ mm)

As a rule, however, both joining partners are brought into the melt during joining. For example, tubes can be fused together or flanged joints can be produced. It is also possible to form tubes and, to a certain extent, flat material. Glass-to-metal joints can also be realized with laser technology. In general, it can be said that every burner in the glass industry could be replaced by a CO_2 laser.

The joining of quartz glass is somewhat more specialized. With the usual heat conduction welding, this only works with this glass up to a thickness of approx. 2 mm. The poor heat conduction in combination with the high processing temperature require a different strategy for thicker material. Here, a so-called hybrid process is used. A focused CO_2 laser beam is used to melt both flanks of the abutting components. To ensure that the melt volume is sufficient

for a joint, the area around the weld seam is preheated with a gas burner or with a second laser beam, which increases the thermal conductivity.

Surface methods

As with cutting and joining, there are cold and hot processes. In general, all laser marking processes can be considered cold, since they are usually generated by short-pulsed laser radiation in the $<1\mu\text{m}$ range but also with CO_2 lasers. In this process, glass particles are removed from the surface, which leads to this marking effect in the overall image due to the changed surface properties.

The ablation of the glass particles can also be taken so far that desired surface topographies, such as lenses, free-forms, lens arrays, depressions, channels, etc., can be generated. There are even processes in which marking and also ablation can be performed in the glass volume itself, for example to create internal contours.



Fig. 5 Marking, ablating ($\varnothing 20\text{ mm}$) and laser polishing ($180\text{ mm} \times 150\text{ mm}$)

A very well established surface process is fire polishing, which again uses the CO_2 laser. The main advantage compared to polishing with the gas burner is the lack of flame pressure. Consequently, significantly better surface finishes up to $R_a < 10\text{nm}$ can be achieved. A defocussed laser beam melts the surface locally, which is smoothed by the surface tension of the melt. This is possible with all glass materials, although preheating is necessary to avoid cracks.

Conclusion and Summary

The laser is a universal tool that could find a wide range of applications in industrial glass production. It is suitable for cutting, joining as well as surface modification. The rather high initial costs and safety requirements on the part of laser protection are offset by a high degree of automation, high reproducibility, high productivity and reliability. In perspective, each gas burner can be replaced by a CO_2 laser beam. The short-pulsed solid-state lasers open up manufacturing processes that would not be feasible with conventional methods.

Laser Filament Cutting (LFC)

Lesche Klaus, Bredl Tobias

Introduction

The Laser Filament Cutting (LFC) system is a special technology developed by IPROTEC for removing the process-related moil from stemware and tumbler products. The main focus of this development was to eliminate the disadvantages of current cutting technologies. The LFC, which can be placed either in the cold or in the hot area of a production line, realizes an energy-efficient and clean separation process that also enables an incomparable quality of the separation surface. Grinding of the cutting surface is no longer necessary. As a result, this leads to advantages in terms of operating costs, environmental aspects and as well to the expected production yield. Today, the LFC is a proven technology and in use worldwide.

Conventional technologies for removing the moil

Conventional technologies for removing the moil of drinking glasses can be split into two different main groups:

- a) removal of the moil of ,hot glasses' before the annealing lehr*
- b) removal of the moil of ,cold glasses' after the annealing lehr*

Comments to a)...

For example, a CO₂-laser-machine or burn-off machine is used to remove the moil in the hot end.

Process steps of a CO₂-laser machine:

- preheating of the later parting line via burner*
- heating of the parting line via CO₂-Laser until the plastic range of the material is reached*
- ,pull-off' of the moil through an external force until the moil and the glass are separated*
- melting of the mouth rim with a flame in order to get the required contour (,rounding')*

Process steps of burn-off machine:

- heating at the later parting line, until the moil is falling down by its own weight.*
- melting of the mouth rim with a flame in order to get the required contour (,rounding')*

In both cases the thermal process leads to many significant disadvantages. The basic requirements to remove the moil as uniformly as possible in order to obtain an exactly molded parting plane are, on the one hand, the viscosity of the material and, on the other hand, a constant wall thickness distribution in the cutting area. A good quality and a minimum deviation of tolerances concerning the wall thickness distribution, as well as geometric tolerances (concentricity, ovality...), must be secured in the manufacturing process by the previous machines (blowing machine, press machine). However, the manufacturing processes often cannot consistently provide the required high product quality and accuracy. As consequence, this leads to much more breakage, lower quality and a reduced production yield.

By using the CO₂-Laser, for example, problems with the evaporation out of the glass often occur. The evaporation then leads to deposition of condensation on the surface of the glass. For this reason, the glasses in such machines are mostly handled with the moil on the top.

Another disadvantage is the grabbing of the moil for separating the glass. The grabbing of the moil can lead to little pieces of broken glass which fall into the bowl and which can lead to deficient products. Another essential disadvantage is the limitation of the attainable mouth rim quality. It is very challenging for this technology to create very fine and delicate mouth rim contours. The final result of this thermal process often is a thick and bulged mouth rim.

Comments to b)...

Process steps of cold-end crack-off:

- *‘scratching’ of the later parting line via CO₂-Laser or a mechanical process (scoring wheel)*
- *‘crack off’ of the moil via thermo-shock*
- *‘grinding’ the cutting surface*
- *washing and drying the glasses to remove the grinding residues*
- *melting of the sharp cutting edges in order to get the required mouth rim forming (‘rounding’)*

The main disadvantage of this technology in the cold end after moil removal is the required grinding of the surface. Since only grinding wheels are used, this process can be considered a purely mechanical process. In particular, grinding very large glasses with long stems and thin walls leads to increased breakage. In order to get clean glasses, a washing process to eliminate the residues after grinding is necessary. The utilization of abrasants and water, as well as the additional water treatment, lead to a significantly higher work load and hence to higher production costs.

Laser Filament Cutting (LFC) for removing the moil

The previously described disadvantages of the conventional process technologies can be eliminated / avoided with the new IPROTEC machine “LFC” for cutting off the moil of transparent stemware or tumbler products.

The major advantage of the new LFC-Technology is the contactless cutting process to remove the moil. Because the used cutting method is a ‘cold’ and contactless process, neither mechanical nor thermal stress is influencing the glass material. Generally, the LFC is working with a special laser technology. During the laser process, thousands of small holes (diameter of one hole $\approx <2\ \mu\text{m}$), called filaments, are placed as a circumferential perforation at regular intervals at the height of the later rim.

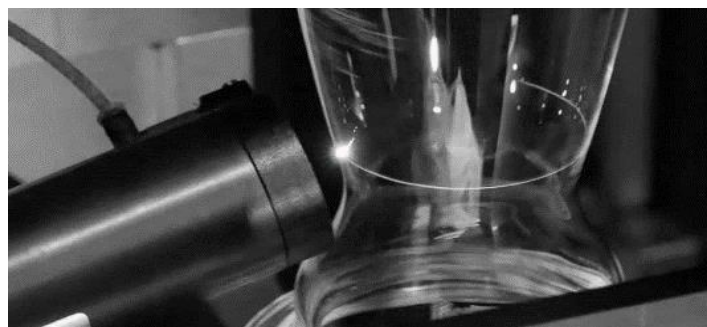


Fig. 1 filament line in the glass

This means that the moil and the rest of the glass are connected via little sections between the filaments. When the moil has to be removed from the goblet, a specific amount of energy in form of heat is required. The short heating time of the perforated area leads to the dilatation of the glass diameter and therefore also to tearing off of the small sections between the holes and subsequently to the cutting off of the moil. The resulting cutting surface after moil removal from the glass in the LFC is very fine, smooth and free of breakouts/chippings.

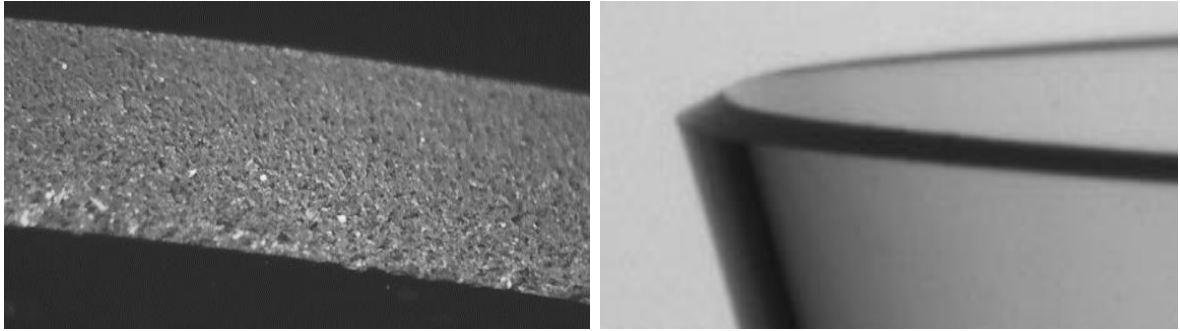


Fig. 2 cutting surface of a martini glass after LFC moil removal

A subsequent treatment of the cutting surface, like grinding and the thereby required washing of the glasses are no more needed and unnecessary. Completely dry glasses are creating a significant benefit for the following steps in the manufacturing process (laser marking, labeling, packaging...). The high and perfect quality of the cutting surface allows the customer to create, depending on particular requirements, a very fine or a stronger formed mouth rim. Furthermore, a reduction of the mouth rim faults (often as a result of material chipping generated by the grinding process) leads to higher yield.

Advantages of Laser Filament Cutting (LFC)

- contactless cutting process (no thermal / mechanical stress on the glass)
- high rim quality (no chipping / no micro cracks)
- no condensation on the glass (no thermal cutting)
- high process stability and easy adjustment of settings
- no grinding / no water usage (no water treatment, no grinding debris removal, no glass drying)
- low operation and maintenance costs (e.g. energy saving due to 50W-Laser)
- non sensitive process (regarding ovality, wall thickness distribution, bent glasses)
- non sensitive to the shape of the glasses
- usage in hot-end / cold-end possible

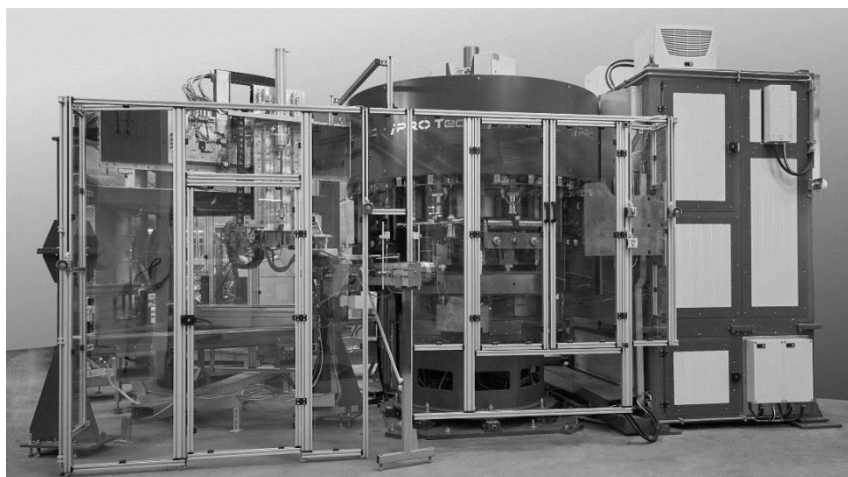


Fig. 3 Laser Filament Cutting (LFC) machine

Klaus Lesche, IPROTEC GmbH, Dr.-Schott-Straße 35, 94227 Zwiesel, e-mail: klaus.lesche@iprotec-gmbh.com, Phone: +49 (0) 9922/98-676, Fax: +49 (0) 9922/98-590, www.iprotec-gmbh.com

Achievable qualities in the blow-blow process and a efficiency increasing technology

Christoph Weinberger

Advantageous machine control to satisfy an increasingly volatile market

In the past decades, there was a steady increase in the amount of output that the machines had to manage as the market demanded this with high-volume orders.

This led to the design and construction of larger and larger machinery. For example, an RPH 12/2 double press in combination with an IBS 32 blow machine for quantities of up to 55 pieces per minute for high quality stemware. Furthermore, for different products (e.g., stemware and tumblers) different lines were built and operated under maximum output.

In recent years, however, there has been a noticeable decline in the number of high-volume orders, or the number of pieces required for the orders has been reduced. Yet, the required product selection and product variance (different shapes and volumes) have increased.

This has significant effects on the (existing) large machines and equipment:

- Downtimes due to job-change-times increase.
- This disturbs the overall temperature balance of the systems which in again has to be compensated first.
- Some products are not or only very difficult to produce on large machines due to process-related conditions (slower or faster processing times, cooling times, ...).

In summary, a modern production line should be able to "adjust" itself to the product in order to optimize the forming process and to ensure that the desired quality can be achieved with high process reliability.

In order to achieve these targets, it is necessary that a large, high-volume machine like the IBS 32 can behave like an IBS 16 in case of need. Or an IBS 24 can behave like an IBS 12 if necessary. This possibility is already integrated in new machines of IBS 32 as well as for IBS 24 on customer request. It is also possible to upgrade existing machines.

Since both the IBS 32 and IBS 24 have a dual-circuit stations-supply (one supply to the stations with an even number of stations and one supply to the stations with an odd number of stations) plus the software has been adapted accordingly, it is possible to load only half of the stations on a for example IBS 32 and thereby use the process as on an IBS 16.

As a further advantage, a job-change can be carried out simultaneously on the other half of the stations, while one half is in continuous production.

Of course, the corresponding presses RPH 12-2 and also RPH 10-2 offer the same described functionality in order to meet the needs of the blow machine.

As a result, all the advantages that a new machine offers compared to the older ones (for example the segment construction in the IBS for quick and easy repair), as well as all the options described above, are combined so that the customer achieves noticeable added value to the complete line and gives the opportunity to adapt to the market situation.

Energy saving via cap-glass reduction

Purely from the history of development, closed work tables were used for blow machines at the beginning. These made it possible to use conical blow heads, which also provided a sealing between the blow head and the pre-pressed glass pastille for the blowing proces itself.

The problem with this solution was the take-out of the pieces, as they have to be snapped out, which of course involves the risk of glass breakage. In addition, the remaining ring of glass on the worktable must be removed with a " blade ", which involves the risk of damaging the working rings.

The method with closed worktables was then modified and split worktables were introduced. These make it possible to remove the product relatively easily and make the product manageable and transportable. The disadvantage, however, was that conical blow heads could no longer be used, as the cone would try to spread / open the split worktable. Therefore, it was necessary to change to flat blow heads, which had the disadvantage that the cap glass is increased compared to the conical blow heads.

This was an unpleasant problem until recently, but compared to other cost centres of the process it was rather small.

The energy crisis, or rather the drastic increase in gas costs, brought this problem to the surface again, as this extra glass not only has to be reprocessed but also re-melted, and therefore more energy has to be consumed.

A combination of both described variants would therefore be ideal – a split work table and conical blow heads.

All modern IBS machines offer exactly this combination via a relatively simple adaptation of the mechanics.

Practical tests have shown a massive savings potential. For example: For the same article, the gob weight could be reduced from 230 to 190 g. This corresponds to a saving of around 20 % for this article. At 40 g per article, 30 pieces per minute, this equates to 1.7 tons of saved glass per day, and with 350 working days per year, 595 tons of glass.

The challenge now is for the customer who wants to implement this system, since the gob weights, preform sizes, working ring sizes, etc. have to be determined again for each article.

Summary

Our contribution deals with the first two topics of the given program of the conference: Glass forming machines, design of glass production and processing machines and automatic handling in glass production.

We would like to talk about the topic of achievable qualities in the blow-blow process and how these different qualities can be seen on the product, as well as how an improved quality can be made achievable and which machines are necessary for this. In addition to this, the efficiencies of the machines are becoming more and more important due to the current energy situation. A significant step in this direction is the so-called cap glass reduction.

The history of its development and why it has become necessary, how it is implemented in the machine, and what savings can be expected will be presented and explained.

ESERVO-Technology - energy saving in glass production

Michael Altgott

About WALTEC

As a family owned company, WALTEC is the leading manufacturer of fully automated and electronically controlled production lines and this from feeder up to annealing lehr, designed and built according to “**Made in Germany**”.

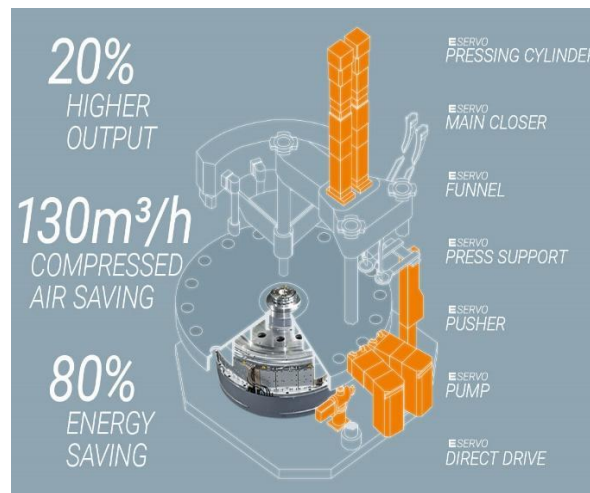
Over time we have been successfully migrating our state-of-the-art pressing, blowing, spinning, handling and fire polishing solutions into more than 250 manufacturing locations around the globe.

Transforming Hot End operations through improved resource efficiency and reduced energy consumption is our key challenge.

ESERVO – Performance Components

WALTEC’s latest generation **ESERVO** performance components deliver power only when needed and through this generating substantial savings in energy and compressed air. Servo movements are more precise and repeatable resulting in higher efficiencies. At the same time servo technology improves operator health and safety through the reduction of in-air oil pollution and residues during operation.

WALTEC’s **ESERVO** performance components can replace inefficient conventional hydraulics and old energy intensive pneumatics. Benefits from servo-controlled process movements are totally readable, recordable and repeatable. These are the basics for Industry 4.0.



All types of machines in the WALTEC-portfolio can be converted to the **ESERVO**-Technology:

- Feeding
- Spinning
- Pressing
- Press-Blow
- Blow-Blow
- Fire Polishing

Michael Altgott, Waltec Maschinen GmbH, Kronacher Strasse 2a, 96352
Wilhelmsthal, Germany, e-mail: michael.altgott@waltec.de,
Phone: +49 9260 99010



Laser technology for modern glass industry

Petr Hauschwitz

Abstrakt - laserové technologie pro moderní sklářský průmysl

V tomto příspěvku představíme špičkové laserové technologie centra HiLASE v oblasti opracování skla a transparentních dielektrik a jejich význam pro inovace ve sklářském průmyslu. Představíme technologie jako je efektivní opracování a strukturování skla, včetně specifických postupů tvarování laserového svazku a využití Besselovských objektivů pro efektivní řešení problémů spojených s tradičním mechanickým zpracováním skla. Dále se zaměříme na technologii multi-beam B-TGV a její aplikace. Diskutovány budou i konkrétní případové studie z různých hi-tech oblastí, včetně tvorby povrchových mikrostruktur pro zlepšení adheze mědi při výrobě kvantových čipů, gravírování pro lepší povrchovou drsnost a následné opracování, nebo výrobu mikrofluidních čipů a mikrostruktur do forem pro lisování přesných optických elementů.

Naším záměrem je prezentovat široký potenciál našich technologií pro sklářský průmysl a inspirovat tak k dalšímu rozvoji inovací v této oblasti.

Numerical modeling of industrial glass furnaces

Miroslav Polák, Jiří Brada, Miroslav Trochta

Abstract

In this presentation, we will explore advantages of numerical modeling which has become an indispensable tool for designing, optimizing, and controlling industrial processes. Glass manufacturing is no exception, and numerical modeling of glass furnaces has thus been gaining increasing importance over past few decades.

Glass melting furnaces are a crucial component of the glass manufacturing process and are subject to a variety of complex physical and chemical processes. Associated challenges, such as high temperatures or maintaining precise control over the glass melting process, contribute to a vital need for mathematical models which can help to better understand the process as well as to predict furnace behavior under different conditions. This then leads to improved efficiency, reduced costs, and better product quality.

Experience in the utilization of 3-axes CNC Machines in Glass Processing

Jaroslav Polák, Ondřej Brustmann

Introduction

The Company POLPUR stands as a traditional manufacturer of tools for the glass industry. The vast majority of these tools stem from the company's proprietary development effort. The company's focus extends to glass processing and the innovation of technological solutions for glass processing. The company maintains a tight collaboration with the academic sphere, including institutions like the Czech Academy of Sciences, Technical University in Liberec, Institute of Chemical Technology Prague, etc. This collaboration has yielded a series of successfully concluded joint projects, funded through initiatives like OPPIK, TACR, etc.

In our presentation, we will highlight the 10-year experience in utilizing standard metalworking CNC machines adapted for glass processing. Over the past decade, we have increasingly encountered customer demand for the processing of unique glass products, ranging from components of dedicated scientific instruments to artistic glass design products. Commonly, we face requests for the machining of a few unique products with dimensions exceeding one meter, accompanied by significant qualitative requirements. We have innovatively repurposed standard 3-axis CNC metalworking machines as a cost-effective solution.

Experiments

3-axis CNC machines offer substantial advantages, beyond their cost considerations. Unlike multi-axis machines, they facilitate processing within a larger working envelope. Due to their design, they have proven to be adequately robust while remaining highly adaptable. Test results revealed the feasibility of installing various metrology instruments such as laser triangulation sensors, etc. Such sensors can be employed for precise in-situ measurement of products and tools, achieving accuracies in the order of units of micrometers. One of the pivotal challenges encountered pertains to glass residuals. The removed glass material often exceeds 90% of the substrate. Removed material, in the form of small particulates, constitutes an abrasive and contaminated the process. It can both alter the chemistry of the coolant and can affect the mechanisms of CNC-axes. In contrast to multi-axes CNC machines, additional shielding of the axis mechanism can be addressed through supplementary enclosures.

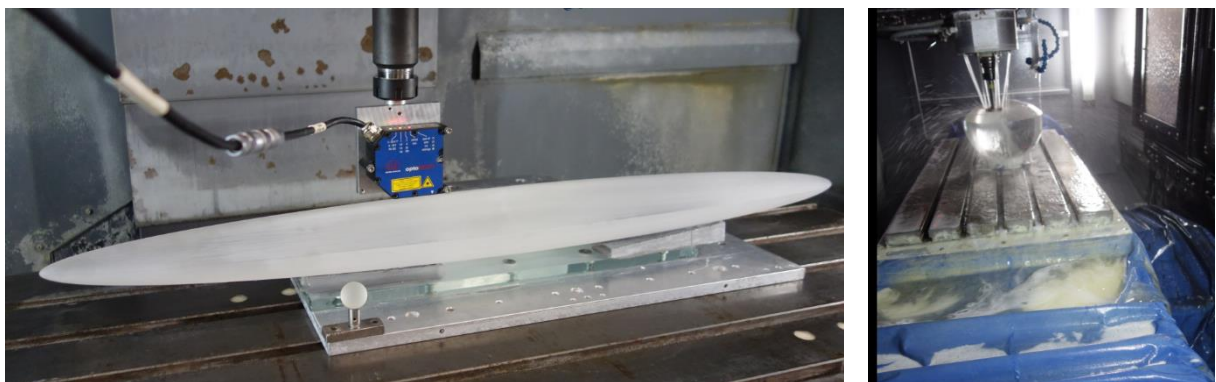


Fig. 1 left – in situ measurement by the trigonometric sensor, right – supplementary enclosure

3-axis machines, of course, have their inherent limitations. Conventionally, they allow machining within the Z-planes constituting the customary contour structure. Nonetheless, it is feasible to promptly achieve a workpiece shape that approximates the desired form and can be rapidly and efficiently refined through subsequent processing methods/tools. Standard 3-axis CAM software can be utilized for tool path definition. Another prevalent constraint arises in the context of the processing of complex shape products. Nevertheless, this predicament can be circumvented with ease by implementing a procedure wherein the upper half of the object is initially processed, subsequently detached, its orientation altered, and the second half of then machined. By employing simple external reference objects during object repositioning, precision on alignment better than 0,1 mm can be attained, which proves sufficient for the majority of applications. Another limitation of the 3-axis technology is the variable position of the point of contact between the tool and the workpiece during machining in Z-planes. Nevertheless, in this instance, it is feasible to mitigate this issue with tools with controlled spherical surfaces.

In our presentation. We will demonstrate several instances of glass product machining, with a specific focus on the design artifact – the ENDLESS bowl by designer Jan Čapek. The featured object, made from a uranium glass substrate, underwent an initial casting phase, followed by precise machining in various orientations using a set of different grinding tools on a 3-axis CNC machine to achieve its precise form.

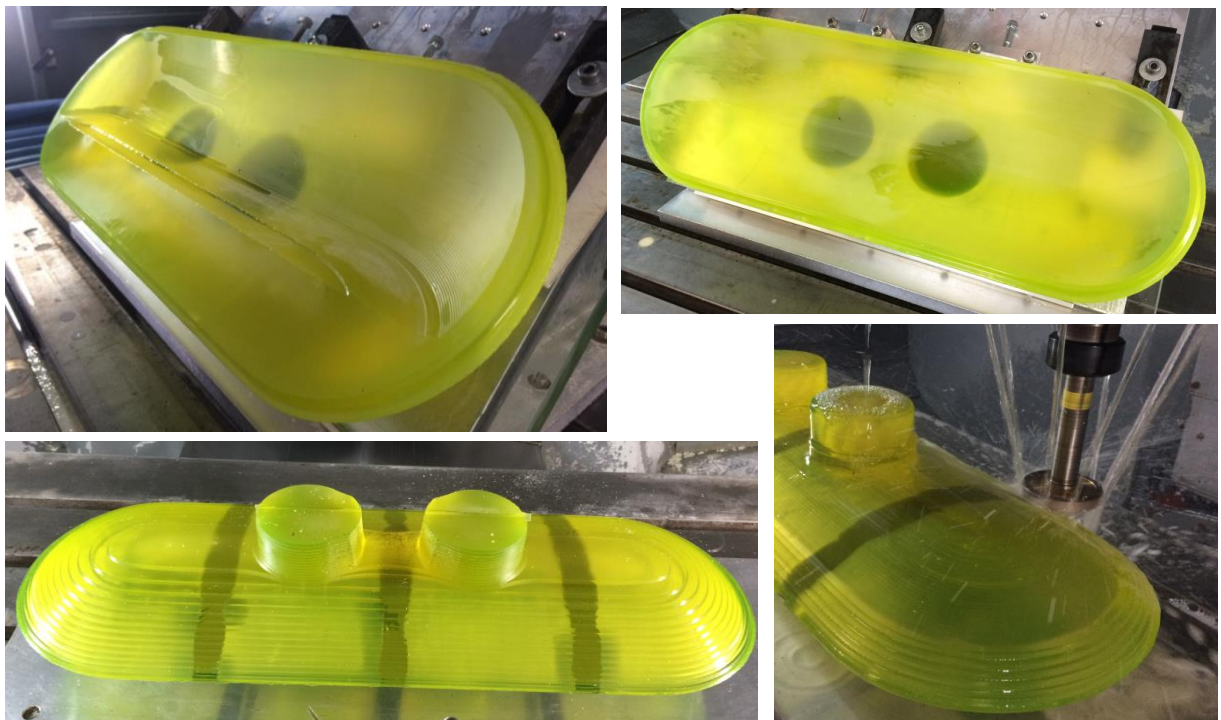


Fig. 2 Images from the production of the ENDLESS uranium glass bowl sample

We have successfully developed technology for the precise machining of large and complex glass objects, utilizing adapted 3-axis machines. This technology enables efficient processing of objects that would pose a challenge to other methods of processing.

Jaroslav Polák, POLPUR spol. s r.o., Kudrnáčova 1287, CZ-51101 Turnov, tel.: +420 608 556 884, e-mail: polak@polpur.cz

Ondřej Brustmann, POLPUR spol. s r.o., Kudrnáčova 1287, CZ-51101 Turnov, tel.: +420 481 311 581, e-mail: o.brustmann@polpur.cz

Directed Energy Deposition 3D Glass Printing (DED) for Realizing Customized Optical Sensors

Mohamed Abdelkader, Vlastimil Hotař

Introduction

3D printing or additive manufacturing constructs parts and products additively layer by layer, allowing the realization of complex and sophisticated designs [1]; 3d printing offers high efficiency, customizability, and a low cost when compared to traditional manufacturing [2] and printed parts dimensions can be tiny as few micrometers in the case of Microelectromechanical systems (MEMS) [3,4] or enormous as few meters in the case of printing complete houses [5,6].

Glass 3D printing can realize glass parts faster, more precisely, and with lower energy than traditional glass manufacturing technologies. Moreover, functional optical parts can be acquired using this technology. In general, the published technologies of 3D glass printing may be divided into the following approaches: Indirect acquisition (a “green/initial body” is obtained from 3D printing; subsequently, the object requires postprocessing to acquire the object in a glass state)[7,8]. Direct acquisition (the object is entirely produced in its final state after the 3D printing) [9].

Directed Energy Deposition (DED) represents a 3D printing technique wherein a concentrated energy source, like a plasma arc, laser, or electron beam, is employed to liquefy a material while it is concurrently placed using a nozzle [10]. DED is a promising printing technology that could be used to print glass objects. This study aims to realize 3D glass printing using DED technology and reach optimized printing conditions to ensure the printed structure's quality and homogeneity.

This work introduces DED glass 3D printing technology that can be used to print different complex glass structures, particularly optical sensors or functional optical parts.

Experimental Approach

As for the conventional metallic DED 3D printing, in the proposed 3D glass DED printer, a fiber optic silica (SiO_2) glass wire is fed to the printing area under the laser beam. Figure 1 shows the printing area schematic.

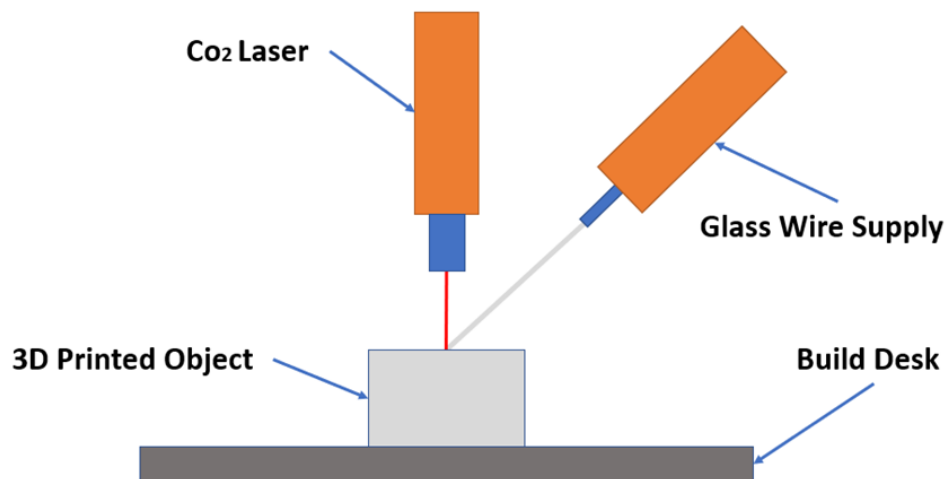


Fig. 1 DED glass 3D printing area schematic

Tab. 1 Specifications of the DED glass 3D printer

LASER	CO2 LASER WAVELENGTH $\approx$ 10.7 MM POWER UP TO 40 W
Degree of freedom	3
Printing material	Optical fibers (Pure SiO ₂) Fiber's diameter: 100 μ m – 1000 μ m

Conclusion

To conclude, additive manufacturing or 3D printing allows printing of customized and complex shapes and structures. Directed energy deposition (DED) is a promising printing technology that could be used to print glass objects and functional glass parts. Silica glass has a very low thermal expansion coefficient that makes it resistant to thermal shocks; using DED 3D glass printing, functional optical parts and sensors can be realized, which can be implemented in harsh environments where a sudden change in temperature occurs.

Acknowledgments

This work was supported by the Student Grant Competition (SGS) of the Technical University of Liberec, under project no. SGS-2023-5321.

References

- [1] J. Yang, N. Li, J. Shi, W. Tang, G. Zhang, and F. Zhang, in *Multimaterial 3D Printing Technology* (Elsevier, 2021), pp. 17–42.
- [2] L. Zhang, L. Zhou, and L. Xiao, in *Customized Production Through 3D Printing in Cloud Manufacturing* (Elsevier, 2023), pp. 27–38.
- [3] T. Blachowicz and A. Ehrmann, *Micromachines* **11**, 434 (2020).
- [4] S. Pagliano, D. E. Marschner, D. Maillard, N. Ehrmann, G. Stemme, S. Braun, L. G. Villanueva, and F. Niklaus, *Microsyst Nanoeng* **8**, 105 (2022).
- [5] M. Sakin and Y. C. Kiroglu, *Energy Procedia* **134**, 702 (2017).
- [6] P. Wu, J. Wang, and X. Wang, *Automation in Construction* **68**, 21 (2016).
- [7] R. Dylla-Spears, T. D. Yee, K. Sasan, D. T. Nguyen, N. A. Dudukovic, J. M. Ortega, M. A. Johnson, O. D. Herrera, F. J. Ryerson, and L. L. Wong, *Sci. Adv.* **6**, eabc7429 (2020).
- [8] F. Kotz, K. Arnold, W. Bauer, D. Schild, N. Keller, K. Sachsenheimer, T. M. Nargang, C. Richter, D. Helmer, and B. E. Rapp, *Nature* **544**, 337 (2017).
- [9] R. M. Zaki, C. Strutynski, S. Kaser, D. Bernard, G. Hauss, M. Faessel, J. Sabatier, L. Canioni, Y. Messaddeq, S. Danto, and T. Cardinal, *Materials & Design* **194**, 108957 (2020).
- [10] "What is Directed Energy Deposition (DED)? - TWI," <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/directed-energy-deposition>.

Summary

The article introduces the possibility of glass 3D printing for various purpose including functional optical parts using DED printing technology.

Ing. Mohamed Abdelkader, Department of Glass Producing Machines and Robotic, Technical university of Liberec, Studentská 2, 461 17, e-mail: mohamed.fawzy@mena.vt.edu.

doc. Ing. Vlastimil Hotař, Ph.D., Department of Glass Producing Machines and Robotic, Technical university of Liberec, Studentská 2, 461 17, e-mail: vlastimil.hotar@tul.cz, tel.: +420 485 352 929

Optimalizácia životnosti oleja v zváracom stroji OCMI-SA48

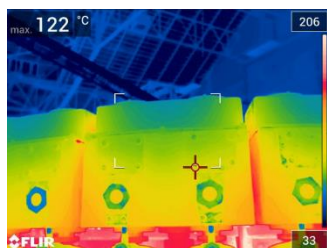
Burget Matěj, Vrábel Peter

Úvod

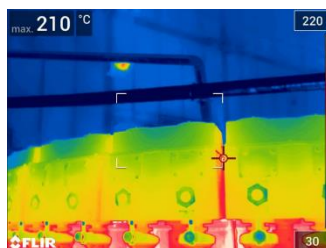
Príspevok sa zaoberá priebehom degradácie oleja centrálneho mazania zváracieho stroja OCMI-SA48 pri výrobe úžitkového krištáľového skla a metodikou optimalizácie životnosti s maximalizovaním intervalu výmeny. Nepretržitou prevádzkou sú sklárske stroje a systémy centrálnych mazaní vystavené tepelnému zaťaženiu, ku ktorému dochádza vplyvom interakcie tvarovacieho náradia s horúcou sklovinou so superponovaním technologických príhrevov. Olej centrálneho mazania sklárskych strojov si musí zachovať vlastnosti v širokom tepelnom spektre v prípade, že niektorú z vlastností olej nespĺňa alebo je vplyvom prevádzkových podmienok prekročená dochádza k exponenciálnej degradácii s tvorbou vedľajších produktov ovplyvňujúcich prevádzkovú spoľahlivosť stroja.

Metodika a riešenie problematiky

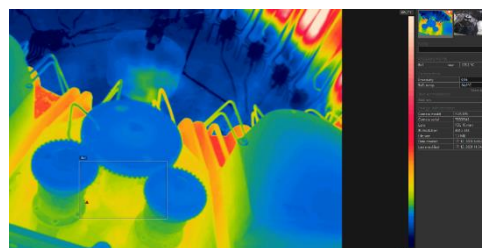
Ako miesto so zásadným vplyvom na rýchlosť priebehu degradácie oleja centrálneho mazania zváracieho stroja je možné na základe termovízie a identifikovaného poškodenia dielov počas generálnych opráv označiť vrchnú časť pracovnej stanice stroja. Teplota povrchu v danej oblasti dosahuje priemerne 159 °C, pričom na základe termovízneho hodnotenia je túto časť stroja možné rozdeliť na dve tepelné oblasti. Oblasť č. 1 s priemernou teplotou povrchu 134 °C (obr. 1 čelo stanice) a oblasť č. 2 s priemernou teplotou 185 °C (obr. 2 bočná stena pracovnej stanice). Prechodom oleja horúcimi miestami dochádza k ohrevu na teplotu 150 až 160 °C (obr. 3). Horúce miesta umocňujú vytvorenie a priebeh chemických reakcií procesu degradácie oleja.



Obr. 1 Teplota povrchu čela pracovnej stanice OCMI SA-48



Obr. 2 Teplota povrchu bočnej steny pracovnej stanice OCMI SA-48



Obr. 3 Teplota oleja (157,2 °C) - vrchná časť pracovnej stanice OCMI SA-48 (termovízia)

Rýchla degradácia oleja Dacta SYNT 220 v centrálnom mazaní OCMI-SA48

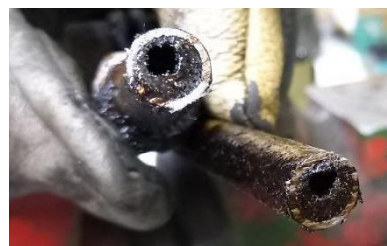
OCMI-SA48 bolo v minulosti prevádzkové s olejom Dacta SYNT 220 s nastaveným mazacím predpisom výmeny každých 7 mesiacov. Prechodom oleja horúcimi miestami (obr. 1 a obr. 2) dochádzalo k naštartovaniu chemických procesom degradácie za vzniku mäkkých nečistôt a pevných karbónových produktov s prichytením na kovovom povrchu (obr. 4 a obr. 5).



Obr. 4 Vnútorný priestor vrchnej časti pracovnej stanice s produktami degradácie oleja Dacta SYNT 220



Obr. 5 Detail komponentov pracovnej stanice s produktami degradácie oleja Dacta SYNT 220



Obr. 6 Obmedzenie prietoku prepádovej trubky pracovnej stanice OCMI SA-48 v dôsledku prichytenia častí degradácie oleja Dacta SYNT

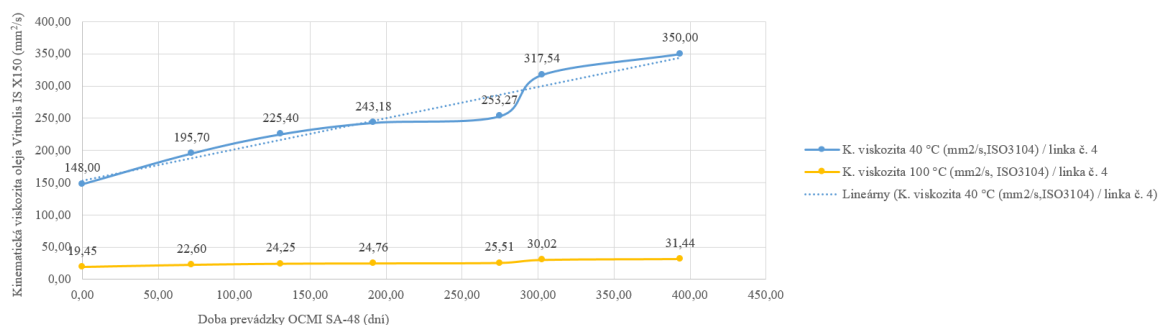
Prichytením aglomerátov častíc dochádzalo k zníženiu prietoku prepádových trubiek (obr. 6), ktoré odvádzajú olej z vrchnej časti pracovnej stanice do série záchytných nádrží centrálneho mazania stroja. Obmedzením prietoku dochádzalo k zhromažďovaniu oleja s dlhšou expozíciou na horúcich miestach tým boli vytvorené podmienky urýchlenia degradácie až za hranicu medzného stavu oleja a následne až stroja (obr. 4 a obr. 6). Vzhľadom na rýchlosť degradácie oleja Dacta Synt bolo potrebné skrátiť interval výmeny oleja v centrálnom mazaní na 5 mesiacov = nárast prevádzkových nákladov.

Súčasný stav centrálneho mazania OCMI SA-48 s olejom Vitrolis IS X150

Nízka prevádzková spoľahlivosť stroja spojená s rastúcimi prevádzkovými nákladmi vyvolali dopyt pre výber nového typu oleja pre aplikáciu v centrálnom mazaní OCMI SA-48. Vzhľadom na prevádzkové podmienky bol zvolený plne syntetický olej Vitrolis IS X150 určený pre zariadenia sklárskeho priemyslu. Prvá aplikácia oleja do centrálneho mazania stroja bola zrealizovaná po rozsiahlej generálnej oprave s cieľom predísť kontaminácií produktmi degradácie oleja Dacta SYNT. Tým sa vytvorili podmienky pre sledovanie priebehu degradácie novo aplikovaného oleja za rovnakých prevádzkových podmienok.

Stav a sledovanie priebehu degradácie bolo realizované prostredníctvom odberu vzoriek pred odkaľovacou nádržou systému centrálneho mazania s analyzovaním v laboratóriu tribológie (ALS Czech Republic, s.r.o).

Na základe laboratórnych výsledkov bolo zostavený graf č. 1 priebehu zmeny kinematickej viskozity pri 40 °C a 100 °C (mm²/s, ISO3104) v závislosti od dní prevádzky stroja ku dňu odberu vzoriek. Priebeh zmeny možno hodnotiť ako lineárny až po hranicu medzného stavu k vytvoreniu, ktorého došlo v období 274 až 302 dňa prevádzky stroja. Pre poznanie priebehu za medzným stavom a stanovenia hraničnej avšak bezpečnej hodnoty pre výmenu oleja v centrálnom mazaní bol olej v prevádzke ponechaný ďalších 90 dní.



Graf 1 Priebeh zmeny kinematickej viskozity mm²/s pri 40 °C a 100 °C (ISO3104) oleja Vitrolis IS X150 v centrálnom mazaní zväracieho stroja v závislosti na dobe prevádzky stroja

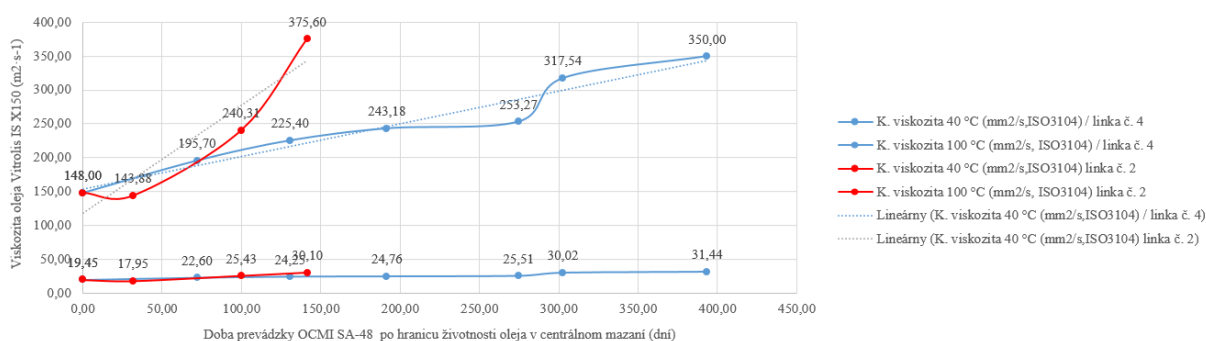
S olejom Vitrolis IS X150 bola v systéme centrálneho mazania OCMI SA-48 dosiahnutá životnosť 402 dní (13,4 mesiaca), z ktorých bol stroj v prevádzke (393 dní / 13,1 mesiaca) bez tvorby vedľajších produktov popísaných v kapitole 1.1. Hodnota kinematickej viskozity 350 mm²/s pri 40 °C bola zároveň stanovená ako bod výmeny oleja v centrálnom mazaní stroja. Porovnaním životnosti oleja Dacta SYNT s interne stanoveným predpisom intervalu výmeny každých max. 7 mesiacov (popísanej v kapitole 1.1) verzus prevádzka zváracieho stroja s olejom Vitrolis IS X150 došlo k 91 % predĺženiu životnosti čo predstavuje úsporu nákladov pre jednu výmenu oleja v centrálnom mazaní ročne v objeme 410 L/stroj.

Vplyv dlhodobej odstávky stroja OCMI SA-48 na životnosť oleja v centrálnom mazaní

Vzhľadom na bezproblémovú prevádzku bez tvorby vedľajších produktov spojených s procesom degradácie bol olej Vitrolis IS X150 postupom času aplikovaný do všetkých zváracích strojov v RONA, a. s.

Laboratórnym sledovaním priebehu degradácie bol identifikovaný vplyv nepravidelnej prevádzky zváracieho stroja z dôvodu sortimentovej skladby linky (výroba bez technológie ťahanej nohy) na rýchlosť priebehu zmeny kinematickej viskozity oleja v centrálnom mazaní tak ako dokumentuje graf č. 2. Zvárací stroj linky so striedavou prevádzkou dosiahol hraničnú hodnotu kinematickej viskozity 350 mm²/s (40 °C) po 141 dňoch prevádzky čo v monitorovacom období predstavuje 48 % z celkového fondu pracovnej doby linky.

Zatiaľ čo k vytvoreniu medzného stavu oleja v centrálnom mazaní zváracieho stroja v nepretržitom režime (kapitola 1.2) došlo po 393 dňoch (97 % z fondu pracovnej doby linky). Vplyvom prevádzkových podmienok stroja a striedania výrobných režimov linky dosiahol olej v centrálneho mazania o 64 % rýchlejší nárast (K. viskozity 40 °C) v porovnaní s nepretržitou prevádzkou zváracieho stroja.



Graf 2 porovnanie priebehu zmeny viskozity oleja Vitrolis IS X150 v závislosti na dobe prevádzky stroja OCMI SA-48 s nepretržitou prevádzkou na linke (97 % z FPD linky) vs. zvárací stroj na linke s nepravidelnou prevádzkou (48 % z FPD linky)

Záver a zhodnotenia

Na základe priebehu procesu degradácie (graf č. 1) a prevádzkovou stabilitou stroja v monitorovacom období je možné konštatovať vhodnosť oleja Vitrolis IS X150 pre aplikáciu v centrálnom mazaní zváracieho stroja s nepretržitou prevádzkou v náročných podmienkach sklárskeho priemyslu. V horúcich miestach pracovných staníc (obr. 1 až obr. 3) vzhľadom na nízku tendenciu daného oleja k tvorbe uhlíka a vysokého stupňa tepelnej/oxidačnej stability nedochádzalo k tvorbe vedľajších produktov. Tak ako tomu bolo pri prekročení výkonnostných vlastností oleja Dacta SYNT 220 (obr. 4 a obr. 6). Prechodom na olej Vitrolis IS X150 bolo dosiahnuté 91 % predĺženie intervalu výmeny (kapitola 1.2), ktoré predstavuje významnú úsporu prevádzkových nákladov v podobe jednej výmeny oleja v centrálnom mazaní ročne (410 L/stroj). Metodikou laboratórneho sledovania priebehu zmeny kinematickej viskozity bol

identifikovaný vplyv výrobného režimu linky na rýchlosť zmeny kinematickej viskozity po hranicu výmeny v závislosti na dobe prevádzky stroja (graf č. 2). Zvárací stroj výrobnej linky so striedavým výrobným režimom dosiahol o 64 % rýchlejší nárast (K. viskozity 40 °C) v porovnaní so strojom v nepretržitej prevádzke.

Výsledky potvrdili ako dôležitý je výber oleja centrálneho mazania vzhľadom na prevádzkové podmienky teplom exponovaného zariadenia. Sledovanie priebehu zmeny vlastností a obsahu kovových / nekovových prvkov umožní včasne zachytiť exponenciálny priebeh degradácie vyvolaný aj malou zmenou prevádzkových podmienok tým v krajnom štádiu ovplyvniť až prevádzkovú spoľahlivosť stroja.

Matěj Burget, RONA, a. s., Schreiberova 365, 020 61 Lednické Rovne, Slovenská Republika, e-mail: burget@rona.sk, tel.: +421 901 906 519

doc. Dr. Ing. Peter Vrabel, RONA, a. s., Schreiberova 365, 020 61 Lednické Rovne, Slovenská Republika, e-mail: vrabel@rona.sk, tel.: +421 902 966 612

Možnosti využití počítačové simulace procesu izotermického tvarování skleněných komponent

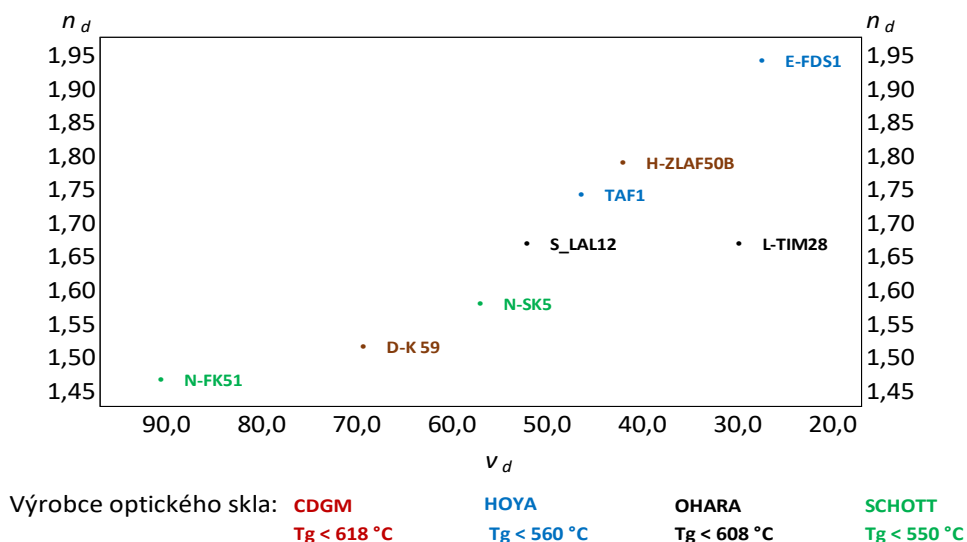
Gabriela Kehlerová, Marcel Horák

Úvod

Tvarování skla metodou PGM (Precision Glass Moulding) umožňuje výrobu vysoce přesných optických komponent bez broušení a leštění. Podmínky tvarování, napětí a deformace ve výrobku ovlivňují výslednou tvarovou přesnost a z důvodu efektivity výroby je optimální predikovat procesní parametry již ve fázi přípravy výroby. Počítačová simulace průběhu jednotlivých fází tvarovacího cyklu a následná predikce kritických míst tvarování tak může významně přispět k nastavení vysoko efektivního tvarovacího cyklu. Kvalitu výroby technologie PGM ovlivňují zejména tyto hlavní problémy: tvarová nestálost především ve fázi chlazení, měnící se optické vlastnosti sklovin v důsledku strukturální relaxace a zbytkového namáhání nebo zhoršení kvality formy eventuelně maziva [1]. Článek předkládá dosažené výsledky v oblasti počítačového modelování procesu PGM. Byl realizován počítačový model skleněného komponentu, který zahrnuje okrajové podmínky získané fyzikálním modelováním a postupně využívá dvou typů reologických modelů nahrazujících reálné chování skla.

Počítačová simulace tvarovacího cyklu a PGM

Technologie PGM umožňuje výrobu komponentů i nepravidelných optických výrobků v jediném kroku, přičemž finální kvalita výrobků logicky závisí hlavně na typu skla a procesních parametrech výroby [2]. Obecně platí, že optické sklo s nižší transformační teplotou T_g má lepší tvarovatelnost, teplota tvarování sklovin je nižší, deformace tvaru způsobené chlazením jsou obecně menší a také difference materiálových vlastností v intervalu provozních teplot PGM jsou menší a životnost formy je delší [3]. Příklady hodnot tvarovatelnosti skla dodávaného pod označením jednotlivých výrobců jsou shrnuty v grafu na obr. 1.

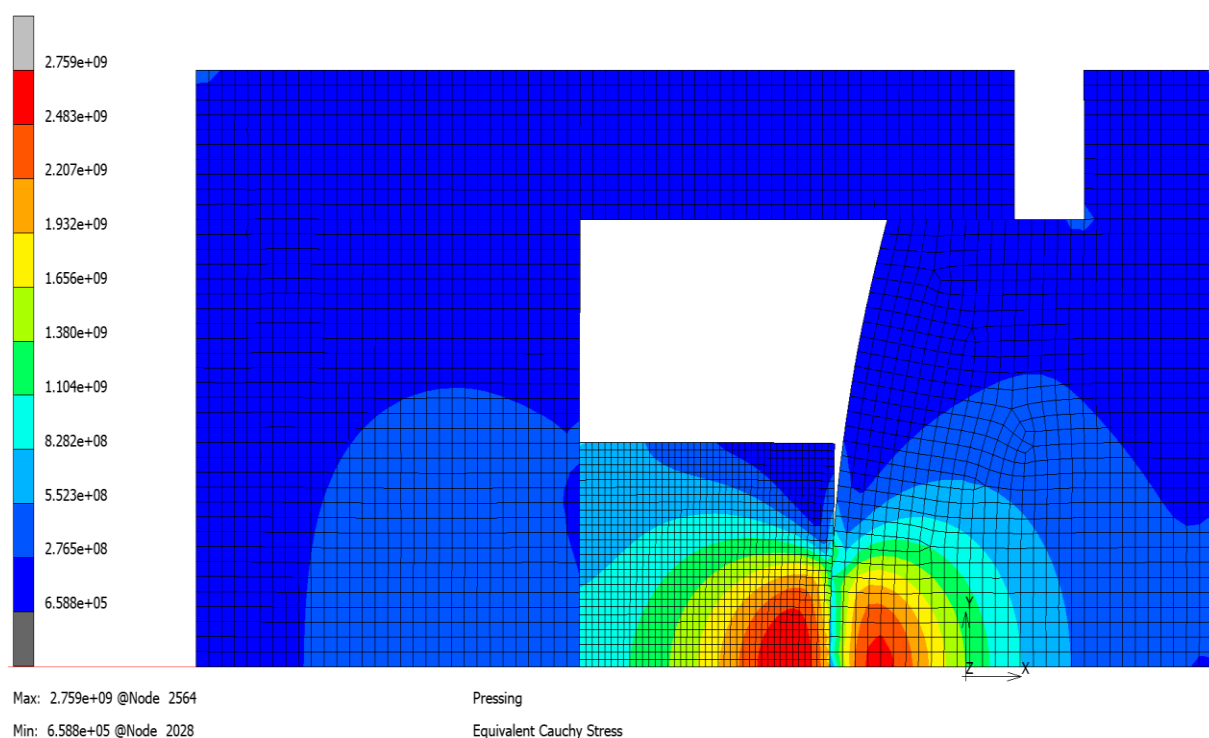


Obr. 1 Optické vlastnosti vybraných sklovin, jejich index lomu n_d a Abbeho číslo v_d . [4 a 5]

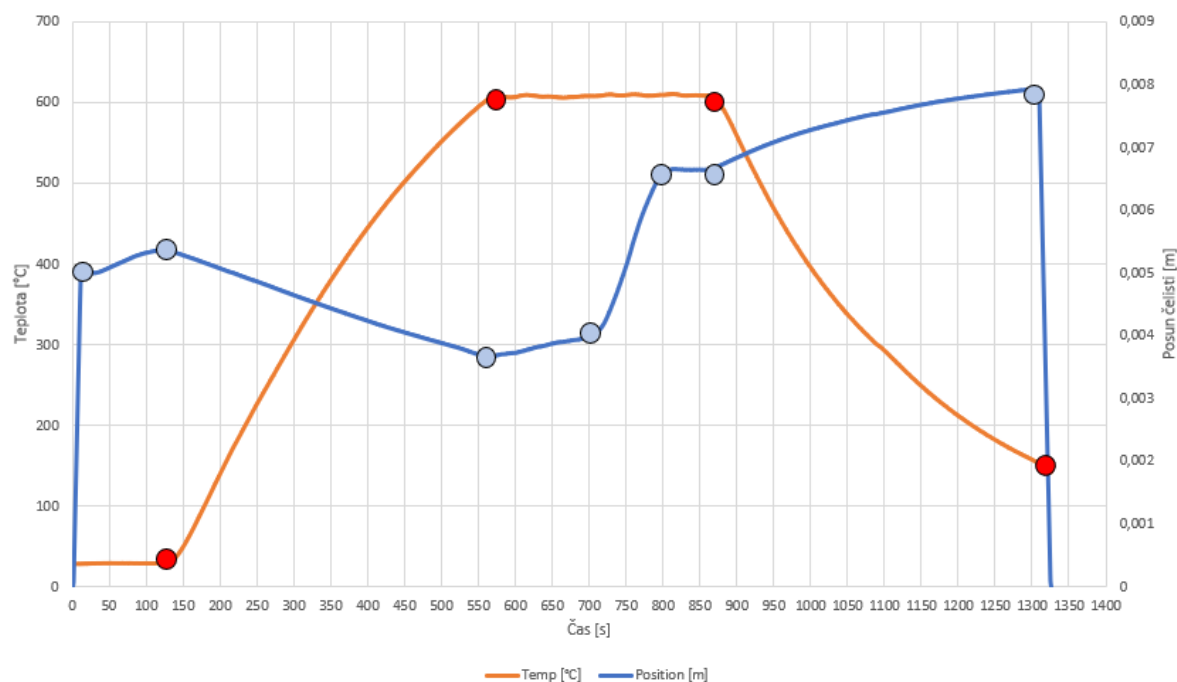
Dalším klíčovým parametrem procesu PGM, který má vliv na konečný tvar výrobku, je zbytkové napětí ve skle. Zbytkové napětí závisí především na teplotní historii v tzv. podchlazené metastabilní kapalně oblasti, způsobené variabilitou a heterogenitou deformací optického

skla. Proces PGM by měl proto optimálně probíhat v oblasti těsně nad transformační teplotou optické skloviny, ve které má materiál nestabilní nerovnovážnou strukturu a viskozita skla se pohybuje v rozmezí od 10^8 do 10^{12} Pa.s [6]. Namáhání ve skle lze v PGM účinně minimalizovat snížením rychlosti chlazení v intervalu blízkém transformační teplotě. Proces tvarování pak probíhá buď za použití konstantní tlakové síly, nebo rychlosti tvarování po dobu zvoleného času (obr. 2). Díky tomu je proces PGM extrémně citlivý na teplotu tvarování. Kromě toho, vzhledem ke strukturální relaxaci v tomto teplotním intervalu, atomová struktura, která řídí vlastnosti materiálu je silně závislá na čase a teplotní historii. Taková složitost často vede k již zmíněnému zbytkovému napětí a zkreslení tvaru lisované čočky, což způsobuje neočekávané defekty její optické funkce.

Počítačové modelování tvarovacích procesů představují logický přístup řešení problémů pomocí analýzy metodou konečných prvků (FE), při které je celé těleso rozděleno myšlenou sítí na velké množství částí jednoduchého tvaru [7]. Deformace uvnitř prvků jsou popsány prostřednictvím polynomů, tj. pomocí posuvných uzlových bodů. Pro přesný popis chování materiálů v PGM numerickou simulací MARC Mentat byl pro experimentální část zvolen konstitutivní model založený na elasticko-plastickém a viskoelastickém modelu. Jak u elasticko-plastického, tak i u viskoelastického modelu simulace MARC Mentat se napětí ve sklovině významně projevuje už ve fázi ohřevu v čase 192 s a při teplotě 125 °C (obr. 2). Následné tvarování skloviny probíhá v podstatě za izotermických podmínek a to buď při působení konstantní tlakové síly, nebo při konstantní rychlosti lisování v definovaném časovém intervalu (obr. 3). Na konci tvarování je výlisek nejprve ochlazován nízkou rychlostí, během níž zůstává tlaková síla na přibližně konstantní úrovni do té doby, dokud teplota skla neklesne na hodnotu odpovídající dolní chladicí teplotě ($\eta = 10^{13,5}$ Pa.s).



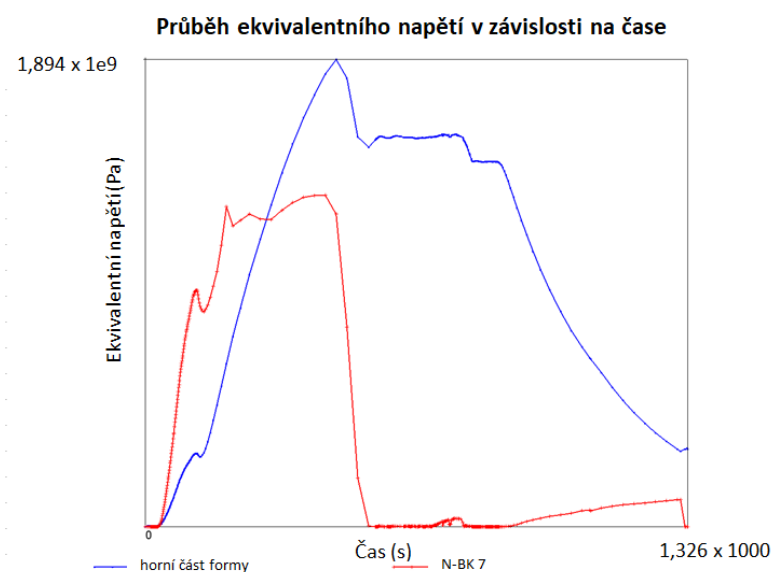
Obr. 2 Simulace MARC – zobrazení ekvivalentního napětí při 125 °C a čase 192 s.



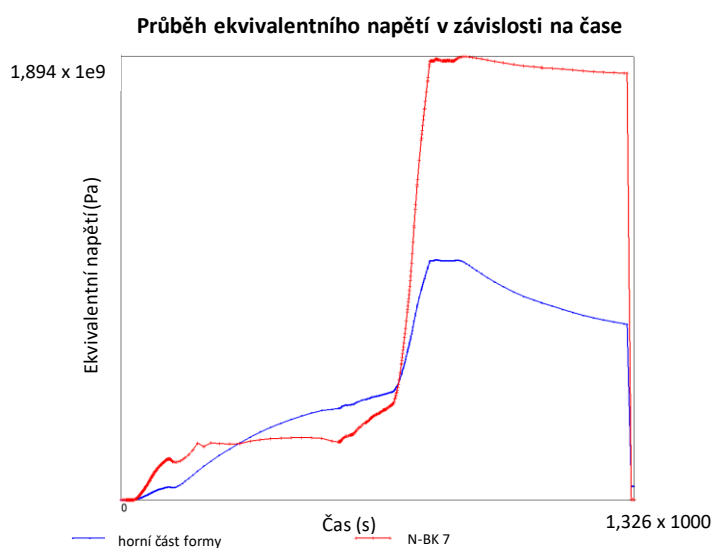
Obr. 3 Zobrazení průběhu tvarovacího cyklu experimentu PGM

Výsledky simulace napětí při různé síle lisování ukázaly nepatrný vztah mezi lisovacím tlakem a zbytkovým napětím. Abychom mohli studovat vliv lisovací teploty na napětí a geometrii tvarované čočky, byla síla lisování nastavena na konstantní hodnotu 2500 N a teplota se pohybovala od 550 až 610 °C. Proces tvarování tedy probíhal téměř za izotermických podmínek v optimální oblasti nad transformační teplotou, ve které má materiál nestabilní nerovnovážnou strukturu a viskozita skla se pohybuje v rozmezí od 10^8 do 10^{12} Pa.s. Výsledný tvar křivky, zobrazující průběh ekvivalentního napětí horní části formy a skloviny N-BK7 v závislosti na čase není v simulaci MARC pro elasticko-plastický model a viskoelastický model shodný (Obr. 4.). Použitím viskoelastického modelu se zvyšující vnitřní napětí projevuje o něco dříve ve sklovině než ve formě, a to zejména ve fázi rychlého ochlazení. Příliš velké napětí na okraji skleněného elementu způsobené nesprávnou rychlostí chlazení může v praxi způsobit snadné prasknutí výlisku. Aplikací elasticko-plastického modelu je průběh ekvivalentního napětí ve sklovině a horní části formy nejvýraznější ve fázi tvarování. Napětí ve sklovině se během fáze ohřevu rychle zvyšuje do doby přiblížení k transformační teplotě. Je evidentní, že maximální napětí se objevuje zejména na okraji a středu skleněného elementu. Vliv tlaku je sice velmi malý, ale ne ve fázi tvarování, kdy dochází ke zvyšování napětí lisovaných skleněných elementů s rostoucím časem. Namáhání lze v PGM účinně minimalizovat snížením rychlosti chlazení v intervalu blízkém transformační teplotě. Proces tvarování pak probíhá buď za použití konstantní tlakové síly, nebo rychlosti tvarování po dobu stanoveného času. Díky tomu je proces PGM extrémně citlivý na teplotu tvarování. Diametrálně odlišné průběhy napětí v lisovaném komponentu jsou evidentně závislé na použití konkrétního materiálového reologického modelu skla. Navržený počítačový model bude v rámci dalšího výzkumu opakovaně experimentálně verifikován.

a) ELASTICKO-PLASTICKÝ MODEL



b) VISKOELASTICKÝ MODEL



Obr. 4 Zobrazení průběhu ekvivalentního napětí horní části formy a skloviny N-BK7 v závislosti na čase a) elasticko-plastický model, b) viskoelastický model

Závěr

Na základě vyhodnocení výsledků simulace MARC Mentat bylo jednoznačně potvrzeno, že vnitřní napětí skloviny N-BK7 je ve fázi lisování nepatrné. Protože se maximální napětí zvyšuje s nárůstem rychlosti tvarování lze předpokládat, že stupeň chlazení v procesu PGM nad teplotou skelného přechodu N-BK7 může způsobit velké tvarové deformace skleněného výlisku. Současně je nutné brát v úvahu, že zbytkové napětí skloviny vede ke změně indexu lomu, který výrazným způsobem ovlivňuje požadavky na kvalitu optických vlastností výlisku. Tento první počítačový model je nutné dále rozvíjet a zpřesňovat v souladu s fyzikálním testováním pro jeho další úspěšnou verifikaci a využití získaných dat v předvýrobní fázi (návrh formy apod.). Získáním konkrétních procesních parametrů bude tak možné predikovat kritická místa tvarovacího procesu a výslednou geometrii i kvalitu skleněného výrobku. Pro kvalitativní ověření optimálních a okrajových podmínek tvarování PGM a následnou verifikaci výsledků počítačové simulace bylo provedeno pět experimentů za různých podmínek

tvarování předem určeného předlisku tak, aby bylo možné aproximací získaných výsledků navrhnout výrobní podmínky pro navazující vývoj výrazně odlišného tvaru a velikosti skleněných komponentů.

Poděkování

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže Technické univerzity v Liberci č. SGS 51543 a Ústavem fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i., Výzkumné centrum speciální optiky a optoelektronických systémů TOPTEC.

Literatura

- [1] LIN, X., LIU J., KE X. *Investigation of waviness error in surface grinding of large axisymmetric aspheric lenses*. Proc. Inst. Mech. Eng. Part. B J. Eng. Manuf. 230, 2016. S. 1195–1202.
- [2] ZHANG, Liangchi, Weidong LIU. Precision glass molding: Toward an optimal fabrication of optical lenses, Laboratory for Precision and Nano Processing Technologies, School of Mechanical and Manufacturing Engineering, The University of New South Wales. Sydney NSW 2052, Australia, *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2012. Vol. 12 Issue (1): 3-17, 2017. 614–636.
- [3] SCHAUB, M., SCHWIEGERLING, J., FEST E. C. *Molded Optics Design and Manufacture*. New York: CRC Press, 2011.
- [4] CHANG, Y. Y., Wu C. J. *Mechanical properties and impact resistance of multilayered TiAlN/ZrN coatings*. Surface and Coatings Technology, 231 (2013), s. 62–66.
- [5] HAGEN, J., BURMEISTER, F., FROMM, A. *Iridium coatings with titanium sub-layer deposited by RF magnetron sputtering: Mechanical properties and contact behavior with RoHS-compliant glass melt*. Plasma Processes and Polymers, 6 (S1) (2009), s. S678–S683.
- [6] LIU, W., ZHANG, L. *Thermoforming mechanism of precision glass moulding*. Applied Optics, 54(22) (2015), s. 6841–6849.
- [7] MSC Software Corporation. MSC.Marc - Volume A: Theory and User Information, Version 2016.

Anotace

V příspěvku jsou prezentovány nejdůležitější výsledky numerické simulace MARC Mentat průběhu jednotlivých fází tvarovacího cyklu a následná predikce kritických míst tvarování. Pro nastavení vysoko efektivního tvarovacího cyklu PGM umožňuje zvolená metoda korekci více faktorů současně.

Summary

MSC MARC MENTAT NUMERICAL SIMULATION USABILITY FOR THE GLASS COMPONENTS PRODUCTION AT PGM PROCESS

The article presents the computer simulation usability during the technological optimization of PGM production process. The presented partly results describes the one from the most critical moulding criteria of precision glass moulding.

RNDr. Ing. Gabriela Kehlerová, Katedra sklářských strojů a robotiky, Technická univerzita v Liberci, Studentská 2, 461 17, e-mail: g.kehlerova@outlook.cz

Nestacionární teplotní pole při tvarování baňky dvakrát foukacím způsobem výroby

Hugo Šen

Abstrakt

Příspěvek je zaměřen na analytické řešení úlohy teplotního pole a odvodu tepla při tvarování předního tvaru (baňky) na řadových strojích dvakrát foukacím způsobem výroby. Ukázáno je řešení Fourierovy diferenciální rovnice vedení tepla (FDRVT) pro příslušné okrajové a počáteční podmínky v bezrozměrovém vyjádření. Na vybraných příkladech je vidět výsledné nestacionární teplotní pole v baňce během tvarování, střední objemová teplota, množství odvedeného tepla a tepelný tok. Diskutovány jsou podmínky přestupu tepla ze skloviny do přední formy. Řešení FDRVT umožňuje získat i teplotní pole během tzv. prohřívání baňky, tj. před okamžikem tvarování v konečné formě. Uvedené výsledky dovolují sestavit podklady pro seřízení tvarovacího procesu v přední formě pro různě velké a těžké výrobky. Podobným způsobem je možné získat i řešení teplotního pole pro jiné okrajové podmínky, které odpovídají např. úzkohrdlému lisofoukacímu způsobu výroby.

Odvod tepelné zátěže a chlazení průmyslových (sklářských) provozů

Dušan Příbrský

Abstrakt

Společnost COLT je tradičním výrobcem zařízení pro tvorbu prostředí a odvod tepelné zátěže z průmyslových hal.

Systémy pro přirozené nebo mechanické větrání jsou vhodné především pro vysoce tepelně zatížené prostory hutních hal, kotelen, strojoven apod. Mezi tyto zařízení patří větrací žaluziové klapky a systémy pro permanentní větrání nezávislé na vnějších povětrnostních podmínkách.

Adiabatický chladicí systém je vhodný pro další související provoz, v nichž není tepelná technologická zátěž extrémní avšak přesto stále vysoká. Jde o pracoviště s velkým podílem náročné, odpovědné nebo přesné práce jako je kontrola, třídění, obrábění, údržba a seřizování apod.

Systém adiabatického chlazení COLT CoolStream využívá přirozeného fyzikálního principu ochlazení vzduchu skupenským teplem odpaření vody. Dosahované teploty jsou příznivé pro pobyt osob i pro stabilitu technologie.

Adiabatické chlazení CoolStream je energeticky velmi úsporné s nízkou spotřebou vody i minimálním odběrem elektrické energie.

Adiabatické chlazení pracuje čistě s vnějším čerstvým vzduchem, což poskytuje zároveň i velmi potřebné větrání.

Analýza spojování různých typů skel za tepla

Pavel Jirman

Úvod

Spojování různých typů skel za tepla ovlivňuje jejich vlastnosti i procesy, kterými procházejí. Jde především o viskozitu, teplotní roztažnost, vnitřní napětí a další. Byla provedena diverzní analýza dvou rozdílných skel a formulovány hypotézy, které pak byly prověřovány myšlenkovými experimenty. K tvůrčímu řešení problémů byly využity nástroje metod systematické kreativity.

Diverzní analýza

Diverzní analýza je (DA) způsob generování hypotéz (jedné nebo více), které se pokouší vysvětlit možnou příčinu (NE) s výběrem nejpravděpodobnější hypotézy. DA se používá, když příčina NE je neznámá.

Byl sestaven funkční model systému spojování skel. Byly vymezeny funkce v procesu spojování a pomocí dostupných zdrojů (čas, prostor, materiály, energie, informace, funkčnost) a byly generovány konkrétní příčiny porušení spoje skel za tepla. Tyto příčiny byly vstupními hypotézami pro mnohokriteriální hodnocení a stanovení jejich významnosti.

Tab. 1 Ukázka generovaných hypotéz problémů spojování různých skel za tepla

Číslo	Hypotéza
1	Při nahřátí teplé sklo narušuje studené sklo
2	Nedostatečné spojení při ohřevu vlivem rozdílných viskozitních křivek
3	Trvalé napětí ve skle vlivem rychlého chlazení
4	Nedostatečný čas chlazení pro odstranění vnitřního pnutí
5	Namáhání prostoru spoje vlivem rozdílného koeficientu roztažnosti skel
6	Uzavřený prostor pece neumožňuje řízené chlazení
7	Náraz při následné manipulaci poruší spoj

Myšlenkové experimenty

Myšlenkovými experimenty byly posuzovány vlivy jednotlivých vlastností a procesy spojování rozdílných skel na uvedené hypotézy. Jednalo se o viskozitní křivku, dilatační křivku, vývoj napětí ve skle, chladicí křivku. Myšlenkové experimenty pomohly zpřesnit problémy vznikající při spojování různých skel za tepla. Závěry budou uvedeny v přednášce.

Použité metod systematické kreativity

Pro řešení vybraných problémů spojování různých skel byly použity zejména nástroje definování rozporů a principů k jejich překonání. Jsou rozlišovány technické rozpory, k jejichž překonání jsou používány invenční principy, dále pak fyzikální rozpory, k jejichž překonání jsou používány separační principy a řešení interakcí mezi komponentami systému s využitím standardů řešení.



Obr. 1 Ukázka definice fyzikálního rozporu spojování skel v grafickém znázornění

Závěr

Pomocí uvedených metod diverzní analýzy, myšlenkových experimentů a použití metod systematické kreativity se podařilo lépe porozumět problémům spojování různých skel za tepla a navrhnout koncepty k řešení problémů s nimi spojených.

Literatura

- [1] HOTAŘ, V., KLEBSA, V., MATOUŠEK, I. Technologie automatické výroby skla, TUL, Liberec, 2015
- [2] MAŠÍN, I., JIRMAN, P. Metody systematické kreativity, TUL, Liberec, 2012

Anotace

Spojování různých typů skel za tepla ovlivňuje jejich vlastnosti i procesy, kterými procházejí. Jde především o viskozitu, teplotní roztažnost, vnitřní napětí a další. Byla provedena diverzní analýza dvou rozdílných skel a formulovány hypotézy, které pak byly prověřovány myšlenkovými experimenty. K tvůrčímu řešení problémů byly využity nástroje metod systematické kreativity.

Summary

ANALYSIS OF HEAT JOINING OF DIFFERENT TYPES OF GLASSES

Hot joining of different types of glass affects their properties and the processes they go through. It is mainly about viscosity, thermal expansion, internal stress and others. A divergent analysis of two different glasses was performed and hypotheses were formulated, which were then tested with thought experiments. Tools of systematic creativity methods were used for creative problem solving.

Využití odpadního tepla při tavení a tvarování skla

Josef Smrček

Abstrakt

Provedena rozvaha cest kudy odchází teplo přivedené do pece (250 kW/m^2 tavící plochy (spalinami, vzduchem, vodou, radiací). Většina tepla odchází vzduchem (65 kW m^2 tavící plochy z povrchu pece + 88 kW/m^2 tavící plochy ze skla), tedy střechou. Popsány možnosti zvýšení potenciálu využití této energie vzduchu, tedy zvýšení jeho teploty pro využití tepelné energie v Rankinově cyklu a turbině nebo zvýšení rychlosti vzduchu pro využití ve větrné turbině. Diskutována rovněž teoretická možnost využití termoelektrických generátorů při tvarování.

Josef Smrček, Electroheat, s.v.p.d., Na bojišti 1733/12, 120 00, Praha 2, e-mail: j.smrcek@volny.cz

Varianty konstrukce chladicí dutiny razníku při lisování velkých skleněných výrobků

Petr Salač

Úvod

Při lisování velkých skleněných výrobků se objevuje řada technologických problémů. Jedním z nich je kvalita vnitřního povrchu výlisku. K dosažení jeho vyšší kvality je nutné zabezpečit, aby v okamžiku vyjmutí razníku z výlisku byla na povrchu razníku přibližně konstantní teplota optimální velikosti. Toho je možné dosáhnout několika konstrukčními úpravami v oblasti dutiny razníku, jež vedou v důsledku chlazení proudící vodou v dutině razníku k optimalizaci rozložení teploty na jeho vnějším povrchu. Je možné měnit tvar vnitřní chladicí dutiny, tepelnou vodivost stěny razníku aplikací izolační bariéry a lokální rychlost proudící vody vložением regulačního proudového tělesa.

Stavová úloha

V celém systému probíhají dva fyzikální procesy, jež je potřeba matematicky popsat. Jednak dochází k přenosu tepla. V pevných částech se jedná o přenos kondukcí a v dutině razníku k současnému přenosu konvekcí a kondukcí. Vedení tepla modelujeme pomocí rovnice energie. Druhým fyzikálním procesem je proudění chladicího média uvnitř dutiny razníku. Tam můžeme pro popis použít Navier-Stokesovy rovnice nebo model potenciálního proudění. Pro sestavení stavové úlohy, která popisuje komplexní proces chlazení, volíme rovnici energie, do které dosazujeme složky rychlostního pole proudící chladicí vody odvozené z potenciálního modelu. Vzhledem ke skutečnosti že celý proces je periodicky se opakující ve dvou časových periodách, kde ve dlouhé periodě pracuje forma a výlisek, a v krátké periodě razník a jeho dutina, jež obsluhují na karuselovém lisu šest forem, tak úlohu formulujeme jako stacionární pro střední hodnoty teplot tohoto periodického děje.

Precizní matematická formulace stavové úlohy a důkaz existence a jednoznačnosti jejího řešení lze nalézt v [1].

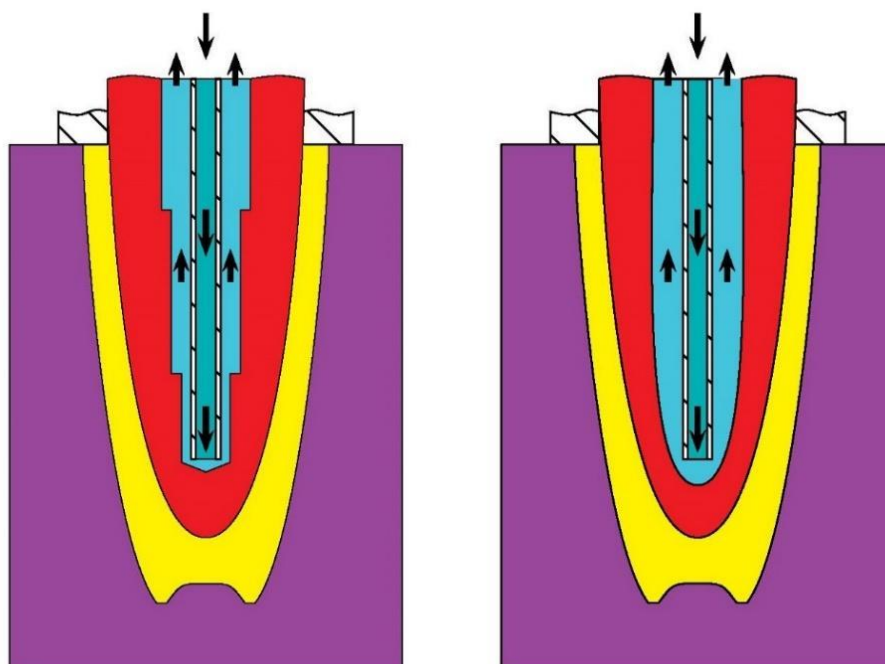
Cíl optimalizace

Cílem optimalizace je dosažení co nejvyšší kvality vnitřního povrchu výlisku. Toho lze dosáhnout rovnoměrnou optimální teplotou vnějšího povrchu razníku v okamžiku jeho separace z výlisku. K jejímu dosažení provádíme konstrukční změny v oblasti dutiny razníku. Optimalizace je prováděna vzhledem k vzdálenosti vypočítané teploty ze stavové úlohy na povrchu razníku od optimální konstantní teploty v L_2 normě.

Optimalizace tvaru dutiny razníku

Razník je zevnitř chlazen proudící vodou, která je přiváděna do spodní části dutiny a na své cestě zpět ochlazuje stěnu razníku. Poskytuje nám možnost řídit rozložení teploty podél vnějšího povrchu razníku změnou tloušťky jeho stěny. Této změny je dosaženo změnou tvaru dutiny razníku. Původní konstrukce dutiny byla vytvořena vrtáním otvorů různých průměrů a hloubek, což vedlo k vytváření vírů v proudící vodě (viz obr. 1a). Nová konstrukce značně eliminuje víření vytvořením hladkého povrchu dutiny (viz obr. 1b).

Pokud je vnější povrch razníku v některé jeho části příliš horký, lokálně zvýšíme intenzitu chlazení zúžením stěny. Naopak je-li povrch na některém místě příliš studený, snížíme intenzitu chlazení zesílením stěny. Tato strategie má svá omezení a může vést k technologicky obtížně vyrobitelnému tvaru dutiny.

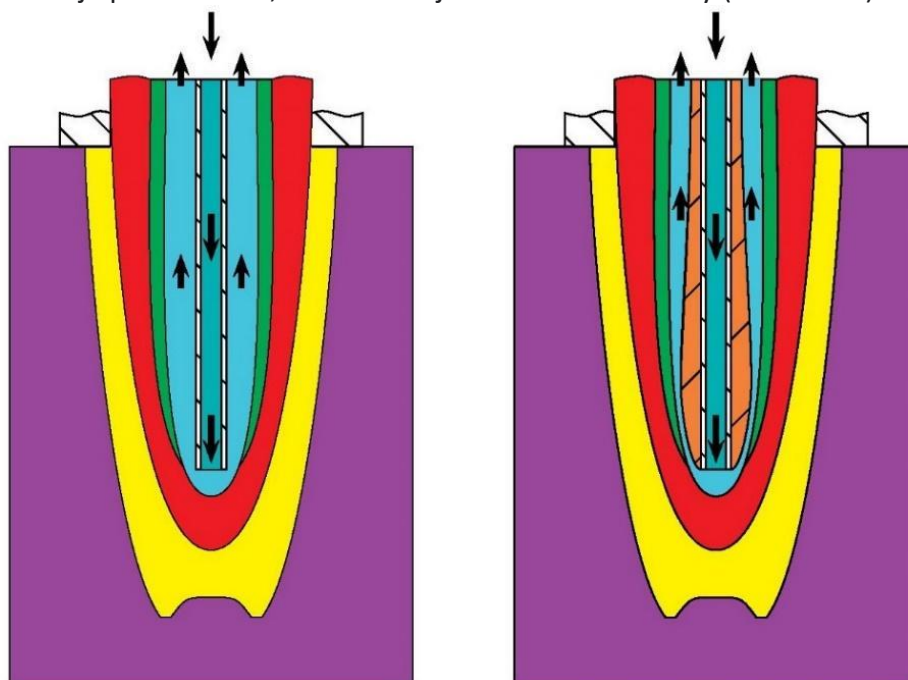


Obr. 1 a) Původní konstrukce dutiny razníku b) Razník s optimalizovanou dutinou

Matematická formulace úlohy optimálního návrhu tvaru dutiny razníku a důkaz existence jejího řešení lze nalézt v [1], numerické výsledky potom v [2].

Optimalizace tepelné vodivosti stěny razníku

Další možností regulace teploty vnějšího povrchu razníku je vložení tzv. izolační bariéry s výrazně nižší tepelnou vodivostí do dutiny razníku. Celková vodivost razníku s bariérou umožňuje dosáhnout násobně vyšší tepelný odpor stěny než při užití samostatného razníku. Lokální regulace teploty vnějšího povrchu razníku provádíme analogicky s předešlým případem, rozdíl je pouze v tom, že modifikujeme tloušťku bariéry (viz obr. 2a).



Obr. 2 a) Razník s izolační bariérou b) Razník s regulačním proudovým tělesem

Optimalizace rychlosti chladící vody v dutině razníku

Jinou možností pro řízení lokální intenzity chlazení je změna rychlosti chladícího média změnou mezery mezi vnitřním povrchem razníku a vnějším povrchem tzv. regulačního proudového tělesa (o. 2b). Tento přístup nám umožňuje dokončit předchozí strategii řízení rozložení teploty podél vnějšího povrchu razníku a zvýšit jeho efektivitu.

K tomuto účelu nahradíme plnicí trubici umístěnou v ose dutiny razníku regulačním proudovým tělesem, které vnitřním kanálem zásobuje dutinu chladící vodou. Proměnlivá velikost mezery mezi jeho vnějším povrchem a vnitřním povrchem stěny razníku mění rychlost zpětně proudící vody.

Pokud potřebujeme v některém místě vnějšího povrchu razníku intenzivnější chlazení, zmenšíme mezeru mezi vnitřním povrchem razníku a vnějším povrchem regulačního proudového tělesa. To způsobí zvýšení rychlosti chladící vody a zvýšení intenzity chlazení.

Naopak méně intenzivní chlazení je způsobeno menší rychlostí vody v širší mezeře.

Závěr

V příspěvku je prezentována pouze úloha pro optimalizaci razníku. Je třeba zdůraznit, že v praxi je potřeba optimalizovat celý systém forma, výlisek, razník a dutina razníku jako jeden celek, neboť jednotlivé části na sebe vzájemně působí. Také si musíme uvědomit, že je matematický model silnou idealizací nestacionárního periodického problému vedení tepla. To znamená, že pro získání přesnějších výsledků bychom měli uvažovat časově závislý model, kde bychom mohli aplikovat všechny výše uvedené možnosti regulace.

Literatura

- [1] SALAČ, P. Optimal design of the cooling plunger cavity. Appl. Math., Praha 2013.
- [2] SALAČ, P. Numerical solution of the pressing devices shape optimization problem in the glass industry, Appl. Math., Praha 2018.

Anotace

V příspěvku jsou prezentovány tři způsoby řízení teploty vnějšího povrchu razníku v procesu lisování velké skleněné produkce. V první části je optimalizován tvar dutiny razníku, ve druhé vodivost stěny razníku aplikací izolační bariéry s nízkou tepelnou vodivostí a ve třetí lokální rychlost chladícího média užitím regulačního proudového tělesa.

Summary

VARIANTS OF THE CONSTRUCTION OF THE PLUNGER COOLING CAVITY IN PRESSING OF LARGE GLASS PRODUCTS

The article deals with three ways of controlling the temperature of the outward surface of the plunger in the process of large glass production pressing. In the first part, the shape of the plunger cavity is optimized, in the second, the conductivity of the plunger wall by applying an insulation barrier with low thermal conductivity, and in the third, the local velocity of the cooling medium by using a regulation current body.

Charakterizace skelných vrstev na kovech pomocí konfokální mikroskopie

Jan Macháček, Diana Horkavcová, Adam Hotař, Branislav Hruška, Jiří Tesař

Abstrakt

Konfokální mikroskopii lze využít k charakterizaci nanosených vrstev. Primárně slouží ke stanovení tloušťky a homogenity vrstvy, lze jí také v principu využít pro posouzení povrchu pod transparentní vrstvou. Tato práce shrnuje zkušenosti autorů při studiu skelných vrstev na kovech. Příklady jsou z oblasti biomateriálů (bioaktivní vrstvy na titanu připravené metodou sol-gel) a koroze slitiny Fe3Al bezolovnatou sklovinou.

Ing. Jan Macháček, Ph.D., Vysoká škola chemicko technologická v Praze, Ústav skla a keramiky, Technická 5, 16628 Praha 6, e-mail: jan.machacek@vscht.cz, tel.: +420604411812

Korozní chování aluminidů železa na bázi Fe-28Al-5Si-X v bezolovnaté sklovině Crystalin

Petr Šípál, Adam Hotař, Petra Pazourková Prokopčáková, Vlastimil Hotař

Úvod

Aluminidy na bázi Fe_3Al jsou považovány za potenciální náhradu za konstrukční materiály přicházející do kontaktu se sklovinou, jež jsou běžně používány ve sklářském průmyslu. Jejich hlavní výhodou v porovnání s chromnikovými oceli je relativně nízká cena výchozích surovin, nižší hustota a výborná korozní odolnost i při vysokých teplotách. Naopak nevýhodou těchto slitin je jejich nízká houževnatost při pokojové teplotě a pokles vysokoteplotní pevnosti při teplotách nad 600 °C. Tyto nevýhody mohou být potlačeny použitím jiného než stechiometrického složení a pomocí některých legujících prvků. [1]

Dobrou korozní odolnost tyto slitiny vykazují i v agresivních prostředích, jako jsou například oxidační nebo sulfidační atmosféry, ve slaných prostředích či taveninách, parách obsahujících chlór nebo v roztavených sklovinách [2]. Interakce kovové slitiny se sklovinou a její korozní účinek jsou vyhodnocovány pomocí hmotnostního úbytku (změny váhy), protože oxidy a další korozní produkty vznikající při vzájemné interakci kovu se sklovinou jsou okamžitě odnášeny od povrchu vzorku prouděním roztavené skloviny, dokud sklovina není plně satureována. To nejčastěji způsobuje nežádoucí jevy jako je zbarvení skloviny, tvorba bublin, nehledě na nežádoucí ovlivnění vlastností samotné kovové součásti.

V případě korozního mechanismu při interakci slitin na bázi aluminidů železa s křemičitými sklovinami dominuje při tvorbě korozních produktů reakce hliníku s SiO_2 . Výsledkem této reakce jsou Al_2O_3 a Si. Malé částice křemíku pak způsobují šedý odstín skloviny. [1]

Experiment

Laboratorní korozní testy aluminidů železa Fe-28Al-5Si-X (X = B, Ti, Nb) a oceli EN X8CrNi25-21 byly provedeny v bezolovnatém křišťálovém sklu Crystalin (tab. 1). Chemické složení slitin je uvedeno v tabulce 2. Pro porovnání korozní odolnosti slitin na bázi aluminidů železa byla také korozně testována, ve sklářství běžně používaná, ocel EN X8CrNi25-21. K vyhodnocení korozní odolnosti slitin byly použity metody: vážení korozních úbytků vzorků, měření chemického složení slitin (SEM-EDX analýza) a metoda vyhodnocení pomocí parametrů popisujících „drsnotu povrchu“, využívající poznatky fraktální geometrie.

Tab. 1 Chemické složení skloviny Crystalin udávané výrobcem [3]

složka	[hm. %]	složka	[hm. %]
SiO_2	68	CaO	6
Na_2O	11	BaO	4
K_2O	6	ZnO	3
Al_2O_3	0,6	B_2O_3	0,1

Tab. 2 Chemické složení testovaných slitin Fe-28Al-5Si-X a oceli EN X8CrNi25-21

Slitina	Obsah prvků [hm. %] (at. %)					
	Fe	Al	Si	B	Ti	Nb
Fe28Al5Si1B	zbytek	16,45 (28)	3,06 (5)	0,24 (1)	-	-
Fe28Al5Si1B2Ti	zbytek	16,51 (28)	3,07 (5)	0,24 (1)	2,09 (1)	-
Fe28Al5Si2Nb	zbytek	16,03 (28)	2,98 (5)	-	-	3,94 (2)
	Fe	Cr	Ni	Mn	Mo	
EN X8CrNi25-21	zbytek	25,58 (27,22)	19,1 (18,01)	1,6 (1,61)	0,18 (0,10)	

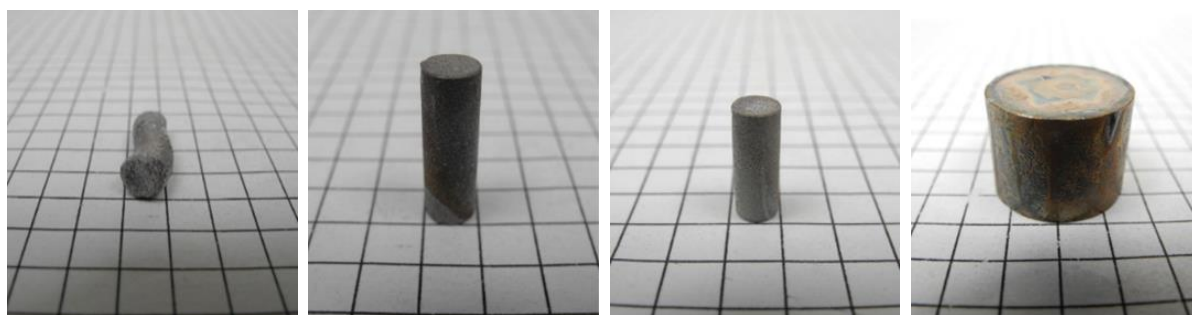
Aluminidy železa byly testovány v litém stavu. Z polotovarů byly elektrojiskrovým obráběním připraveny vzorky ve tvaru válečků. U všech vzorků byla provedena povrchová úprava broušením pomocí brusných papírů, a to až po zrnitost P1200. Všechny vzorky byly následně zváženy pomocí přesných vah (s přesností 0,0001 g) a byly změřeny jejich rozměry. Vzorky z austenitické oceli byly vysoustruženy z tyčoviny a následně broušeny stejným způsobem jako aluminidy železa.

Takto připravené vzorky byly umístěny do kelímků z korundové keramiky, zasypány střepy skla Crystalin. Poté byly kelímky se vzorky ohřáty v muflové laboratorní peci na teplotu 1266 °C po dobu 24, 48, 72 a 96 hodin. Teplota pro provedení korozního testu byla zvolena tak, aby bylo dosaženo stejné viskozity, jako u již dříve prováděných testů a bylo možné porovnávat výsledky u různých typů sklovin [1, 4-6]. Kovové slitiny konvenčně využívané ve sklářství jsou v běžném provozu vystaveny účinkům sklovin za nižších teplot (900 – 1050 °C). Vyšší teplota byla zvolena, aby byly zvýšeny účinky korozního testu vůči kovu. Po uplynutí požadované doby byly vzorky ponechány v peci, kde pozvolně chladly. Po rozbití korundových kelímků byly ze vzorků opatrně odstraněny zbytky ulpívajícího skla a vzorky byly opět zváženy na přesné váze. Po provedení korozních testů byly fotograficky zdokumentovány jak vzorky aluminidů železa, tak vzorky sklovin po interakci s kovovou slitinou, resp. její zbarvení způsobené reakcí slitiny se sklovinou. Korozní napadení bylo následně kvantifikováno pomocí hmotnostních úbytků vzorků a změn drsnosti povrchu vzorku vlivem interakce slitin se sklovinou.

Pro detailní analýzy sloužící k vyhodnocení korozního chování slitin po interakci s roztavenou sklovinou Crystalin byly použity vzorky, které byly působení sklovin vystaveny nejdelší dobu, tedy 96 hodin. Pro strukturní, chemickou analýzu a pro metodiku využívající fraktální analýzu byly připraveny metalografické výbrusy. Ke strukturní analýze byl použit kromě optického mikroskopu i mikroskop elektronový Tescan MIRA 3 vybavený energiově disperzní analýzou.

Výsledky

Z obrázku 1 je patrné, že po korozním testu ve slitině Crystalin po 96 hodinách byl povrch vzorků hladký s minimální změnou tvaru s výjimkou slitiny Fe28Al5Si1B. Vzorek této slitiny byl po korozním testu zdeformovaný a původní tvar válečku není zachován. Povrch je světle šedý s občasným světle hnědým zbarvením. Povrch slitiny Fe28Al5Si1B2Ti měl tmavě šedou barvu a je kompaktní s reliéfem malých důlků. Obdobný povrch měl i vzorek slitiny Fe28Al5Si2Nb s tím rozdílem, že barva povrchu je šedá a světle hnědá. Ocel EN X8CrNi25-21 měla na povrchu barevné mapování žlutohnědého a modrého zbarvení.



Fe28Al5Si1B

Fe28Al5Si1B2Ti

Fe28Al5Si2Nb

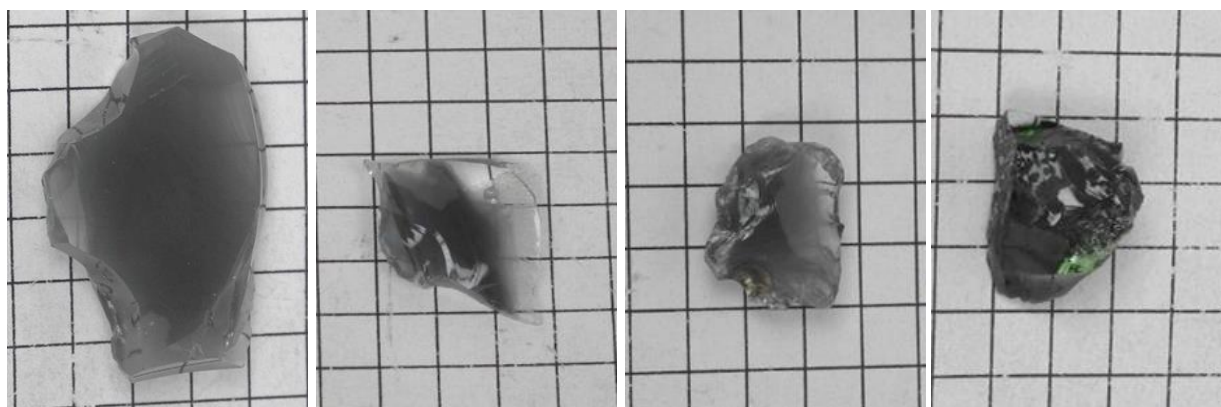
EN X8CrNi25-21

Obr. 1 Povrch vzorků po korozním testu ve sklovině Crystalin po 96 hodinách, velikost čtverců podložky je 5x5 mm

Protože je nežádoucí, aby při interakci skloviny s kovem docházelo k zbarvení skleněných výrobků, byly dokumentovány také střepy skla po korozním testu, viz tab. 3 a obr. 2.

Tab. 3 Charakteristika zbarvení skleněných střepů skloviny Crystalin po interakci s kovovými slitinami

Slitina	Zbarvení slitiny Crystalin po interakci se slitinou
Fe28Al5Si1B	tmavě šedé u vzorku, dál od vzorku je střep i čirý
Fe28Al5Si1B2Ti	tmavě šedé až černé v blízkosti vzorku, dál od vzorku je střep i čirý
Fe28Al5Si2Nb	tmavě šedé, v těsné blízkosti vzorku zlatavé zbarvení, dál od vzorku je střep i čirý
EN X8CrNi25-21	tmavě zelená u vzorku, dál od vzorku je střep i čirý, u vzorku několik bublin



Fe28Al5Si1B

Fe28Al5Si1B2Ti

Fe28Al5Si2Nb

EN X8CrNi25-21

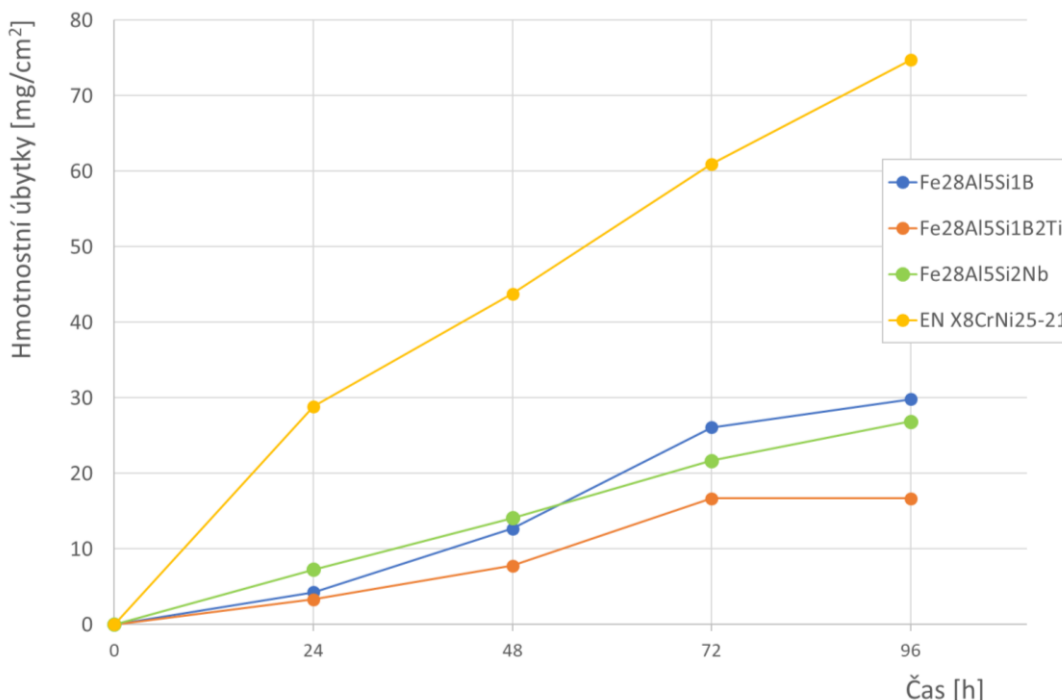
Obr. 2 Úlomky skel o korozním testu ve sklovině Crystalin po 96 hodinách, velikost čtverců podložky je 5x5 mm

Kinetika koroze

Kinetika koroze byla stanovena změnou hmotnosti vzorků (zvážením před a po provedení korozního testu) a následně byla přepočítána na jednotku plochy, viz obr. 3.

Nejprudší nárůst hmotnostních úbytků v závislosti na čase byl zaznamenán u srovnávací oceli EN X8CrNi25-21 (po 96 h byl zjištěn největší hmotnostní úbytek 75 mg/cm²), zatímco u všech slitin na bázi aluminidů železa byl nárůst hmotnostních úbytků pozvolný. U slitiny Fe28Al5Si2Nb byla závislost hmotnostního úbytku v závislosti na čase takřka lineární a u slitiny

Fe28Al5Si1B byl s časem nárůst prudší (u obou hmotnostní úbytek nepřesáhl 30 mg/cm²), tak v případě slitiny obsahující titan se průběh po době interakce se sklovinou stabilizoval a dosahoval hodnot do 17 mg/cm².



Obr. 3 Závislost hmotnostního úbytku na čase po korozních testech ve sklovině Crystalin
Změna drsnosti povrchu vlivem korozních účinků skloviny

Pro porovnání korozní odolnosti jednotlivých slitin byla kvantifikována změna drsnosti povrchu. Nejprve bylo nutné připravit metalografické vzorky. U všech bylo při stejném zvětšení nasnímáno 10 fotografií a následně vygenerována křivka rozhraní (tab. 5). Z této křivky pak byly stanoveny jednotlivé parametry – Pa - střední aritmetická úchylka [μm], Sm - střední rozteč nerovnosti profilu [μm] a D_{C1000} - obvodová dimenze [-] a jejich maximální, minimální a průměrné hodnoty. D_{C1000} - obvodová dimenze popisuje složitost křivky rozhraní jedním číslem; čím je číslo vyšší, tím je rozhraní složitější. Průměrné hodnoty těchto parametrů jsou uvedeny tab. 6. Podrobné informace o použité metodice jsou k dispozici v [4].

Tab. 5 Křivky rozhraní před korozním testem a po korozním testu ve sklovině Crystalin po 96 h

	VÝCHOZÍ STAV	po interakci se sklovinou CRYSTALIN
Fe28Al5Si1B		
Fe28Al5Si1B2Ti		
Fe28Al5Si2Nb		
EN X8CrNi25-21		

Tab. 6 Změna „vlnitosti“ povrchu slitin po korozním testu

Slitina	Střední aritmetická úchylka Pa [μm]	Max. výška nerovnosti profilu Sm [μm]	Průměrná obvodová dimenze D_{C1000} [-]
Výchozí stav			
Fe28Al5Si1B	2,06	27,5	1042
Fe28Al5Si1B2Ti	1,99	46,1	1021
Fe28Al5Si2Nb	2,12	134,7	1016
EN X8CrNi25-21	2,15	13,3	1059
Statická korozní zkouška 1266 °C/96 h ve sklovině Crystalin			
Fe28Al5Si1B	3,54	14,1	1142
Fe28Al5Si1B2Ti	4,13	23,5	1060
Fe28Al5Si2Nb	4,88	19,6	1116
EN X8CrNi25-21	1,75	51,9	1029

Hodnota Pa a D_{C1000} se po korozním testu mírně zvýšila u všech slitin na bázi aluminidů železa. Naopak u testované oceli došlo k mírnému snížení hodnoty obou parametrů (Pa a D_{C1000}). V tomto případě je pravděpodobné, že při ochlazování došlo k odtržení napadené vrstvy, a proto se jeví její povrch po korozním testu hladší. Hladší povrch po korozním testu u oceli, v porovnání s aluminidy, také potvrzuje vzrůst hodnoty Sm (méně výstupků na křivce rozhraní).

Strukturní a chemická analýza slitin na bázi aluminidů železa

Struktura aluminidů železa před a po korozním testu ve sklovině Crystalin byla sledována pomocí optické mikroskopie a SEM doplněné o EDS. Analýzy prováděné po korozním testu se soustředili především na povrch vzorku, kde docházelo k interakci mezi sklovinou a slitinou.

Všechny tři zkoumané slitiny na bázi aluminidů železa vykazovaly v litém stavu dendritickou strukturu. Ve slitině Fe28Al5Si1B byly pozorovány částice sekundární fáze, které byly identifikovány jako boridy železa Fe_2B [7] a byly distribuovány ve shlucích jak uvnitř, tak podél hranic dendritů. Částice sekundární fáze ve slitině Fe28Al5Si1B2Ti byly identifikované jako boridy titanu TiB_2 [7] a byly distribuovány ve formě řetízkovitých útvarů nebo jehlic jak uvnitř, tak podél hranic dendritů. Struktura slitiny Fe28Al5Si2Nb se lišila tím, že se částice sekundární fáze vyskytovaly především v mezidendritickém prostoru. Byly zjištěny dva typy sekundárních fází. Prvním typem jsou karbidy niobu, přítomné jak v matici, tak v eutektiku. Druhý typ tvoří eutektikum s maticí a pravděpodobně se jedná o druh Lavesovy fáze $\text{Fe}_2(\text{Nb},\text{Si})$.

Po 96 h interakci se sklovinou Crystalin nebyly na povrchu žádného z testovaných kovových vzorků zjištěny zbytky ulpívajícího skla. U slitiny Fe28Al5Si1B došlo ke snížení počtu částic boridu železa v matici. Nedošlo však k výraznějšímu poklesu obsahu hliníku v okrajové části vzorku, a to ani v porovnání se středem vzorku, ani vůči výchozímu stavu materiálu. Těsně pod povrchem byl zaznamenán mírný nárůst obsahu křemíku. Slitina Fe28Al5Si1B2Ti vykazovala po interakci obdobnou strukturu jako ve výchozím litém stavu. Došlo sice k poklesu obsahu hliníku v povrchové části vzorku, ale ve skle, které ulpělo na povrchu, nebyl zjištěn zvýšený obsah hliníku. U obou těchto slitin byl zjištěn mírný nárůst obsahu křemíku v porovnání se středem kovového vzorku. U slitiny Fe28Al5Si2Nb došlo po korozních testech (1266 °C/96 h) vlivem vysoké teploty ke koagulaci částic Lavesovy fáze a ve struktuře se nacházely rovnoměrně distribuované hrubší částice této fáze, a to jak po hranicích, tak uvnitř zrn. Obsah hliníku ve středu vzorku i na jeho okraji byl téměř shodný, ale vůči litému stavu byl zaznamenán jeho pokles.

Závěr

1. Korozní (hmotnostní) úbytky všech slitin na bázi aluminidů železa po interakci se sklovinou Crystalin nižší než u srovnávací oceli EN X8CrNi25-21.
2. Při interakci aluminidů železa se sklovinou byla dominantní reakce hliníku obsaženého v matici a SiO_2 obsaženém ve sklovině. Důsledkem je pak snížený obsah Al v aluminidech železa, a to jak na povrchu, tak v matici a zvýšený obsah Si v matici aluminidů železa v okrajových částech vzorku.
3. Aluminidy železa zbarvují sklovinu do tmavě šedého odstínu. Zbarvení je nejspíš způsobeno intermetalickými sloučeninami vznikajícími během reakce Al a SiO_2 .
4. Dvě z testovaných slitin na bázi aluminidů železa – $\text{Fe}_{28}\text{Al}_{5}\text{Si}_{1}\text{B}_{2}\text{Ti}$ a $\text{Fe}_{28}\text{Al}_{5}\text{Si}_{2}\text{Nb}$ – mají lepší korozní odolnost vůči působení roztavené slitiny Crystalin než srovnávací ocel EN X8CrNi25-21.

Poděkování

Výzkum byl podpořen v rámci Studentské grantové činnosti – Stanovení korozního mechanismu a odolnosti intermetalických slitin na bázi Fe_3Al v různých typech bezolovnatých sklovin – SGS-2022- 5022, Fakulty strojní Technické univerzity v Liberci v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu poskytované Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy v roce 2023. Tato práce byla také podpořena z projektu Hybridní materiály pro hierarchické struktury, reg. č. CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_019/0000843 (HyHi) financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy ČR a Evropskou unií – evropskými strukturálními a investičními fondy v rámci Operačního programu Výzkum, vývoj a vzdělávání.

Literatura

- [1] HOTAŘ, Adam, Petr KRATOCHVÍL a Vlastimil HOTAŘ. The corrosion resistance of Fe_3Al -based iron aluminides in molten glasses. *Kovove Mater.* 47 (4) (2009), s. 247-252. ISSN – 1338-4252.
- [2] HOTAŘ, Adam a Martin PALM. Oxidation resistance of $\text{Fe}_{-25}\text{Al}_{-2}\text{Ta}$ (at. %) in air. *Intermetallics* 18 (7): 1390-1395, 2010. DOI:10.1016/j.intermet.2010.02.014
- [3] Užité sklo pro 21. století. In: *DOCPLAYER* [online]. [Cit. 1.2.2023]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/108051025-Uzitkove-sklo-pro-21-stoleti-prezentace-urcena-proucastniky-kulaty-stul-ve-spolecnosti-crystalex-cz.html>.
- [4] HOTAŘ Adam, Petra PAZOURKOVÁ PROKOPČÁKOVÁ, Petr ŠÍPAL a Vlastimil HOTAŘ. Kvantifikace korozního napadení aluminidu železa na bázi Fe_3Al po interakci s bezolovnatou sklovinou. *Sklář a keramik*, Tanvald, Česká sklářská společnost, p. 43-47, 5 pages, ISSN: 0037-637X, n. 3-4, 2023
- [5] HOTAŘ Adam, Jiří ZÝKA, Vlastimil HOTAŘ a Vojtěch KELLER *Korozní odolnost slitin na bázi niklu a slitin na bázi kobaltu v sodnovápenaté sklovině*, Sklář a keramik, Teplice, Česká sklářská společnost, 1, p. 131-133, 3 pages, ISSN: 0037-637X, n. 7-8, 2019
- [6] HOTAŘ, Adam, Petr KRATOCHVÍL. The corrosion resistance of iron aluminide $\text{Fe}_{28}\text{Al}_{3}\text{Cr}_{0.02}\text{Ce}$ (at%) in a molten glass. *Intermetallics* 15 (3): 439-441, 2006. DOI:10.1016/j.intermet.2006.07.006
- [7] VODIČKOVÁ, Věra, Martin ŠVEC, Pavel HANUS, Šárka BUKOVSKÁ a Petra PAZOURKOVÁ PROKOPČÁKOVÁ. Fe–Al–Si-Type Iron Aluminides: On the Strengthening by Refractory Metals Borides. *Materials* [online]. 2022, 15(20), 7189. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma15207189.

Anotace

Korozní chování slitin na bázi aluminidů železa s křemíkem a dalšími legujícími prvky, jako jsou B, Ti a Nb, bylo zkoumáno ve sklovině Crystalin. Slitiny na bázi aluminidů železa si díky své vynikající korozní odolnosti a velmi dobrým mechanickým vlastnostem i při vysokých teplotách, mohou najít uplatnění právě při zpracování skla.

Korozní testy probíhaly v laboratorních podmínkách při teplotě 1266 °C a vzorky byly působení roztavené skloviny vystaveny po dobu 24, 48, 72 a 96 hodin. Jako srovnávací materiál byla použita konvenčně používaná ocel EN X8CrNi25-21. K vyhodnocení korozní odolnosti slitin bylo použito metody vážení korozních úbytků vzorků, měření chemického složení slitin (SEM-EDX analýza) a metoda pomocí parametrů popisujících „drsnost povrchu“ využívající poznatky fraktální geometrie.

Summary

CORROSION BEHAVIOUR OF IRON ALUMINIDES BASED ON Fe-28Al-5Si-X

The corrosion behaviour of iron aluminides-based alloys with silicon addition and other alloying elements such as B, Ti and Nb was investigated after the interaction with lead-free molten glass Crystalin. Alloys based on iron aluminides, thanks to their excellent corrosion resistance and very good mechanical properties even at high temperatures, can be used in glass processing.

The corrosion tests were carried out in laboratory conditions at a temperature of 1266 °C, and the samples were exposed to molten glass for 24, 48, 72 and 96 hours. The conventional steel EN X8CrNi25-21 was used as comparison material. To evaluate the corrosion resistance of alloys, the methods of weighing the corrosion loss of samples, measuring the chemical composition of alloys (SEM-EDX analysis) and the methods using parameters describing “surface roughness” using knowledge of fractal geometry were used.

Ing. Petr Šípál, katedra materiálu, Technická univerzita v Liberci, Studentská 2, 461 17

doc. Ing. Adam Hotař, Ph.D., katedra materiálu, Technická univerzita v Liberci, Studentská 2, 461 17, e-mail: adam.hotar@tul.cz, tel.: 485 353 136

Ing. Petra Pazourková Prokopčáková, katedra materiálu, Technická univerzita v Liberci, Studentská 2, 461 17, e-mail: petra.prokopcakova@tul.cz, tel.: 485 353 129

doc. Ing. Vlastimil Hotař, Ph.D., katedra sklářských strojů a robotiky, Technická univerzita v Liberci, Studentská 2, 461 17, e-mail: vlastimil.hotar@tul.cz, tel.: 485 352 929

Využití oxidických vrstev jako ochrana povrchu skla proti poškození

Michal Krafka, Totka Bakalova, Lucie Svobodová, Karel Daďourek, Robert Stránský

Úvod

Vlastnosti plazmatu při reaktivním naprašování (reaktivní formy kyslíku, včetně atomárního kyslíku, ozónu, ionizovaného kyslíku atd.) mají významný vliv na růstové chování oxidačních vrstev a vede k rozdílům ve stechiometrii, povrchové morfologii a optických vlastnostech [1]. Barva vrstev závisí jak na chemickém složení, tak na krystalové struktuře; dále je ovlivněna stechiometrií a drsností povrchu. Důležitou roli hraje volba postupů předúpravy a čištění podkladu, doba mezi čištěním a depozicí vrstev a také podmínky skladování substrátu. Nejlepší výsledek je dosažen, když je doba mezi čištěním a depozicí nejkratší.

Pokud jde o zbarvení tenkých vrstev, je také vhodné rozlišovat mezi inherentním zbarvením (např. u nitridů, karbonitridů nebo boridů) a zdánlivým zbarvením v důsledku interferenčních efektů (např. transparentní oxidy nebo ultratenké absorbující vrstvy). Zdánlivé zbarvení interferenčních vrstev (jako TiO_2 , ZrO_2) je primárně ovlivněno tloušťkou vrstvy; vrstvy s vysokým obsahem kyslíku jsou průhledné (i když mohou vykazovat zbarvení v důsledku interferenčních efektů) [2]. Vytváření vícevrstvých struktur, ve kterých jsou obsaženy různé oxidy, např. Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 [3].

Příprava oxidických vrstev

V laboratoři KMT FS, TU v Liberci bylo připraveno několik typů vrstev s cílem dosáhnout určité barevnosti povrchu a zároveň zlepšit mechanické vlastnosti povrchu (otěruvzdornost a odolnost vůči vnějšímu působení).

Předčištění skleněných substrátů

Vzorky byly čištěny jarem a vodou k hrubému odstranění nečistot. Následně bylo provedeno čištění povrchu ve dvou krocích: oplach v Isopropylalkoholu (p. a.) a v Ethanolu (99,8 %) a osušení (rozleštění laboratorními ubrousky KIMTECH). Po vysušení byly vzorky substrátu vloženy do vakuové komory na stolek.

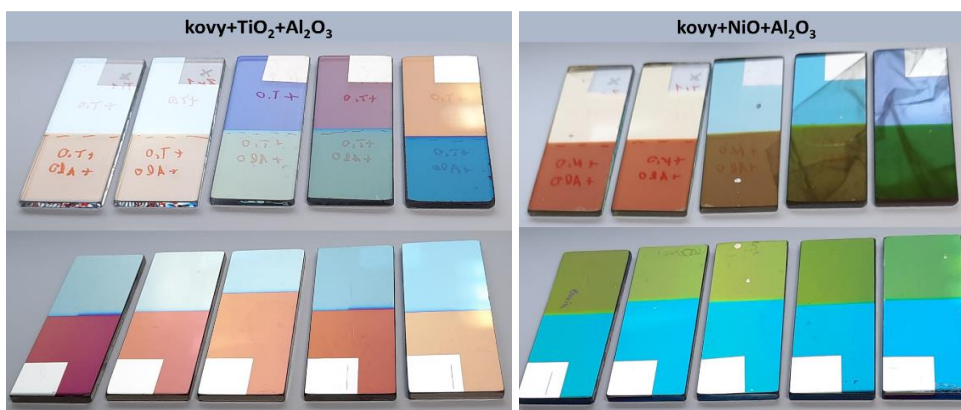
Depozice kovových vrstev

Komora byla odčerpána na primární vakuum vždy pod 0,005 Pa. Během několika vsázek do komory byla na substrátu deponována kovová podkladová vrstva z čistého kovu (Cr nebo Zr) při parametrech depozice: pracovní tlak = 0,25 Pa; průtok Ar = 40 sccm; výkon pulsního zdroje = 1,5 kW; rotace stolku se substráty = cca 2 ot/min; doba depozice = 1; 5; 10 min. (bylo vytvořeno více vsázek s rozdílnou dobou depozice k zajištění rozdílné transparentnosti/tloušťky vrstvy).

Depozice oxidických vrstev

Následně na pokovená sklíčka byly deponovány oxidové vrstvy kovů Ti, Zr, Cr, Ni, Al nebo nerez. Komora byla odčerpána na primární vakuum vždy pod 0,005 Pa. Parametry depozice byly pro všechny vsázky totožné: proces byl řízen průtoky plynů Ar = 40 sccm; O_2 = 8 sccm (pracovní tlak se pohyboval v rozmezí 0,25 – 0,31 Pa); výkon pulsního zdroje = 1,5 kW; rotace stolku se substráty = cca 2 ot/min; doba depozice = 10 min; výsledné schéma depozice = substrát, kovová vrstva, oxid kovu = varianta I.

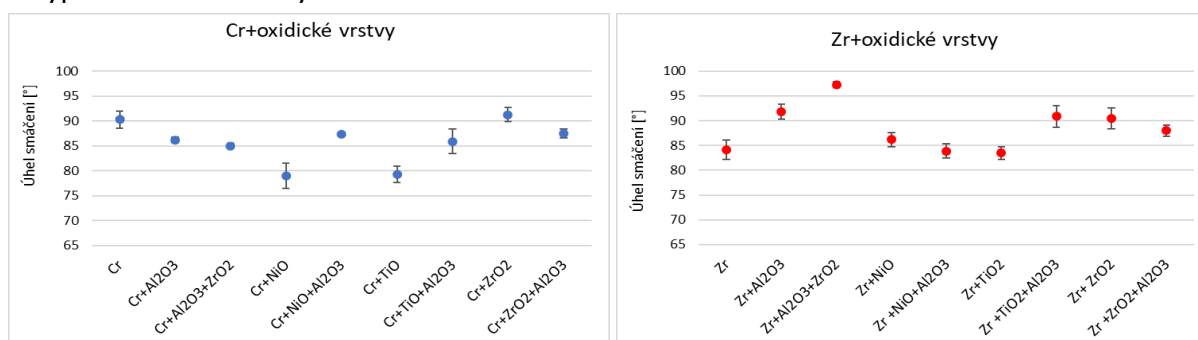
Dalším krokem bylo pokrytí malé části vzorků další oxidovou vrstvou (oxid hliníku). Tento postup se však ukázal z hlediska opotřebení povrchu jako nevhodný. Výsledné schéma depozice = substrát, kovová vrstva, I. oxid kovu, II. oxid kovu = varianta II.



Obr. 1 Znárodnění oxidických vrstev TiO_2 a NiO nanesených na kovech

Hodnocení smáčivosti povrchu tenkých vrstev

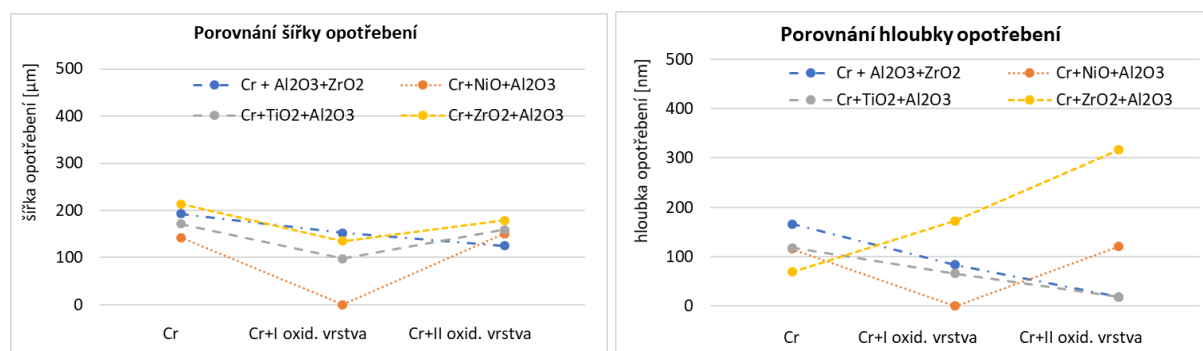
Kapková zkouška (Drop test) se provádí na přístroji *Surface Energy Evaluation System (See System)*. Zaznamenaný obraz je zobrazen v programu, který umožňuje vykreslení tvaru kapky a vypočítává tečnu k vykreslenému oblouku.



Obr. 2 Znárodnění změn úhlu smáčení po nanesení oxidických vrstev na povrchu kovu (Cr a Zr) Výsledky na obr. 2 ukazují, že nanesení oxidických vrstev na povrchu Cr (vlevo) vede ke snížení úhlu smáčení a u Zr vede k navýšení či zachování hodnotu úhlu smáčení (vpravo).

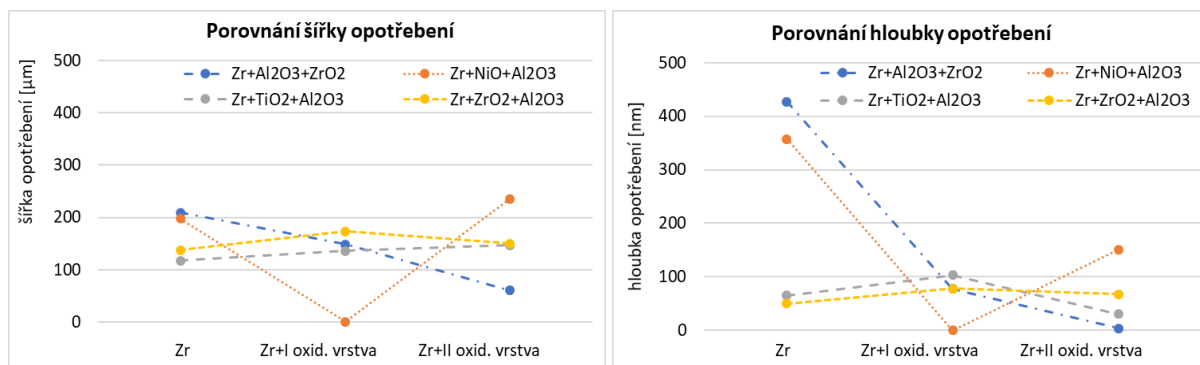
Otěruvzdornost tenkých vrstev

Tribometr pro měření třecích charakteristik TRB³ mazaných a nemazaných kontaktů v širokém rozsahu otáček a zatížení (tj. problematika třecí dvojice a míry opotřebení). Přístroj umožňuje měření dle norem ASTM G99, ASTM G133 a DIN 50324.



Obr. 3 Znárodnění změn šířky (vlevo) a hloubky (vpravo) profilu opotřebení u tenkých vrstev v porovnání se základní vrstvou Cr

Grafy na obr. 3 ukazují, že oxidická vrstva I snižuje velikost opotřebení povrchu, tj. zvyšuje odolnost kovu povrchu vůči poškození, výjimkou je ZrO_2 na Cr. Oxidická vrstva II zlepšuje otěruvzdornost jen u kombinace vrstev $Cr+Al_2O_3+ZrO_2$ a $Cr+TiO_2+Al_2O_3$ (obr. 3 vpravo).



Obr. 4 Znázornění změn šířky (vlevo) a hloubky (vpravo) profilu opotřebení u tenkých vrstev v porovnání se základní vrstvou Zr

Grafy na obrázku 4 ukazují, že oxidická vrstva I snižuje opotřebení povrchu jen u vzorků $Zr+Al_2O_3+ZrO_2$ a $Zr+NiO+Al_2O_3$. Oxidická vrstva II zlepšuje otěruvzdornost u kombinace vrstev $Zr+Al_2O_3+ZrO_2$ a $Zr+TiO_2+Al_2O_3$ (obr. 4 vpravo).

Závěr

Na KMT FS, TUL bylo připraveno několik typů vrstev s cílem dosáhnout určité barevnosti povrchu a zároveň zlepšit otěruvzdornost povrchu. Oxidické vrstvy (Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 , NiO aj.) jen velmi málo ovlivňují smáčivost povrchu, největší změna úhlu smáčení byla pozorována u vrstvy $Zr+Al_2O_3+ZrO_2$, kde došlo k navýšení na 97° . Nanesení vrstvy prvků Cr, Zr nebo jiných kovů nemají dostatečnou odolnost vůči poškození povrchu. Po nanesení oxidické vrstvy (Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 , NiO aj.) se výrazně zlepšuje otěruvzdornost a zároveň je dosaženo změny barevnosti povrchu. Nanesení další oxidické vrstvy (Al_2O_3 nebo ZrO_2) nemá prokazatelný pozitivní vliv na zlepšení otěruvzdornosti povrchu.

Poděkování

Výzkum byl podpořen projekty SGS TUL s číslem SGS-2022-5060 a „Předúprava, povlakování a ochrana substrátu“, reg. č. CZ.01.1.02/0.0/0.0/20_321/0025264 s finanční podporou MPO, „Aplikace VIII“, OP Podnikání a inovace pro konkurenceschopnost.

Literatura

- [1] XU, Wei, Xin MAO, Nan ZHOU, Qing-Yu ZHANG, Bo PENG a Yu SHEN. Effects of atomic oxygen on the growth of NiO films by reactive magnetron sputtering deposition. Vacuum [online]. 2022, 196, 110785. ISSN 0042207X, doi:10.1016/j.vacuum.2021.110785.
- [2] DA SILVA OLIVEIRA, C.I., D. MARTINEZ-MARTINEZ, A. AL-RJOUN, L. REBOUTA, R. MENEZES a L. CUNHA. Development of a statistical method to help evaluating the transparency/opacity of decorative thin films. Applied Surface Science [online]. 2018, 438, 51–58. ISSN 01694332, doi:10.1016/j.apsusc.2017.10.017.
- [3] SKOWRONSKI, L., A.A. WACHOWIAK a W. WACHOWIAK. Optical and microstructural properties of decorative Al/Ti/TiO₂ interference coatings. Applied Surface Science [online]. 2017, 421, 794–801. ISSN 01694332, doi:10.1016/j.apsusc.2017.03.276.

Anotace

Výzkum je zaměřen na vývoj oxidických tenkých vrstev jako ochrana povrchu proti poškození, zároveň i pro dekorační účely. Vrstvy byly naneseny pomocí technologie PVD (Physical Vapour Deposition) magnetronovým reaktivním naprašováním s DC (Direct Current) pulsním zdrojem. Cílem bylo zkoumat perspektivu povlaků tvořených kompozicemi kovů a oxidů s ohledem na dobrou přilnavost povlaků, odolnost vůči opotřebení a se zachováním ekologičnosti výroby. Výsledky práce přinášejí poznatky o možnostech nanášení barevně atraktivních vrstev na skleněném podkladu a hodnocen je vliv depozičních parametrů na kvalitu kompozitních povlaků. Na dekorativní povlaky jsou často kladeny zvýšené nároky, jako je ořezuvzdornost, chemická odolnost, barevnost a odrazivost (lesk). V práci je využíváno pokročilých metod charakterizace povrchů a optimalizace procesů depozice pro získání vrstev s definovanými vlastnostmi.

Summary

THE USE OF OXIDE LAYERS TO PROTECT THE GLASS SURFACE AGAINST DAMAGE

Research is focused on developing thin oxide layers as surface protection against damage and for decorative purposes. The layers were deposited using Physical Vapour Deposition technology by magnetron reactive sputtering with a Direct Current pulse source. The aim was to investigate the perspective of coatings formed by metal-oxide compositions concerning good adhesion of coatings, wear resistance, and maintaining the environmental sustainability of production. The results of the work provide insights into the possibilities of depositing color-attractive coatings on glass substrates, and the influence of deposition parameters on the quality of composite coatings is evaluated. Increased demands are often imposed on decorative coatings, such as abrasion resistance, chemical resistance, color, and reflectivity (gloss). In this work, advanced methods of surface characterization and optimization of deposition processes are used to obtain coatings with defined properties.

Ing. Michal Krafka, KMT, TU v Liberci, Studentská 2, 461 17, e-mail: michal.krafka@tul.cz

Totka Bakalova, KMT, TU v Liberci, Studentská 2, 461 17, e-mail: totka.bakalova@tul.cz

Lucie Svobodová, KMT, TU v Liberci, Studentská 2, 461 17, e-mail: lucie.svobodova@tul.cz

Karel Daďourek, KMT, TU v Liberci, Studentská 2, 461 17, e-mail: karel.dadourek@tul.cz

Robert Stránský, SANS SOUCI, s.r.o., Řeznická 656/14, Nové Město, Praha 1, e-mail:

robert.stransky@sanssoulighting.com

[illegible]



Název	Sborník abstraktů XVI. mezinárodní konference sklářské stroje a semináře kovy ve sklářských technologiích
Autoři	Kolektiv autorů (obsah)
Editor	Marie Stará
Vydavatel	Vydavatelství ČSS, s.r.o., Sportovní 554, 468 41 Tanvald
Vyšlo	v září 2023
Počet stran	56
Vydání	1.
Tiskárna	Vysokoškolský podnik, s. r. o., Studentská 2, 461 17 Liberec, ČR
ISBN	978-80-904044-5-8

Tato publikace neprošla redakční ani jazykovou úpravou.



978-80-904044-5-8