

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

XVII. MEZINÁRODNÍ KONFERENCE SKLÁŘSKÉ STROJE
17th INTERNATIONAL CONFERENCE ON GLASS PRODUCING MACHINES

A
AND

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

3. ZÁŘÍ 2026, LIBEREC, ČESKÁ REPUBLIKA
3rd SEPTEMBER 2026, LIBEREC, CZECH REPUBLIC

EDITOR: MARIE STARÁ

© 2026

Katedra sklářských strojů a robotiky, Technická univerzita v Liberci

Obsah (Content)

Sklářské stroje (Glass Producing Machines)

Schmidt Thomas, Kasch Susanne

IFW Jena, Germany

Developing processes using laser beams and automation opportunities 8

Polák Miroslav

Glass Service, Vsetín

Throat lifetime prolongation using the corrosion simulation 11

Hotař Vlastimil, Michal Starý, Patrik Flégl

Technická univerzita v Liberci

Glassticine: od ruční laboratorní výroby k automatizované lince s průběžnou pecí
Glassticine: from manual laboratory production to an automated production line with
a continuous furnace 12

Šen Hugo

Vetropack Moravia Glass, Kyjov

Tlakové ztráty a rozdíly v chlazení předních forem na řadových strojích typu AIS a NIS
v závodě Vetropack Moravia Glass, a. s. Kyjov
Pressure losses and differences in the cooling of front moulds on AIS and NIS line machines
at the Vetropack Moravia Glass, a. s. company in Kyjov 13

Kulas Václav, Petr Máslo, Helena Krutská, Eva Nováková

Preciosa Ornela, Desná, ECOGLASS, Jablonec nad Nisou, Masters of Glass, Kobyly

Od bižuterie k solární optice: Vývoj a aplikace skloviny řady LIBA
From Fashion Jewellery to Solar Optics: Development and Applications of the LIBA Glass
Series 23

Hotař Vlastimil

Technická univerzita v Liberci

Dekarbonizace výroby skla: technologie a stroje pro budoucnost
Decarbonisation of glass production: technologies and machinery for the future 25

Švejcar Filip

Technická univerzita v Liberci

Využití robotů v procesech broušení a leštění skla
The use of robots in glass grinding and polishing processes 26

Hotař Vlastimil

Technická univerzita v Liberci

AI jako nástroj, ne kouzlo: Jak (ne)používat jazykové modely v technické praxi
AI as a tool, not magic: How (not) to use language models in engineering practice 28

Kovy ve sklářských technologiích (*Metals in Glass technologies*)

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

Technická univerzita v Liberci

Korozní odolnost niklové slitiny, kobaltové slitiny a vysokolegované oceli v bezolovnatých sklovinách

Corrosion resistance of nickel alloy, cobalt alloy and high alloy steel in lead-free molten glass 29

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

Technická univerzita v Liberci

Vliv niobu na korozní odolnost aluminidů železa na bázi Fe₃Al v bezolovnatých sklovinách

The Effect of Niobium on the Corrosion Resistance of Fe₃Al-Based Iron Aluminides in Lead-Free Molten Glass 37

Faistauer Jakub, Hotař Adam, Hotař Vlastimil, Véle Filip

Technická univerzita v Liberci

Korozní odolnost 3D tištěné oceli v bezolovnaté sklovině

Corrosion resistance of 3D-printed steel in lead-free glass melt 46

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 XVII. 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 11 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 Department of Material Science of the Technical University of Liberec has provided the organisational and technical guarantee for the 17th 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.

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

The proceedings conclude 11 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

Developing processes using laser beams and automation opportunities

Thomas Schmidt and Susanne Kasch

Introduction

This article uses examples to present various developments in material processing with CO₂ laser beams and opportunities for process automation. The most extensive research and its implementation in direct industrial applications are currently focused on laser beam polishing of glass surfaces. The article explains important factors in this context, that need to be taken into account, which technology is required, and which results can be achieved.

A second topic is glass tube processing. At ifw Jena, a tube robot was developed for cutting tubes from a continuous strand; using laser radiation, it can produce clean cuts on the moving tube that require no post-processing. This will enable automated cutting processes in tube production using lasers, minimize scrap, and improve product quality.

Another area of focus involves the use of lasers in manufacturing processes that require high speeds. This involves the development of a sealing process for single-material PET packaging. This achieves 100 % recyclability and protection against counterfeiting. This is only possible with the help of laser technology.

Laser Beam Polishing

In principle, all types of glass can be polished with a laser [1], provided they are not chemically or thermally tempered. A CO₂ laser is used in combination with a laser scanner or polygon wheel and a linear axis. The laser wavelength of 10.6 μm is absorbed very well by the glass and is therefore ideal for surface polishing. Depending on the dimensions to be polished, the surface texture, and the surface geometry, lasers of various power classes are used. For larger pieces of glass, preheating is absolutely essential for the process. Due to temperature-controlled laser power regulation, laser beam polishing can easily be automated and is completely reproducible. It is particularly important to maintain a clean working environment, ideally under cleanroom conditions.



Fig. 1 Laser polishing of glass; on the left, a borosilicate glass plate (180 mm x 150 mm); on the right, a quartz cylindrical lens (100 mm x 25 mm)

Tube Robots

Regardless of glass type or dimensions, glass tubes are manufactured directly from the melt in a single-stage process. The most common methods are the Velo and Danner processes. The tubes, which emerge continuously from the melt zone, are typically cut to their final length during the drawing process by scoring and chopping. This production step is highly risky, takes place at the end of the production line, results in a high scrap rate due to glass breakage, and the broken edges generally require post-processing. For this purpose, a tube robot was developed at ifw Jena that is positioned inside the moving tube during the cutting process [2]. This ensures that the tube drawing process is not affected. The robot produces high-quality cut edges. A CO₂ laser is used, which is directed coaxially into the tube robot relative to the glass tube. The process has already been tested on quartz glass tubes. With borosilicate glass, the high drawing speeds pose a challenge and are currently being tested in the laboratory.



Fig. 2 Tube robot in laboratory testing: Laser cutting on a vertical quartz glass tube
($\varnothing = 100$ mm, $s = 3$ mm)

PET Cap

PET bottles are the global standard in the beverage industry and are widely used. In Germany alone, approximately 500,000 metric tons of PET bottles are consumed each year, of which about 98% are recycled. However, recycling is extremely labor-intensive because the cap is generally not made of PET. This is due to the material properties. PET is relatively hard and

brittle, meaning that caps made from this material cannot be designed with the standard initial seal. This is where the CO₂ laser comes into play, shrinking the cap's sealing band onto the bottle, as plastic also exhibits very high absorption at this laser wavelength. Based on research into the laser/PET interaction process and process parameters combined with rapid beam deflection, industrial systems with a capacity of 50,000 bottles per hour have now been developed [3]. Work is currently underway on process automation for industrial systems capable of handling 100,000 bottles per hour.



Fig. 3 Laser-sealed PET cap, shown on the right in the attached version 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.

References

- [1] Schmidt, T. Laser Polishing of Glass from macro to micro. 6th Conference on Laser Polishing LaP. Fraunhofer ILT Aachen. 15. bis 16.10.2024.
- [2] <https://www.ifw-jena.de/forschung/co2-laserbearbeitung/projektdetail.htm?projektID=18ECCE4DA07>
- [3] <https://www.husky.co/de/branchen/konsumguter/flaschenverschlusse/pet-closures?language=de>

Conclusion and Summary

The development work presented here demonstrates, on the one hand, the great application potential of laser technology in glass and plastic processing and, on the other hand, the ease with which this contactless, force-free tool can be automated. Many conventional processes using diamond tools or gas torches can be replaced by lasers. In addition, there are further application possibilities that can only be realized with the help of laser technology.

Thomas Schmidt, Dipl.-Ing., Research Associate in CO₂ Laser Technology, Günter-Köhler Institute for Joining Technology and Materials Testing GmbH, Ernst-Ruska-Ring 3, 07745 Jena, e-mail: tschmidt@ifw-jena.de, tel.: +49 3641 204 198

Susanne Kasch, Dipl.-Ing., Research Associate in CO₂ Laser Technology (Group Leader), Günter Köhler Institute for Joining Technology and Materials Testing GmbH, Ernst-Ruska-Ring 3, 07745 Jena, email: tschmidt@ifw-jena.de, tel.: +49 3641 204 139

Throat lifetime prolongation using the corrosion simulation

Miroslav Polák

Abstract

The throat is very often a critical part of the furnace with regards to its lifetime. Understanding the conditions there and visualizing of the throat refractories corrosion rate is therefore the key for improving it.

A real project of the collaboration between Crystalex, Glass Service and SEFPRO on a throat corrosion simulation will be shown in this presentation. The GFM (Glass furnace model) is used in this case for calculating the temperature and velocity distribution in the vicinity of throat blocks. These results are then used as boundary conditions for SEFPRO's corrosion model. An iterative approach is used to simulate time steps representing the corrosion of throat. Results of the simulations are compared with the real measurements from Crystalex after certain time of production.

Miroslav Polák, Glass Service, a. s., Rokytnice 60, 755 01 Vsetín, e-mail:
miroslav.polak@gsl.cz, tel.: +420 731 657 383

Glassticine: od ruční laboratorní výroby k automatizované lince s průběžnou pecí

Vlastimil Hotař, Michal Starý, Patrik Flégl

Anotace

Glassticine je nový multiplatformový materiál na bázi skla, vyvinutý na Technické univerzitě v Liberci a komercializovaný prostřednictvím spin-off firmy Glassiteca s.r.o. Materiál se vyrábí z odpadního skla, které dnes z velké části uniká z recyklační smyčky, a vyznačuje se otevřenou pórovitostí (30–180 μm), nasákavostí a vzlínavostí až 120 mm, chemickou inertností, nehořlavostí a zdravotní nezávadností. Technologie toleruje nestabilní chemické složení, nečistoty i míchání barev vstupní suroviny, což ji odlišuje od klasických sklářských procesů.

Příspěvek popisuje výrobní řetězec materiálu: kontrolu vstupního odpadního skla, drcení a třídění drti, mísení s pojivem a aditivu, hnětení, tvarování ve formách nebo 3D tiskem, sintraci, mechanické opracování a výstupní kontrolu. Jde o novou sklářskou technologii, pro kterou dosud neexistuje odpovídající strojní vybavení – všechny operace jsou zatím prováděny ručně v laboratorním měřítku.

Jádrem příspěvku je studie škálování ve třech krocích: bench scale (do 100 kg/měsíc), poloautomatizovaný mini-plant (do 1 000 kg/měsíc) a pilotní plně automatizovaná linka (desítky tun/měsíc). Diskutovány jsou limitující faktory jednotlivých fází, zejména dávkové tepelné zpracování v poklopové peci s cyklem přibližně 22 h umožňujícím jedinou kampaň denně, a jeho nahrazení průběžnou pecí s nepřetržitým režimem výhřevu, výdrže a chlazení. Uvedena je změna struktury nákladů, kdy automatizace snižuje podíl mzdových nákladů z téměř 48 % na 11 % a hlavní položkou se stávají odpisy zařízení. Výsledkem škálování je snížení ceny za kus o 75 až 80 % při odhadované investici do pilotní linky 1,5 mil. €.

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.: 485 356 604

Ing. Michal Starý, Ph.D., Katedra sklářských strojů a robotiky, Technická univerzita v Liberci, Studentská 2, 461 17, e-mail: michal.stary@tul.cz, tel.: 485 356 609

Ing. Patrik Flégl, Glassiteca, Studentská 2, 461 17 Liberec, e-mail: info@glassiteca.eu

Tlakové ztráty a rozdíly v chlazení předních forem na řadových strojích typu AIS a NIS v závodě Vetropack Moravia Glass, a. s. Kyjov

Hugo Šen

Úvod

Jedním z faktorů limitujících výrobní rychlost na řadových IS strojích je množství tepla odvedeného ze skloviny během pracovního cyklu stroje. Množství spotřebovaného chladicího vzduchu a požadovaný tlak určují spotřebu energie ventilátoru. Z hlediska snížení nákladů na vyrobenou jednotku je žádoucí cíleně hledat a dlouhodobě podporovat taková technická řešení, která vedou k nízké spotřebě energie při zachování vysoké výrobní rychlosti i kvality výrobků.

Podnik Vetropack Moravia Glass, a. s. provozuje na všech linkách výrobní zařízení – řadové stroje – firmy Bucher Emhart Glass, přičemž již více než 30 let využívá systém chlazení forem Vertiflow. V současnosti vyrábí převážně na strojích AIS DG 6,25" a AIS TG 4,25". V roce 2023 byly instalovány nové servo-stroje NIS TG 5", a to jako první v celé skupině Vetropack.

Převedení části výroby na nové stroje NIS přineslo celou řadu výzev, ale zároveň i cenné zkušenosti, poznatky a možnost porovnání výrobního výkonu se stroji AIS. Při výrobě některých lahví o objemu 0,5 l a 0,75 l musela být snížena výrobní rychlost z důvodu nedostatečného chlazení předních forem (PF), zejména v letních měsících. Ani zvýšení frekvence elektromotoru ventilátoru z 50 Hz na 55 Hz nevedlo ke zlepšení situace.

Následně byly hledány příčiny tohoto stavu a možnosti nápravy. Autor se proto začal zabývat porovnáním PF z hlediska termohydraulických vlastností a tlakových ztrát na strojích Emhart, a to v provedení AIS DG 6,25" s vybavením Vertiflow a Invertiflow a NIS TG 5" s vybavením Invertiflow. Velikost tlakových ztrát ventilátorového vzduchu na sekcích strojů nebyla ve VMG doposud známa. Měření tlaku vzduchu před vstupem do PF nebylo běžnou praxí. Konstrukce předních i konečných forem vycházela z osvědčených schémat a konstrukčních katalogů Emhart, aniž by byly blíže zkoumány termohydraulické vlastnosti kanálů PF Vertiflow v návaznosti na konkrétní stroj a výrobek.

Jedním z předmětů zájmu autora proto bylo stanovení ztrátových součinitelů, které by charakterizovaly míru tlakových ztrát a znehodnocené energie v přívodu chlazení předních forem (PF). Pro oba stroje byly vypočteny bezrozměrové součinitele tlakových ztrát a zkoumány další provozní okolnosti chlazení PF, včetně termohydraulických výpočtů provedených chladicích kanálů na formách.

Teoretické základy

Tlakové ztráty se v inženýrské praxi dělí na ztráty třením a ztráty místními odpory. Stanice stroje spolu s přívodními kanály vzduchu k přední formě tvoří složitou soustavu s ohyby proudu a četnými změnami průtočného průřezu. Bylo proto účelné zavést jeden souhrnný součinitel ztrát ζ . Tlaková ztráta se pak vyjádří rovnicí

$$\Delta p = \zeta \frac{w^2}{2} \rho \quad (1)$$

kde Δp (Pa) je ztráta tlaku na sledovaném úseku, w (m/s) je rychlost proudění a ρ je hustota vzduchu. Součinitel ztrát ζ je bezrozměrový a považuje se za prakticky nezávislý na rychlosti proudění. Tato rovnice je formálně shodná s rovnicí pro výpočet ztrát místními odpory. K přímému výpočtu tlakové ztráty musí být součinitel ζ předem znám. Bohatým pramenem, který se detailně zabývá tlakovými ztrátami a uvádí velké množství rozličných případů z praxe, je Idělčík [1]. Nahlédneme-li ještě na ztráty třením, je známo, že v přechodové oblasti turbulentního proudění závisí ztrátový součinitel na poměrné drsnosti kanálu a na Reynoldsově čísle. V oblasti silně turbulentního proudění už ztrátový součinitel na Re číslo nezávisí, ale pouze na poměrné drsnosti. Součinitel třecích ztrát se obvykle označuje písmenem λ .

Součinitel místních ztrát ζ jako bezrozměrové podobnostní kritérium

$$\zeta = \frac{p_0 - p}{\frac{1}{2} w^2 \rho} \quad (2)$$

vyjadřuje poměr dvou tlaků: v čitateli je rozdíl celkového tlaku před zkoumaným místem a za ním, ve jmenovateli je dynamický tlak. Podobně je definováno Eulerovo kritérium podobnosti (známé spíše z teorie lopatkových strojů)

$$Eu = \frac{\Delta p}{w^2 \rho} = \frac{\zeta}{2} \quad (3)$$

Celkový, tj. stagnační tlak, je součet tlaku statického a dynamického

$$p_c = p_s + p_d = p_s + \frac{1}{2} w^2 \rho \quad (4)$$

Tlak p_0 je celkovým a zároveň statickým tlakem. p_d je tlakem celkovým a současně dynamickým, neboť v místě výtoku je hodnota statického tlaku rovna 0 Pa (výtok do atmosféry).

Součinitel ζ se vždy vztahuje k průřezu, kde byl měřen dynamický tlak. Obvykle to bývá nejužší místo, kde je rychlost proudění největší. Aby bylo možné porovnat součinitele ζ získané u různých strojů, byly hodnoty vztaženy pomocí rovnice kontinuity na tzv. normovaný průřez S_n s ekvivalentním průměrem $d_n=40 \text{ mm}$ podle rovnice

$$\zeta_n = \zeta \left(\frac{S_n}{S} \right)^2 \quad (5)$$

Všechny veličiny s indexem n se vztahují k tomuto normovanému průřezu. Obecně platí, že proudění, které splňuje podmínku Machova čísla $Ma < 0,3$, lze považovat s dostatečnou přesností jako nestlačitelné. Pak také platí rovnice kontinuity ve tvaru $w_n \cdot S_n = w \cdot S$, kde w je rychlost proudění a S je průtočný průřez.

Při zastavení průtoku uzavřením komory se obecně mění podmínky soustavy ventilátor–potrubní trasa–stanice stroje a mění se i poloha pracovního bodu. Protože byla změna množství malá ve srovnání s celkovým průtokem ventilátoru, lze předpokládat, že pracovní bod a tlak p_0 se změnil pouze zanedbatelně.

Metodika měření

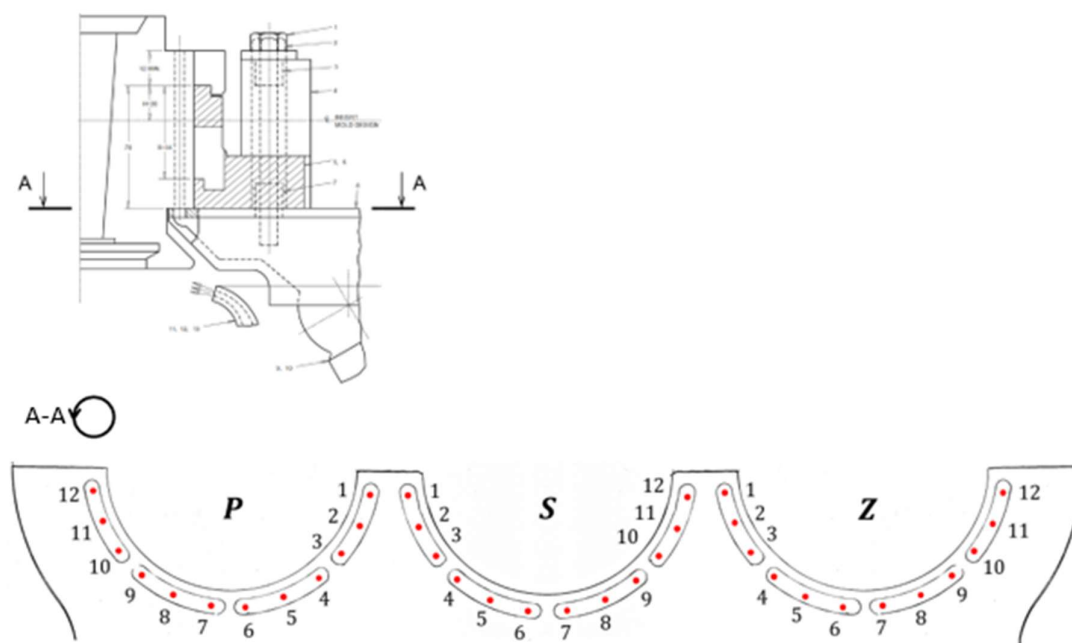
Ve smyslu rovnice (2) byl měřen celkový tlak bez proudění (v klidu) a dále dynamický tlak vzduchu na výstupu ze štěrbin komory (plenum, chamber) do okolí, který je v tomto místě totožný s tlakem celkovým. Měření probíhalo vždy za normálního provozu stroje, kdy krajní stanice nebyly v činnosti. Na zvolené stanici stroje byly nasazeny komory přívodu chladicího vzduchu, stejně jako v běžném provozu, avšak bez PF. Po otevření klapky přívodu vzduchu byl odměřen dynamický tlak p_d pomocí Pitotovy trubice $\varnothing 1,6$ mm v místech volného výtoku, naznačených na Obr. 1, 2, 3. V každé z výtokových štěrbin komor Invertiflow bylo měřeno na 3 místech, na štěrbinách komory Vertiflow na 4 místech.

Hodnota celkového statického tlaku na vstupu do sekce p_0 byla změřena při uzavřeném průtoku. Střední hodnota dynamického tlaku p_d ze souboru naměřených n hodnot byla vypočtena tak, aby byla správně zachována kvadratická závislost tlaku na rychlosti proudění podle rovnice

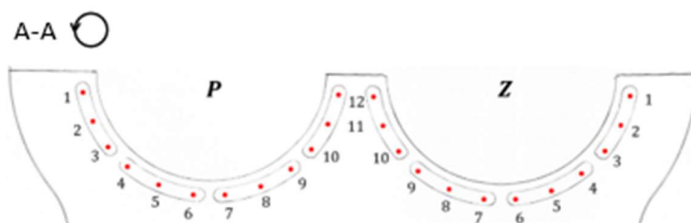
$$\overline{p_d} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{p_i} \right)^2 \quad (6)$$

Ztrátové součinitele pak byly vypočteny v souladu s definicí bezrozměrového kritéria (2) jako podíl celkového tlaku před vstupem do sekce, zmenšeného o tlak dynamický, a dynamického tlaku na výstupu

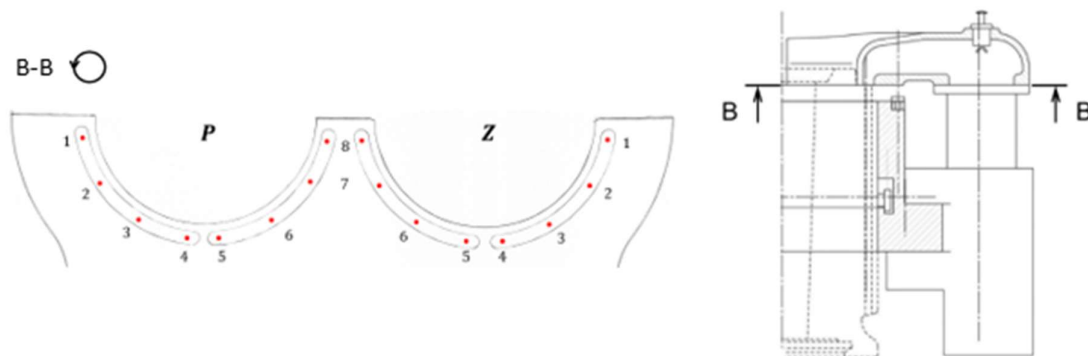
$$\zeta = \frac{p_0 - \overline{p_d}}{\overline{p_d}} = \frac{p_0}{\overline{p_d}} - 1 \quad (7)$$



Obr. 1 Komora (plenum) stroje NIS TG a sestava na stroji při výrobě s chlazením Invertiflow (nahore vlevo). Tvar štěrbin pro přívod chladicího vzduchu k předním formám (dole). Naznačena jsou místa měření dynamického tlaku na štěrbinách komory. Měření dynamického tlaku Pitotovou trubicí provedeno v bodech naznačených symbolem • na každé štěrbině. P, S, Z označuje přední, střední a zadní formu na stroji NIS TG. Vpravo nahore je sestava na stroji s komorou Vertiflow.



Obr. 2 Komora (plenum) stroje AIS DG Invertiflow a číslování bodů měření



Obr. 3 Komora (plenum) stroje AIS DG Vertiflow a číslování bodů měření. Vpravo sestava na stroji.

Nejistoty měření

Provedená měření na strojích, jak je popsáno v tomto příspěvku, nedovoluje stanovit nejistotu měření skutečně spolehlivým způsobem. I když se zdá, že jsou všechny sekce strojů stejné, v praxi se mnohokrát ukázalo, že se podmínky na stejně provedených, ale různých strojích mohou lišit. Tyto odlišnosti nemusí být apriori snadné objasnit. Aby byla získána alespoň přibližná představa o velikosti nejistot měření použitým měřidlem, bylo postupováno níže uvedeným způsobem.

Standardní nejistota měření typu A byla stanovena z opakovaných měření. Do jednoho místa u štěrby komory za ustálených podmínek byla 21x opakovaně přikládána Pitotova trubice a odečítána hodnota dynamického tlaku. Směrodatná odchylka z těchto měření vykazovala hodnotu $s_A(p) = 84,2 \text{ Pa}$. Tím je vyjádřena variabilita polohy sondy vůči vytékajícímu proudu. Standardní nejistota typu B vycházela z použitého měřidla; použitý tlakoměr splňující normu EN 837-3 byl s vlnovcem pro měření plynu, tlumený glycerínem, s rozsahem (0 až 16) kPa a třídou přesnosti 1,6 % z rozsahu měřidla. Odečítaná náhodná proměnná z rozsahu tlakoměru má rovnoměrné rozdělení. Směrodatná odchylka standardní nejistoty typu B proto je

$$s_B(p) = \frac{\delta}{\sqrt{3}} = \frac{16\,000 \text{ Pa} \cdot 0,016}{\sqrt{3}} = \frac{256 \text{ Pa}}{\sqrt{3}} \doteq 148 \text{ Pa} \quad (8)$$

Kombinovaná nejistota měření tlaku je pak

$$s(p) = \sqrt{s_A^2 + s_B^2} = \sqrt{84,2^2 \text{ Pa}^2 + 148^2 \text{ Pa}^2} \doteq 170 \text{ Pa} \quad (9)$$

Směrodatná odchylka nejistoty měření ztrátového součinitele ζ byla stanovena z Gaussova zákona šíření nejistot

$$s^2(X) = \sum_i \left(\frac{\partial f(X_i)}{\partial X_i} \right)^2 s^2(X_i) \quad (10)$$

kde po dosazení $\zeta = p_0 / (p_d - 1)$ je směrodatná odchylka ztrátového součinitele ζ určena vztahem

$$s(\zeta) = s(p) \sqrt{\frac{1}{p_d^2} + \frac{p_0^2}{p_d^4}} \quad (11)$$

Nejistota měření pak byla rozšířena koeficientem $k = 2$, kdy za předpokladu normálního rozdělení náhodných veličin vzniklý interval obsáhne skutečnou nejistotu s pravděpodobností přibližně 95 %.

Naměřené hodnoty na strojích

Na komorách Invertiflow bylo měření dynamického tlaku provedeno v každé štěrbině komory ve třech místech: na krajích a ve středu délky štěrbin. Tak bylo získáno 12 hodnot pro každou polovinu formy a jedna hodnota tlaku p_0 při uzavření štěrbin. U komor Vertiflow stroje AIS DG bylo měřeno na každé štěrbině ve čtyřech místech, viz Obr. 3. Z takto změřených hodnot byly vypočítány střední hodnoty ztrátových součinitelů ζ , charakterizující oba typy strojů. Vybrané hodnoty na strojích AIS a NIS jsou shrnuty v Tab. 1. Na první pohled je zřejmé, že se hydraulické ztráty na obou strojích významně liší.

Tab. 1 Zjištěné střední hodnoty ztrátových součinitelů a některých vybraných veličin.

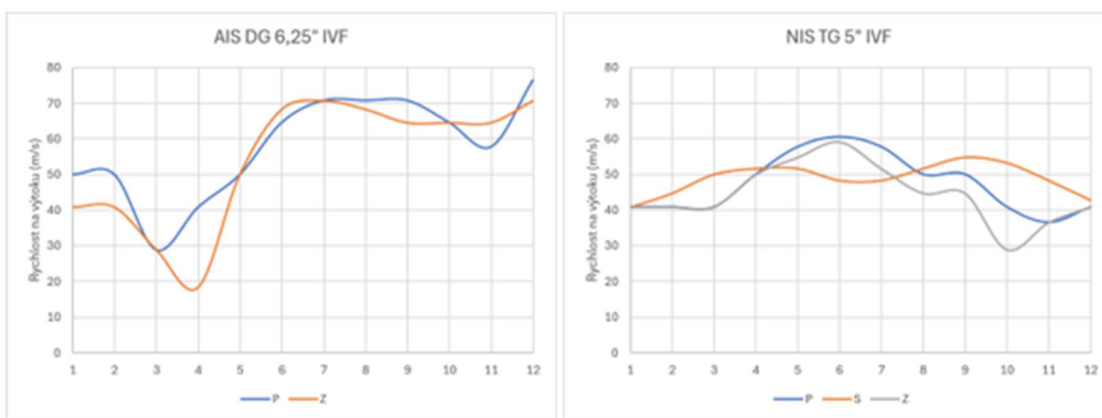
	AIS		NIS	
	Vertiflow	Invertiflow	Invertiflow	
p_0	11 500	9 500	10 000	Pa
p_d	1 947	1 918	1 317	Pa
w	57,0	56,5	46,8	m/s
ζ	4,91	3,95	6,59	-
w_n	65,2 ± 4,4	67,2 ± 5,1	39,0 ± 3,3	m/s
ζ_n	3,75 ± 0,80	2,80 ± 0,63	9,50 ± 2,85	-

Nerovnoměrnost distribuce proudění

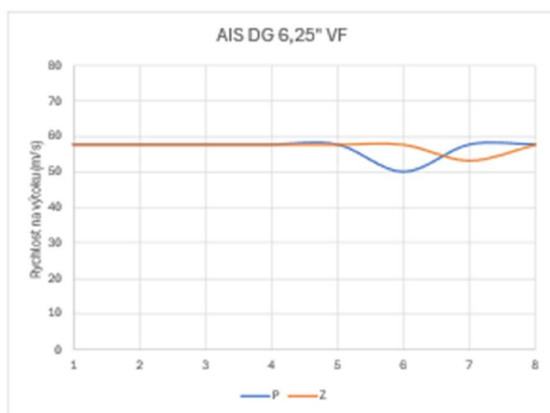
Dále bylo zjištěno, že distribuce proudění přes výtokové štěrbinu při plném průtoku není v případě komor Invertiflow stejnoměrná. Rychlost proudění vykazuje nápadný pokles u vnějších okrajů komory na obou strojích. Situace je znázorněna na Obr. 4. U stroje NIS TG byly také pozorovány nestejně střední hodnoty rychlosti proudění; jsou vyšší u prostřední formy než na obou krajních formách. Provozní zkušenosti tuto skutečnost potvrzují, neboť prostřední forma bývá u forem s nízkým ζ_n (nízký hydraulický odpor) studenější, někdy až o 20 °C. Přívod vzduchu NIS stroje pro každou z forem se nedá individuálně ovládat, nezávislé jsou pouze levá a pravá strana, což je z hlediska řízení procesu tvarování nevýhodné.

Na stroji AIS DG v případě Vertiflow se rychlostní pole přes plochu štěrbin jeví téměř homogenní, viz Obr. 5. Patrně se tak děje proto, že komora Vertiflow má dobře dimenzovaný průřez, a proto nedochází k lokálním poklesům statického tlaku. U stroje AIS DG je střední hodnota průtoku pro obě PF srovnatelná. Lze tedy očekávat, že odvod tepla z obou forem i při velkém průtoku bude prakticky shodný. Velkou výhodou je možnost ovládat každou polovinu formy nezávisle, takže se případné rozdíly teplot na PF dají snadno vyrovnat.

Ztrátové součinitele s ohledem na P/S/Z pozici formy na stanici jsou shrnuty v Tab. 2 a Tab. 3.



Obr. 4 Rozdělení výtokové rychlosti na štěrbinách komor Invertiflow (IVF). Číslování na vodorovné ose odpovídá značení bodů měření na Obr. 1 a 2.



Obr. 5 Rozdělení výtokové rychlosti na štěrbinách komor Vertiflow (VF) stroje AIS DG 6,25". Číslování na vodorovné ose odpovídá bodům na Obr. 3

Tab. 2 Ztrátové součinitele podle pozic forem na stroji NIS TG Invertiflow

NIS	Přední	Střední	Zadní	$\bar{\zeta}$
ζ	6,47	5,98	7,43	6,59
ζ_n	9,33	8,62	10,70	9,50

Tab. 3 Ztrátové součinitele podle pozic forem na stroji AIS DG

AIS	Komora Invertiflow			Komora Vertiflow		
	Přední	Zadní	$\bar{\zeta}$	Přední	Zadní	$\bar{\zeta}$
ζ	3,88	4,03	3,95	4,95	4,86	4,91
ζ_n	2,75	2,85	2,80	3,78	3,71	3,75

Ztrátové součinitele PF a provozní podmínky na stroji

Provedení kanálů Vertiflow nebo Invertiflow na formách zásadně ovlivňuje množství odvedeného tepla a také měrnou spotřebu chladicího vzduchu. Pro účely termohydraulických výpočtů kanálů Vertiflow a Invertiflow vytvořil autor jednoúčelový program, který dovoluje detailně porovnávat různá provedení kanálů s různými okrajovými podmínkami. Tak bylo možné hodnotit chování předních forem s různými kanály na obou strojích a hledat optimální provedení chladicích kanálů, kdy je množství energie vynaložené na proudění vzduchu nejmenší při zadaném požadavku na odváděný tepelný tok.

Pro představu jsou v Tab. 4 uvedeny některé vypočtené hydraulické parametry pro dva případy provedení kanálů: $\varnothing$ 5 mm a $\varnothing$ 7 mm délky 150 mm na dvou různých strojích. Tlak chladicího vzduchu je shodně 10 kPa na vstupu do sekcí stroje.

Tab. 4 Porovnání vybraných parametrů a průtoku vzduchu s PF v provedení Invertiflow (IVF) při tlaku 10 kPa na vstupu do stroje. Délka kanálů PF je 150 mm. ζ_{nf} je ztrátový součinitel PF, $\Sigma \zeta_{nf}$ je souhrnný ztrátový součinitel stroje a PF, w_n je rychlost proudění, Δp tlaková ztráta na sekci stroje (kromě PF), p_{of} je celkový tlak na vstupu do PF, Q_s je spotřeba chladicího vzduchu pro jednu PF.

STROJ	32 kanálů/PF	ζ_{nf} (-)	$\Sigma \zeta_{nf}$ (-)	w_n (m/s)	Δp (Pa)	p_{of} (Pa)	Q_s (Nm ³ /h)
NIS 5" IVF	$\varnothing$ 7 mm	16,4	25,9	25,4	3 668	6 330	230
	$\varnothing$ 5 mm	63,4	72,9	15,1	1 303	8 700	137
AIS 6¼" IVF	$\varnothing$ 7 mm	16,4	19,2	29,5	1 457	8 540	267
	$\varnothing$ 5 mm	63,4	66,2	15,9	423	9 580	144

Vlastnosti sekcí strojů z hlediska odlišných tlakových ztrát způsobují, že se stejně provedené PF chovají při odvodu tepla odlišným způsobem, tzn. že teplota forem se nápadně liší, ačkoliv je časování chlazení shodné. Pro příklad jsou v Tab. 5. uváděny rozdíly v množství objemového množství vzduchu, pokud se změní průměr kanálů PF a pokud stejně provedené formy nasadíme na stroj AIS a NIS.

Tab. 5 Změna průtoku chladicího vzduchu v PF podle výpočtů autora.

ø 5 mm >>> ø 7 mm		AIS >>> NIS	
NIS	+68 %	ø 5 mm	-5 %
AIS	+86 %	ø 7 mm	-16 %

Konstrukční katalogy [2], [3] uvádějí rozdílné průměry kanálů podle typu stroje. Na stroji NIS TG 5" jsou to kanály ø 5 mm v maximálním počtu 32 na jedné přední formě. V katalogu pro stroj AIS DG 6,25" se uvádí kanály ø 6 mm nebo ø 7 mm v počtu 32 (podle velikosti formy).

U výrobků, které v podniku přecházely ze stroje AIS DG na stroj NIS TG, zůstaly zachovány kanály chlazení i tvar dutiny PF stejně, jako byly ověřeny praxí na strojích AIS DG. Změněny byly pouze rozměry a tvar forem, aby odpovídaly uložení v držáku stroje. PF s kanály ø 7 mm, osvědčené na strojích AIS, nestačily odvádět teplo u některých výrobků na strojích NIS při stejných podmínkách tlaku vzduchu na vstupu do sekcí. Navíc se projevila výše uvedená nerovnoměrnost průtoku mezi P/S/Z formou v rámci sekce jako rozdíl teplot forem na sekci.

Teplo se z PF neodvádí pouze nucenou konvekcí kanály. Určitá část tepla, ale nikoliv zanedbatelná, se odvádí vedením a zářením. Ani stejný průtok vzduchu chladicími kanály nezaručuje stejnou teplotu všech tří forem na sekci. Jedním z vysvětlení může být fakt, že prostřední forma má vůči krajním formám symetrii, kdežto krajní formy vůči okolí nikoliv. V jistém smyslu tedy existuje přibližně adiabatická podmínka prostřední formy vůči formám krajním. Jako projev tohoto uspořádání je uvedeno měření teploty v Tab. 6 se středními hodnotami a směrodatnými odchylkami, kde prostřední formy byly nejteplejší. Rozdíly teploty vznikly i v opačném smyslu, kdy prostřední PF měly teplotu pracovního povrchu až o 20 °C menší. Rozdíly byly tím větší, čím menší ztrátový součinitel měla nasazená forma, viz Tab. 7. To naznačuje nerovnoměrnost tlakového pole v komoře při velkém průtoku vzduchu, takže výraznější proudění v prostřední PF má větší váhu jako vliv nesymetrie. U forem s kanály ø 5 mm, které mají silný hydraulický odpor se efekt proudění sice významněji neprojevuje, ovšem množství odvedeného tepla je omezeno a nemusí u některých výrobků stačit.

Tab. 6 Naměřené teploty PF s kanály ø 7 mm ve výrobě na stroji NIS systémem Emhart TCS. Na stroji zapnuta automatická regulace teploty. E(X) je střední hodnota z n měření na celém stroji, s(X) výběrová směrodatná odchylka.

	P	S	Z	
E(X)	467,5	473,3	467,6	°C
s(X)	3,7	4,4	3,0	°C
n	40	40	40	-

Tab. 7 Intervalové odhady rozdílů středních hodnot naměřených teplot PF při různých velikostech tlakových ztrát v kanálech. Data pocházejí z jedné výroby na stroji NIS a byla získána systémem Emhart TCS. Na stroji byla zapnuta automatická regulace teploty; regulátor ovládá nezávisle levou a pravou stranu trojice forem na každé sekci. Uvedené intervaly představují 95% intervaly spolehlivosti rozdílů středních hodnot. Symbol n označuje počet měření v jednotlivých souborech.

$\zeta_{n,f} >>$	16,4	10,8	10,0	-
S – P	$5,6 \pm 1,6$	$25,1 \pm 2,8$	$21,9 \pm 3,7$	°C
S – Z	$5,8 \pm 1,8$	$13,9 \pm 2,0$	$10,0 \pm 3,8$	°C
Z – P	$0,1 \pm 1,5$	$11,2 \pm 3,0$	$11,9 \pm 4,9$	°C
n	3 x 40	3 x 16	3 x 12	-

Závěr

Byla provedena měření ztrátových součinitelů na strojích AIS DG 6,25“ Vertiflow a Invertiflow a NIS TG 5“ Invertiflow. Oba stroje mají výrazně odlišnou tlakovou ztrátu a distribuci proudění v obvodovém směru přední formy. Ačkoliv je NIS stroj nově koncipovaným a moderním servo-strojem, vykazuje vyšší tlakové ztráty a citelně nerovnoměrné rozdělení průtoku vzduchu do PF. Tato nevýhoda je navíc umocněna tím, že všechny tři poloviny PF mají společný přívod chladicího vzduchu, ovládaný jednou klapkou. Nelze tedy regulovat teplotu předních forem nezávisle. Regulovat je možné pouze levou a pravou stranu.

Naproti tomu je AIS stroj koncipován tak, že umožňuje regulaci průtoku chladicího vzduchu do PF do každé poloviny forem odděleně. To je pro tvarování výhodné, protože umožňuje vyrovnat teplotu PF podle potřeb procesu tvarování. Tato výhoda se projevuje nejvíce v technologii úzkohrdlého lisofoukání.

Vlastnosti stroje NIS si pro některé výrobky vynutily provedení nového návrhu zvláštních chladicích kanálů, který zajistil dostatečně velký odvod tepla a nízkou měrnou spotřebu vzduchu.

Literatura

- [1] Idělčik, I. E. Spravočnik po gidravličeskim soprotivlenijam. 3. přepracované a doplněné vydání. Moskva: Mašinostrojenije, 1992. 632 s. ISBN 5-217-00393-6.
- [2] EMHART GLASS SA. AIS 6 1/4 Double Gob Mold Design Data. H35200EEN. Rev. E. Švýcarsko: Emhart Glass SA, 2017. Interní technická dokumentace.
- [3] EMHART GLASS SA. NIS Triple Gob 5: Mold Design Data. HE35001GEN. Rev. 2021. Švýcarsko: Emhart Glass SA, 2021. Interní technická dokumentace.

Anotace

Příspěvek porovnává řadové sklářské stroje AIS a NIS z hlediska hydraulických vlastností přívodu chladicího vzduchu k předním formám. V úvodu stručně představuje koncepci obou strojů a upozorňuje na zásadní konstrukční rozdíly, které ovlivňují proudění vzduchu. Následně jsou prezentovány autorem naměřené hodnoty rozdělení průtoku vzduchu na přívodu ke komorám a předním formám systémů Vertiflow a Invertiflow. Z naměřených hodnot dynamického tlaku jsou stanoveny součinitele tlakových ztrát ζ , resp. hodnoty Eulerova podobnostního kritéria. Tyto výsledky umožňují vyhodnotit omezení průtoku chladicího vzduchu u strojů AIS a NIS při známých parametrech chladicího ventilátoru stroje a konstrukce forem.

Praktické důsledky zjištěných rozdílů jsou doloženy na příkladu výroby vybrané láhve 0,5 l na obou typech strojů. Příspěvek diskutuje varianty provedení chladicích kanálů předních forem Vertiflow a Invertiflow, limity průtoku a odvodu tepla i možné cesty ke zvýšení účinnosti chlazení.

Zvláštní pozornost je věnována nerovnoměrnému rozdělení průtoku vzduchu u strojů s vybavením IVF, jeho vlivu na provozní teplotu forem a důsledkům pro podmínky tvarování skloviny.

Ing. Hugo Šen, Vetropack Moravia Glass, akciová společnost, Havlíčkova 180, 697 01 Kyjov, ČR,
e-mail: hugo.sen@vetropack.com

Od bižuterie k solární optice: Vývoj a aplikace skloviny řady LIBA

Václav Kulas, Petr Máslo, Helena Krutská, Eva Nováková

Úvod

Příspěvek se zabývá vývojem a diverzifikací skloviny řady LIBA, která v průběhu posledních desetiletí našla uplatnění v širokém spektru průmyslových i uměleckých aplikací. Původní varianta, LIBA 91, byla vyvinuta primárně jako materiál pro výrobu bižuterních polotovarů a lustrových ověsů. V reakci na měnící se požadavky trhu prošlo sklo LIBA postupným vývojem, který vyvrcholil představením modifikované technické varianty LIBA 2000+, prémiové skloviny s optickými vlastnostmi od společnosti Preciosa Ornela.

Jak je dosaženo vysoké kvality skla LIBA 2000+

Sklovina je tavena z vysoce čistých vstupních surovin bez nutnosti fyzikálního odbarvování, díky čemuž vykazuje excelentní vnitřní propustnost v oblasti 380-980 nm.

Pro to, aby sklovina LIBA 2000+ vyhověla vysokým požadavkům na vnitřní homogenitu pro využití v technické oblasti (např dle normy: ISO 12 123:2018), je třeba sklo homogenizovat pomocí platinových homogenizačních systémů. Firma Preciosa Ornela má více jak desetiletou zkušenost s platinovými systémy a všechna data jasně ukazují, že oproti standartním keramickým homogenizačním systémům je šlírovitost výrazně potlačena.

Kombinace vysoké optické čistoty a homogenity předurčuje sklo LIBA 2000+ pro náročné optické aplikace, jako jsou optické členy koncentračních solárních elektráren nebo komponenty LED svítidel.

Závěr

Kombinace vysoké optické čistoty a homogenity předurčuje sklo LIBA 2000+ pro náročné optické aplikace, jako jsou optické členy koncentračních solárních elektráren nebo komponenty LED svítidel.

S ohledem na současný rozmach ateliérového zpracování skla byla tato materiálová řada rozšířena o barevná skla LIBA COLORS 96 (LC96). Ta jsou dilatačně sladěna se základním sklem LIBA 2000+, což umožňuje jejich bezproblémové kombinování v technologiích fusingu a tavené plastiky. Portfolio produktů pro ateliérovou tvorbu doplňují polotovary ve formě drtí a kousků vyráběných z tažených tyčí, které jsou určeny pro následné zpracování v ateliérových pánových pecích.

Anotace

Příspěvek představuje vývojovou řadu skloviny LIBA – od původního bižuterního využití až po pokročilé technické a umělecké aplikace. Zaměřuje se na prémiovou sklovinu LIBA 2000+, která díky tavení z čistých surovin a použití platinových homogenizátorů vykazuje vynikající optickou čistotu i vysokou propustnost. Tyto vlastnosti ji předurčují k uplatnění například v solární optice nebo LED svítidlech. Prezentováno je též rozšíření řady o barevná ateliérová skla LIBA COLORS 96, určená pro fusing a tavenou plastiku.

Abstract

This presentation outlines the developmental line of the LIBA glass series – from its original use in fashion jewelry to advanced technical and artistic applications. It focuses on the premium glass LIBA 2000+, which exhibits excellent optical clarity and high transmittance thanks to melting from pure raw materials and using platinum homogenizers. These properties make it ideal for applications such as solar optics or LED lighting. The expansion of the product line to include LIBA COLORS 96 colored studio glasses, designed for fusing and kiln casting, is also presented.

Ing. Václav Kulas, Preciosa Ornela, a. s., Krkonošská 732, 468 61 Desná, e-mail: kulas.vaclav2@preciosa.com, tel.: +420 739 520 361

Ing. Helena Krutská, ECOGLASS, a.s., Arbesova 4501/66a, 466 04 Jablonec nad Nisou, e-mail: info@ecoglass.cz, tel.: +420 483 316 820

Ing. Eva Nováková, Masters of Glass, Havlovice 51, 463 45 Kobyly, email: contact@mastersofglass.com, tel.: +420 728 773 780

Vlastimil Hotař

Anotace

Sklo je materiál s pozitivní celoživotní bilancí – izolační zasklení, skleněná vlákna i obaly během své životnosti ušetří mnohonásobně více emisí, než kolik jich vznikne při jejich výrobě (u moderního izolačního trojskla nastává bod uhlíkové návratnosti již za 5 až 12 měsíců). Přesto zůstává samotné tavení skla jedním z nejobtížněji dekarbonizovatelných průmyslových procesů: 75–80 % emisí pochází ze spalování paliv a 20–25 % z rozkladu uhličitánových surovin. Příspěvek se zaměřuje na technickou stránku snižování tohoto „uhlíkového dluhu“, tedy na konkrétní stroje, agregáty a zařízení.

Postupně jsou diskutovány: (i) opatření energetické účinnosti – konstrukce a izolace pece, regenerátory a rekuperátory, předeheřev vsázky a střepů, využití odpadního tepla (ORC, kogenerace) a pokročilé řízení tavení s využitím senzoriky, digitálních dvojčat a AI; (ii) změna otopu – hybridní a plně elektrické tavicí agregáty, oxy-fuel spalování, částečná i plná náhrada zemního plynu vodíkem a bioplynem včetně nároků na hořáky, materiály a bezpečnost, elektrodové systémy a jejich životnost; (iii) nekonvenční koncepty tavení – laserové a mikrovlnné tavení jako „černí koně“ s vysokým potenciálem i riziky; (iv) cirkularita jako nejrychleji dostupný nástroj – technologie sběru, drcení, optického a rentgenového třídění střepů a limity kontaminace; (v) CCUS jako doplňkové řešení pro reziduální emise.

Uvedená řešení jsou porovnána z hlediska technické zralosti, dopadu na emise, investičních a provozních nákladů a rizik. Na příkladech realizovaných projektů (Volta v Dubí, Ardagh NextGen, hybridní a elektrické vany Verallia, vodíkové testy Saint-Gobain, ukončený projekt O-I MAGMA) je ukázáno, že sklárna roku 2050 nebude postavena na jedné univerzální technologii, ale na mixu elektrifikace, alternativních paliv, maximální recyklace a digitalizace – a že klíčovou roli v této transformaci hrají právě výrobci sklářských strojů a zařízení.

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.: 485 356 604

Využití robotů v procesech broušení a leštění skla

Filip Švejcar

Anotace

Příspěvek základním způsobem předkládá analýzu možností využití průmyslových robotů v procesech automatického broušení a leštění skleněných polotovarů se zřetelem na funkci řízení přítláčné síly nástroje. Stručně jsou shrnuty principy broušení a leštění skla, vlastnosti vázaného a volného brusiva a podán přehled běžně používaných broušicích a lešticích strojů. Jsou zhodnocena komerčně dostupná řešení kompenzace přítlaku nástroje na obráběnou plochu prostřednictvím kolaborativních typů robotů s interním systémem pro řízení sil a momentů, průmyslových robotů v kombinaci se silově momentovými snímači instalovanými mezi přírubu robotu a technologickou hlavici a specificky navržené efekторы umožňující vlastní kompenzaci polohy akčního členu nezávisle na robotu. Dílčí řešení jsou diskutována z pohledu tuhosti, dynamiky, technických nároků na integraci a potenciálních nákladů. V rámci řešené problematiky jsou v závěru prezentovány zkušenosti s navrženou koncepcí efektoru (technologické hlavice) na principu volně unášeného nástroje s gravitačně definovaným přítlakem. Konkrétně je popsáno experimentální robotizované pracoviště tvořené robotem KUKA KR 90, vakuovým upínacím stolem a navrženým efektozem a prezentovány výsledky zkoušek broušení skleněné čočky s postupnou změnou zrnitosti brusiva. Experimenty prokazují technickou realizovatelnost robotického broušení skla a vhodnost navržené koncepce pro rovinné a mírně zakřivené horizontální plochy, zároveň však poukazují na omezenou univerzálnost řešení a naznačují směry dalšího vývoje technologické hlavice a metod umožňujících generovat náhodné trajektorie robotu s cílem minimalizovat stopy po nástroji na obráběné ploše.

Abstract

The article provides a fundamental analysis of the potential use of industrial robots in automated grinding and polishing processes for glass work pieces, with specific attention to the control of tool contact force. It briefly summarizes the principles of glass grinding and polishing, the characteristics of bonded and loose abrasives, and offers an overview of commonly used grinding and polishing machines. The study evaluates commercially available solutions for compensating tool pressure on the machined surface, including collaborative robots equipped with internal force torque control systems, industrial robots combined with external force torque sensors mounted between the robot flange and the tooling head, and custom-designed end-effectors capable of independent compensation of the actuator position regardless of the robot. Partial solutions are discussed in terms of stiffness, dynamic behaviour, integration requirements, and potential costs.

In the final section, the article presents practical experience with a proposed end-effector concept based on a freely suspended tool with gravity-defined contact force. An experimental robotic workstation comprising a KUKA KR 90 robot, a vacuum clamping table, and the designed end-effector is described, along with the results of grinding tests performed on a glass lens using progressively finer abrasive grits. The experiments demonstrate the technical feasibility of robotic glass grinding and the suitability of the proposed concept for flat and

slightly curved horizontal surfaces, while also highlighting its limited universality and indicating directions for further development of the tooling head and methods for generating random robot trajectories to minimize tool marks on the machined surface.

Ing. Filip Švejcar, Katedra sklářských strojů a robotiky, Technická univerzita v Liberci,
Studentská 2, 461 17, e-mail: filip.svejcar@tul.cz

AI jako nástroj, ne kouzlo: Jak (ne)používat jazykové modely v technické praxi

Vlastimil Hotař

Anotace

Umělá inteligence se během dvou let přesunula z akademických laboratoří na pracovní stůl konstruktéra, technologa i obchodníka. Velké jazykové modely (LLM) dnes pomáhají psát dokumentaci, hledat v normách, analyzovat data z výroby nebo připravovat nabídky – zároveň ale dokážou s naprostou jistotou tvrdit nesmysly.

Přednáška vysvětlí bez matematiky a marketingových hesel, jak LLM skutečně fungují: proč jsou to statistické modely jazyka, a nikoliv databáze faktů, co znamená „halucinace“ a proč nejde o chybu, ale o vlastnost technologie. Ukážeme, jaké podmínky musí být splněny, aby AI přinesla reálný přínos – kvalitní zadání (prompt), správný kontext a firemní data, ochrana know-how a citlivých informací, a především lidská kontrola a ověřování výstupů.

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.: 485 356 604

Korozní odolnost niklové slitiny, kobaltové slitiny a vysokolegované oceli v bezolovnatých sklovinách

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

Úvod

Mnoho dílů ve sklářském průmyslu přichází do styku se sklovinou, a to během homogenizace, dávkování nebo tvarování skloviny. Korozní chování a korozní odolnost slitin velmi úzce souvisí s chemickým složením skloviny, chemickým složením slitiny a teplotou skloviny (viskozitou). Pro vytipování vhodné slitiny pro dané korozní prostředí je žádoucí provést korozní testy v dané sklovině. Korozní testy sice představují zjednodušený případ reálných podmínek, nicméně kvantifikace korozní odolnosti po korozních testech poskytuje prvotní informace o vhodnosti použití dané slitiny ve specifických podmínkách skloviny.

V korozních podmínkách sklovin Crystalin a LIBA byly testovány vybrané žáruvzdorné slitiny. Níže uvedené výsledky byly zpracovány v diplomové práci Petra Šípala [1] a navazují na výsledky publikované dříve v [2].

Experiment

Nominální chemické složení testovaných slitin je uvedeno v tabulce 1. Ze slitin byly vyrobeny válečky, jejichž povrch byl v posledním kroku broušen brusným papírem o zrnitosti P1200. Válečky byly následně vloženy do korundových kelímků a obsypány drobnými střepy skla. Laboratorní korozní testy byly provedeny ve sklovinách Crystalin a LIBA, viz Tab. 2 a 3.

Tab. 1 Chemické složení slitin 141 J, URSA a oceli EN X8CrNi 25-21 stanovené rentgenfluorescenčním spektrometrem DELTA

Slitina	Obsah prvků [hm. %]					
	Ni	Cr	Co	Fe	Mn	Mo
141 J	zbytek	29,30	0,48	2,50	0,20	0,02
URSA	25,20	30	zbytek	4,55	0,25	0,15
EN X8CrNi 25-21	19,1	25,58	-	zbytek	1,6	0,18

Tab. 2 Chemické složení skloviny Crystalin udávané výrobcem [3]

složka	[hm. %]	složka	[hm. %]
SiO ₂	69	CaO	7,3
Na ₂ O	10,5	BaO	7,3
K ₂ O	3,2	ZnO	1,2
Al ₂ O ₃	1	Další oxidy	0,5

Tab. 3 Chemické složení skloviny LIBA udávané výrobcem [4]

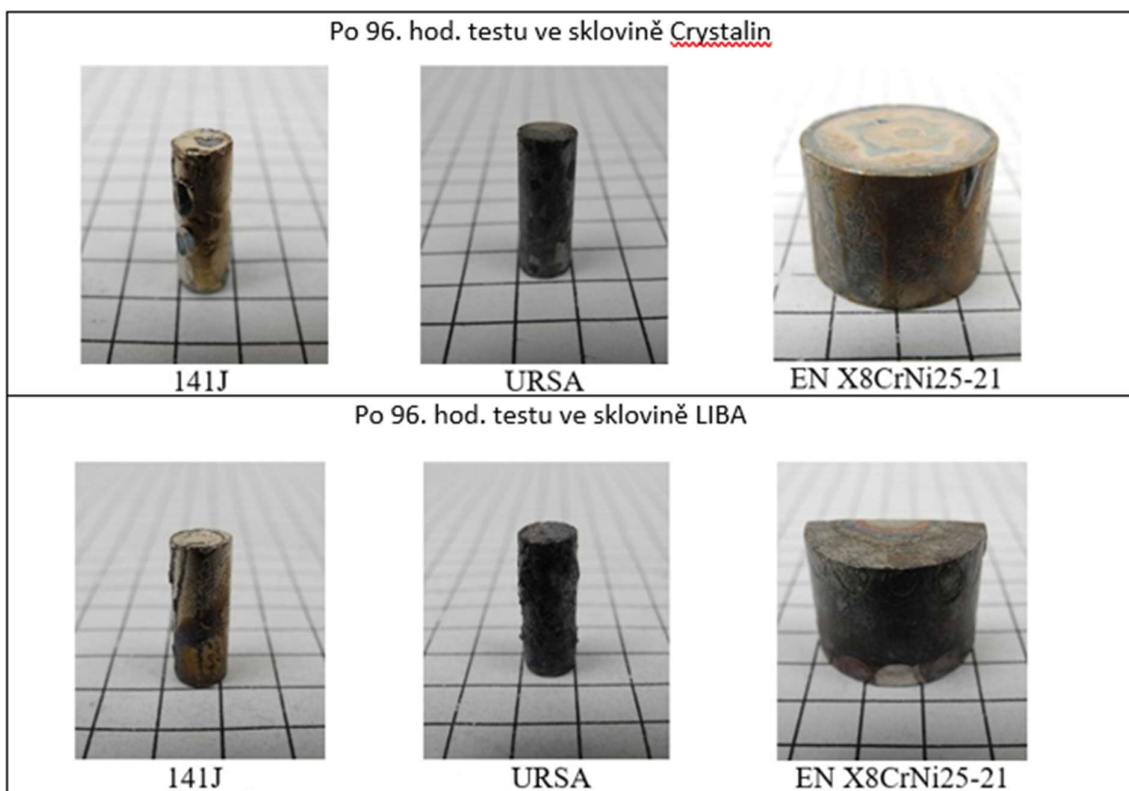
složka	[hm. %]	složka	[hm. %]
SiO ₂	68	CaO	6
Na ₂ O	11	BaO	4
K ₂ O	6	ZnO	3
Al ₂ O ₃	0,6	B ₂ O ₃	0,1

Kelímky se vzorky byly následně vloženy do pece. Teplota korozních testů byla nastavena s ohledem na stejnou dynamickou viskozitu obou sklovin, tj. na hodnotu $\log \eta = 2,67 \text{ dPa} \cdot \text{s}$. Korozní testy ve sklovině Crystalin byly provedeny při teplotě 1266 °C a ve sklovině LIBA při teplotě 1220 °C v časových intervalech 24, 48, 72 a 96 hodin. Po uplynutí časového intervalu byly kelímky se vzorky pomalu schlazeny, následně byly kelímky rozbity a vzorky šetrně zbaveny zbytků skla. Vzorky byly před korozním a po korozním testu zváženy na analytické váze OHAUS s přesností 0,0001 g. Z naměřených hodnot byla posouzena kinetika koroze jednotlivých slitin ve sklovinách. Korozního napadení bylo opět kvantifikováno metodikou využívající fraktální geometrii [5].

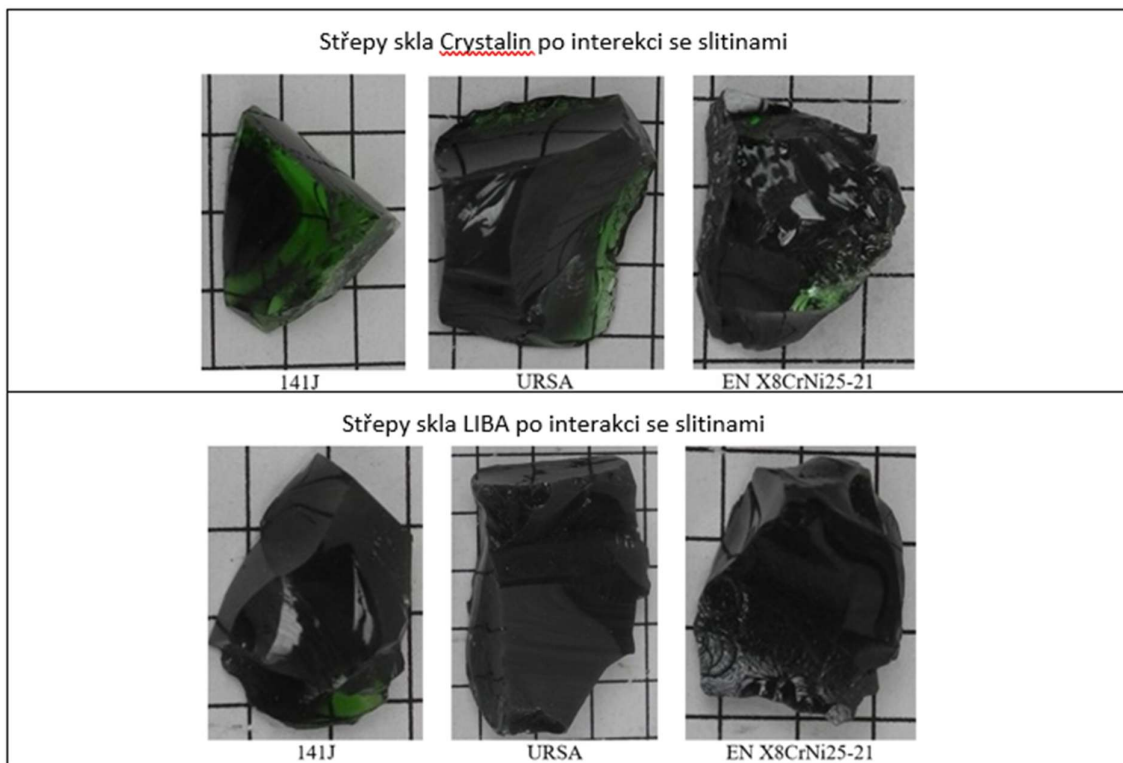
Výsledky

Korozní napadení vzorků slitin po 96 hodinách v důsledku interakce se sklovinami je zdokumentováno na obrázku 1. Povrch vzorků po korozním testu ve sklovině Crystalin je prostý vad s minimální změnou tvaru. Povrch vzorku 141 J má zlaté zbarvení s občasnými důlky a bez viditelných zbytků skla. Vzorek z kobaltové slitiny URSA po korozním testu je beze změny tvaru. Vzorek je tmavě šedý se světle hnědými a černými skvrnami. Na povrchu oceli EN X8CrNi25-21 se objevují barevné mapy s žlutohnědým a modrým zbarvením.

Vliv korozních účinků skloviny LIBA na geometrii a barvu vzorků slitin lze shrnout následovně. Povrch niklové slitiny 141 J má zlatou a žlutohnědou barvu. Topografie povrchu má šupinatý charakter. Zbytky skla nebyly na povrchu slitiny 141 J pozorovány. Naopak, na povrchu slitiny URSA ulpívá výrazná vrstva skla. Důlkový charakter pravděpodobně poukazuje na tvorbu bublin. Tvar vzorku je beze změny a povrch se jeví kompaktně. V určitých místech je povrch černý s bílými bodovými skvrnami. Chromniklová ocel EN X8CrNi25-21 po korozním testu má zvlněný povrch s kombinací hnědé, modré a zlaté barvy. Tvar vzorku je stejný jako ve výchozím stavu a povrch se zdá být kompaktní.



Obr. 1 Vzhled vzorků po korozním testu ve sklovinách Crystalin a LIBA, velikost čtverců podložky je 5x5 mm



Obr. 2 Střepy skla Crystalin a LIBA po korozním testu (96 h), velikost čtverců podložky je 5x5

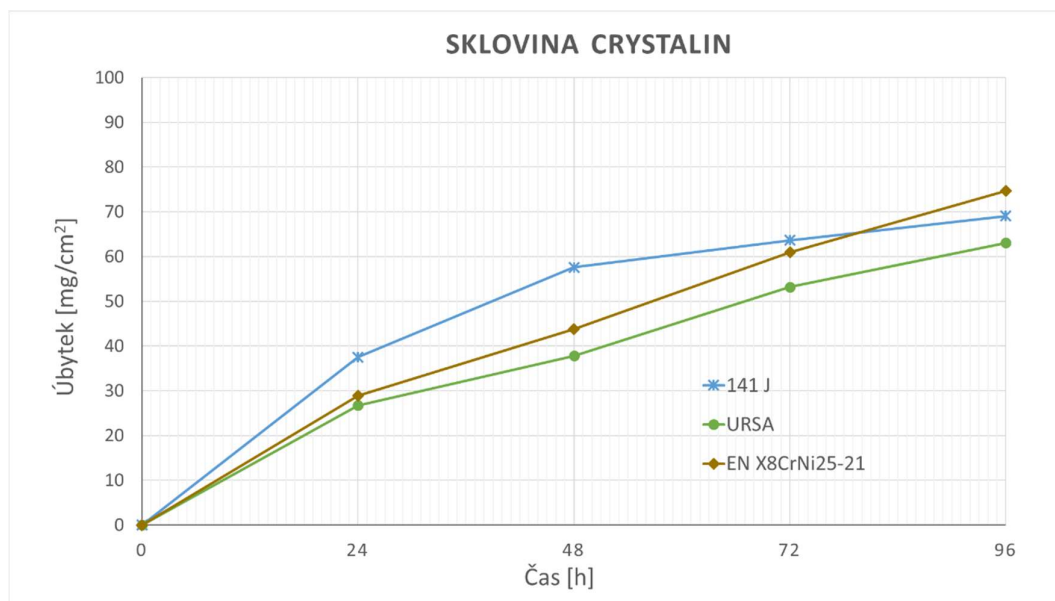
Kromě vzorků slitin byly po korozním testu (96 hodin) popsány a zdokumentovány střepy skla, které byly v obou případech před korozním testem křišťálově čiré. Zbarvení je zřejmé z obr. 2 a popis je uveden v tabulce 4.

Tab. 4 Popis střepů skla Crystalin a LIBA po korozním testu (96 h)

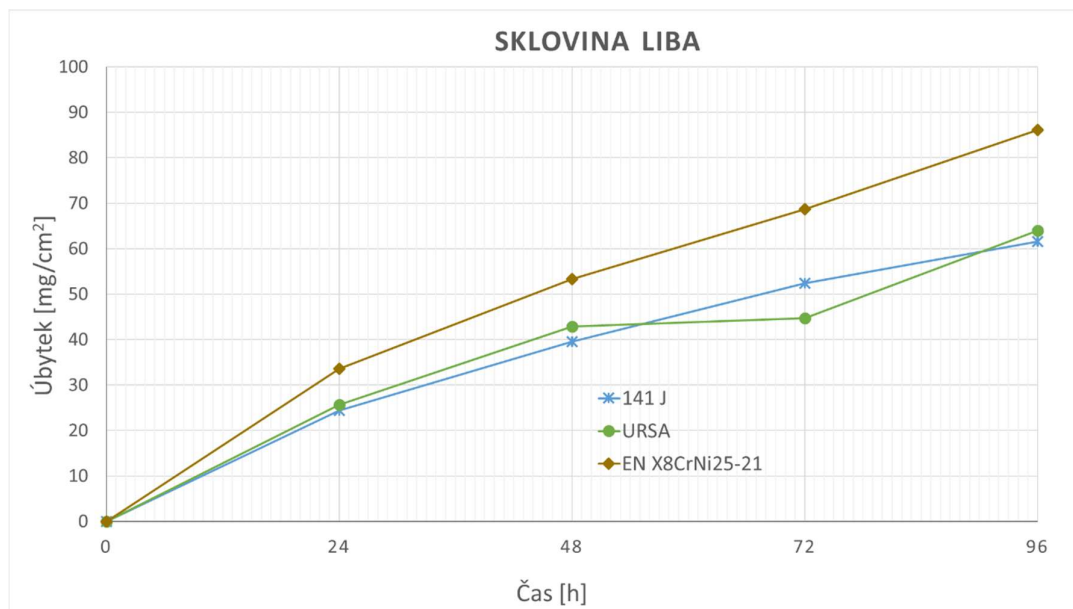
Slitina	LIBA	Crystalin
141 J	čiré u povrchu, kolem vzorku tmavě zelené s bublinami	u vzorku tmavě zelené, k okrajům průhledně zelené
URSA	tmavě zelené, občasné bubliny kolem vzorku	tmavě zelené, průhledná zelená barva u povrchu, kolem vzorku bubliny
EN X8CrNi25-21	tmavě zelené	tmavě zelené, průhledná zelená u povrchu, několik bublin u vzorku

Kinetika koroze

Kinetika koroze byla opět stanovena na základě změn hmotnosti přepočítaných na jednotku plochy. Po všech korozních testech vykazují slitiny korozní úbytky, viz obr. 3 a 4.



Obr. 3 Závislost hmotnostního úbytku testovaných slitin na čase po korozních testech ve sklovině Crystalin

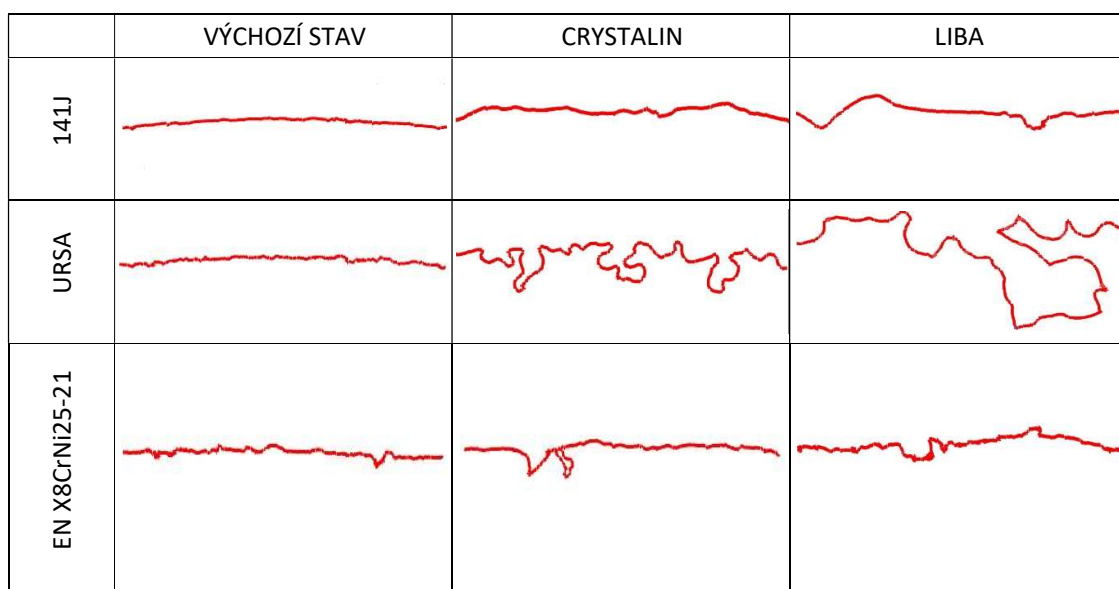


Obr. 4 Závislost hmotnostního úbytku testovaných slitin na čase po korozních testech ve sklovině LIBA

Korozní úbytky slitiny URSA a oceli EN X8CrNi25-21 ve sklovině Crystalin rostou pozvolněji než u slitiny 141 J. U slitiny 141 J dochází k zrychlenému rozpouštění do 48 h. a následně dochází k zpomalení nárůstu úbytku. Během interakce testovaných slitin se sklovinou LIBA má nevyšší korozní úbytky ocel EN X8CrNi25-21. Nicméně je nutné poznamenat, že na vzorku ze slitiny URSA ulpívá vrstva skla, která snižuje stanovenou hodnotu korozního úbytku.

Změna drsnosti povrchu vlivem korozních účinků skloviny

Rozhraní kov/sklovina bylo u všech vzorků nasnímáno na 10 místech se stejným zvětšením a za stejných světelných podmínek. Z každého snímku byla vygenerována křivka rozhraní. Příklady křivek rozhraní po nejdelším korozním testu (po 96 hodinách) jsou znázorněny na obrázku 5. Z křivky rozhraní byly stanoveny jednotlivé parametry: Pa - střední aritmetická úchylka [μm], Sm - střední rozteč nerovnosti profilu [μm] a DC1000 – obvodová dimenze [-] a jejich maximální, minimální a průměrné hodnoty. Bližší informace o výpočtu jednotlivých parametrů a o vlastní metodice lze nalézt v [5]. Vypočítané hodnoty parametrů jsou shrnuty v tabulce 5.



Obr. 5 Příklady křivek rozhraní před korozním testem (výchozí stav) a po korozním testu (96 h) ve sklovinách LIBA a CRYSTALIN

Tab. 5 Změna „vlnitosti“ povrchu vybraných slitin po korozním testu, zelené hodnoty – rovnoměrné napadení, žluté hodnoty – střední napadení povrchu, oranžové hodnoty – velmi nerovnoměrné napadení povrchu

Slitina	Střední aritmetická úchylka Pa [μm]	Střední rozteč nerovnosti profilu Sm [μm]	Průměrná obvodová dimenze D_{C1000} [-]
Výchozí stav			
141 J	1,91	41,1	1024
URSA	2,00	39,4	1034
EN X8CrNi25-21	2,15	13,3	1059
Statická korozní zkouška 1220 °C/96 hod. CRYSTALIN			
141 J	2,67	117,7	1011
URSA	10,46	37,6	1155
EN X8CrNi25-21	1,75	51,9	1029
Statická korozní zkouška 1266 °C/96 hod. LIBA			
141 J	3,08	60,1	1018
URSA	19,64	50,6	1114
EN X8CrNi25-21	2,34	133,9	1043

Z výše uvedených hodnot parametrů (tab. 5) je zřejmé, že oběma sklovinami je kobaltová slitina URSA nejvíce korozně napadena. Má nejvyšší hodnoty střední aritmetické úchylky i obvodové dimenze. Malý počet velkých výstupků představuje nízká hodnota Sm. Naopak velmi rovnoměrné korozní napadení sklovinou LIBA bylo pozorováno u oceli EN X8CrNi25-21. V případě koroze ve sklovině Crystalin, se nejrovnoměrněji rozpouští niklová slitina 141 J.

Závěr

Korozní odolnost niklové slitiny 141 J, kobaltové URSA a oceli EN X8CrNi25-21 byla testována ve sklovinách Crystalin a LIBA. Výsledky lze shrnout do níže uvedených bodů:

1. Ve sklovině Crystalin se jako nejodolnější slitina jeví niklová slitina 141 J. Niklová slitina 141 J se v této sklovině rozpouští nejrovnoměrněji. Přestože u ní dochází k počátečnímu zrychlenému úbytku hmotnosti, po 48 hodinách se proces rozpouštění zpomaluje. Podmínkám roztavené skloviny Crystalin také dobře odolává ocel EN X8CrNi 25-21. Naopak nejméně odolná je kobaltová slitina URSA. Vykazuje nejsilnější korozní napadení. Dosahuje nejvyšších hodnot střední aritmetické úchytky i obvodové dimenze, což značí výrazné narušení povrchu.
2. Ve sklovině LIBA se nejrovnoměrněji rozpouští ocel EN X8CrNi 25-21. Povrch po testu zůstává kompaktní a vykazuje relativně nízkou drsnost ve srovnání s ostatními materiály. Nicméně korozní úbytky oceli jsou nejvyšší. Z toho pohledu se jeví niklová slitina odolnější, protože má nižší korozní úbytky a jen mírně vyšší „drsnost“ povrchu. I v tomto případě je nejméně odolná kobaltová slitina URSA

Z hlediska celkové integrity povrchu a rovnoměrnosti napadení v obou sklovinách se jako nejméně vhodná jeví kobaltová slitina URSA, zatímco niklová slitina 141 J a ocel EN X8CrNi 25-21 vykazují v závislosti na konkrétní sklovině a sledovaném parametru (úbytek hmotnosti vs. drsnost) vyšší míru odolnosti. Všechny materiály však způsobují nežádoucí tmavě zelené zbarvení původně čiré skloviny.

Poděkování

Výzkum byl podpořen v rámci Studentské grantové činnosti – Stanovení korozního mechanismu a odolnosti intermetalických slitin na bázi Fe3Al 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 publikace také vznikla díky Institucionální podpoře pro dlouhodobý koncepční rozvoj výzkumných ústavů, kterou poskytlo Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR v roce 2026.

Literatura

- [1] Petr Šípál. Korozní chování slitin Fe-28Al-5Si-X v bezolovnatých sklovinách. Diplomová práce. Liberec. Technická univerzita v Liberci, 2023.
- [2] Šípál P., Hotař A., Pazourková Prokopčáková P., Hotař V.: Koroze slitin Fe-28Al-5Si-X (X= B, Ti, Nb) v bezolovnaté křišťálové sklovině, Sklář a keramik 74 (1-2) (2024), s. 3- 7.
- [3] Declaration of glass composition Crystalex CZ, s.r.o. [online]. [Cit. 17.12.2025]. Dostupné z: <https://www.crystalex.cz/media/c81e728d9d4c2f636f067f89cc14862c/storage/certifikaty/en/Chemick%C3%A9%20slo%C5%BEn%C3%AD%202024%20A.pdf>
- [4] Ideální produkt pro sklářské ateliéry a školy, LIBA kousky/LIBA drť, [online]. [Cit. 17.12.2025]. Dostupné z: <https://www.preciosa-ornela.com/content/files/downloads/sklenene-tyce-liba-kousky-drt.pdf>

[5] Hotař Adam, Petra Pazourková Prokopčáková, Petr Šípál a Vlastimil Hotař. Kvantifikace korozního napadení aluminidu železa na bázi Fe₃Al po interakci s bezolovnatou sklovinou. Sklář a keramik, Tanvald, Česká sklářská společnost, p. 43-47, 5 pages, ISSN: 0037-637X, n. 3-4, [Online], 2023

Anotace

Tato studie porovnává korozní odolnost niklové slitiny 141 J, kobaltové slitiny URSA a oceli EN X8CrNi 25-21 v bezolovnatých sklovinách Crystalin a LIBA. Laboratorní korozní testy byly prováděny při teplotách odpovídajících shodné dynamické viskozitě obou sklovin ($\log \eta = 2,67 \text{ dPa} \cdot \text{s}$) po dobu 24 až 96 hodin. Odolnost materiálů byla kvantifikována na základě hmotnostních úbytků a následné analýzy napadení povrchu metodikou využívající fraktální geometrii. Nejméně odolným materiálem v obou prostředích je slitina URSA, která vykazuje největší narušení povrchu. Nejrovnoměrnější korozní napadení vykazuje niklová slitina 141 J v Crystalinu a ocel EN X8CrNi 25-21 v LIBA. Interakce všech slitin se sklovinou vede k zelenému zbarvení a tvorbě bublin.

Abstract

This study compares the corrosion resistance of nickel alloy 141 J, cobalt alloy URSA and steel EN X8CrNi 25-21 in two types of lead-free molten glass, Crystalin and LIBA. Laboratory corrosion tests were performed at temperatures corresponding to the same dynamic viscosity of both enamels ($\log \eta = 2.67 \text{ dPa s}$) for 24 to 96 hours. The resistance of the materials was quantified based on weight loss and subsequent analysis of surface attack using fractal geometry and other parameters. The least resistant material in both environments is the URSA alloy, which shows the greatest surface damage. The most uniform corrosion attack is observed in nickel alloy 141 J in Crystalin and in EN X8CrNi 25-21 steel in LIBA. The interaction of all alloys with the molten glasses results in a green tint and the formation of bubbles.

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

Vliv niobu na korozní odolnost aluminidů železa na bázi Fe3Al v bezolovnatých sklovinách

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

Úvod

Ve sklářském průmyslu dochází k přímému kontaktu kovových součástí zařízení s roztavenou sklovinou. Tyto díly jsou tak vystaveny extrémním podmínkám, jako jsou velmi vysoké teploty (až 1200 °C) nebo interakce s korozně velmi agresivními látkami (samotná sklovina, výpary ze skloviny, či spaliny). Z hlediska koroze se tedy jedná o velmi specifické prostředí a korozní mechanismy závisí na konkrétním kovu a konkrétním typu skloviny. Ve sklovinách dochází k rozpouštění kovů, což není nic jiného než jejich oxidace, a vzniklé oxidy jsou pak odváděny prouděním a difuzí.

V současné době jsou dříve používaná olovnatá skla nahrazována skly bezolovnatými, která jsou v roztaveném stavu korozně agresivnější. Z tohoto důvodu jsou prováděny korozní testy vhodných žáruvzdorných materiálů v konkrétních bezolovnatých sklovinách.

V korozních podmínkách sklovin Crystalin a LIBA byly testovány slitiny na bázi aluminidu železa Fe3Al legovaných niobem a jako srovnávací materiál byla použita vysoce legovaná chromniklová ocel EN X8CrNi 25-21.

Níže uvedené výsledky byly zpracovány v diplomové práci Patrika Sedláčka [1] a navazují na výsledky publikované dříve v [2].

Experiment

Chemické složení testovaných slitin je uvedeno v tabulce 1. Z odlitků slitin byly elektrojiskrovým obráběním vyříznuty válečky, jejichž povrch byl upraven broušením až do zrnitosti brusného papíru P1200. Takto upravené vzorky byly následně vloženy do korundových kelímků a zasypány skleněnými kuličkami. Laboratorní korozní testy byly provedeny ve sklovinách Crystalin a LIBA, viz Tab. 2 a 3. Kelímky byly poté vloženy do odporové laboratorní pece. Teplota v peci byla zvolena tak, aby bylo dosaženo stejné dynamické viskozity u obou sklovin $\eta = 3,8 \text{ dPa.s}$ (pro sklovinu Crystalin 1050°C, pro sklovinu LIBA 1032 °C).

Tab. 1 Chemické složení slitin

Slitina	Obsah prvků [at. %]					
	Al	Nb	C	Fe		
FA3Nb	25,8	2,7	0,1	zbytek		
FA5Nb	27,3	4,8	0,1	zbytek		
	Ni	Cr	Mn	Mo	C	Fe
EN X8CrNi 25-21	17,94	27,13	1,61	0,10	0,46	zbytek

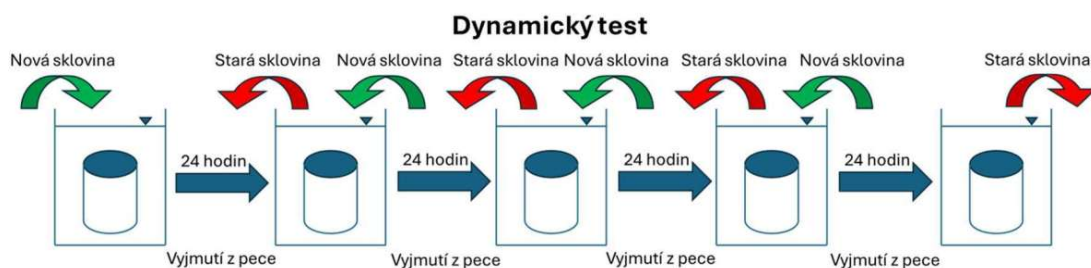
Tab. 2 Chemické složení skloviny Crystalin udávané výrobcem [3]

složka	[hm. %]	složka	[hm. %]
SiO ₂	69	CaO	7,3
Na ₂ O	10,5	BaO	7,3
K ₂ O	3,2	ZnO	1,2
Al ₂ O ₃	1	Další oxidy	0,5

Tab. 3 Chemické složení skloviny LIBA udávané výrobcem [4]

složka	[hm. %]	složka	[hm. %]
SiO ₂	68	CaO	6
Na ₂ O	11	BaO	4
K ₂ O	6	ZnO	3
Al ₂ O ₃	0,6	B ₂ O ₃	0,1

Ve snaze přiblížit korozní testy co nejvíce provozním podmínkám při zpracování skloviny byly provedeny cyklické korozní testy, kdy byl vzorek po uplynutí 24 h ze skloviny šetrně vyjmut, byla provedena dokumentace a gravimetrická měření a následně byl vzorek vložen do nové skloviny na dalších 24 h (viz obr. 1). U každého ze vzorků byly provedeny celkem čtyři čtyřadvacetihodinové cykly. Tento proces měl simulovat proudění skloviny, ke kterému dochází v reálném provozu.



Obr. 1 Schematické zobrazení průběhu cyklického korozního testu [1]

Gravimetrická měření po každém cyklu byla prováděna na přesných analytických vahách OHAUS (s přesností 0,0001 g).

Po čtvrtém posledním cyklu korozního testu byl ze vzorku připraven metalografický výbrus a ve vyleštěném stavu bylo pomocí optického mikroskopu nasnímáno rozhraní slitina/sklo. Tyto snímky pak byly použity pro kvantifikaci korozně napadeného povrchu pomocí metodiky využívající fraktální geometrii.

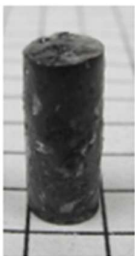
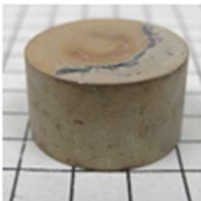
Výsledky

Ze snímků pořízených po každém cyklu korozních testů i z výsledků gravimetrických měření slitin na bázi aluminidů železa ve většině případů vyplývá, že v průběhu korozních testů dochází k ulpívání skla na povrchu vzorů. V případě skloviny LIBA je hmotnostní přírůstek velmi výrazný především po 48 a 72 h a struktura ulpělého skla napovídá, že v průběhu interakce skloviny LIBA a obou slitin na bázi aluminidů železa dochází ke vzniku bublin. Po posledním cyklu byly vzorky aluminidů železa prakticky bez reziduí skla. U chromniklové oceli po interakci

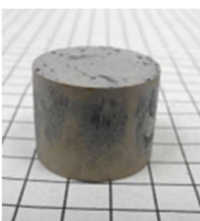
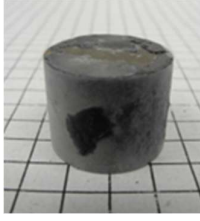
se sklovinou Crystalin i LIBA se na povrchu objevují šupiny a mapy se žlutohnědým a modrým zbarvením a sklovina na povrchu takřka neulpívá.

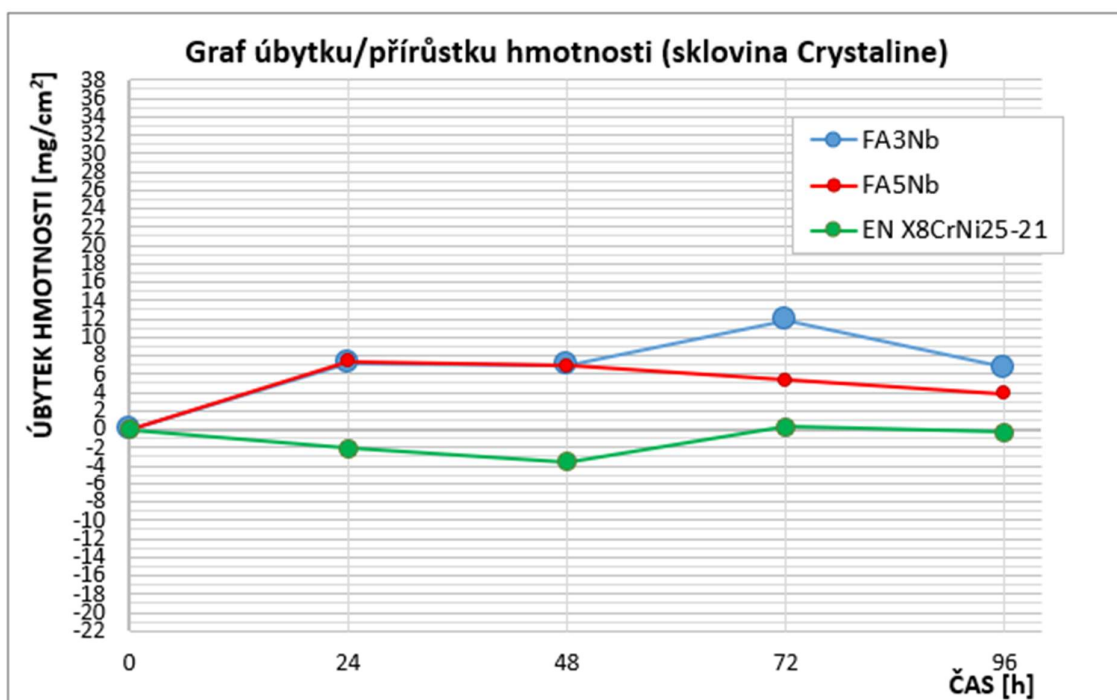
Kinetika koroze byla stanovena na základě změn hmotnosti přepočtených na jednotku plochy. Z výsledků gravimetrických měření vyplývá, že sklovina nejméně ulpívá na vzorcích chromniklové oceli EN X8CrNi25-21 (viz obr. 2) a i porovnáním se gravimetrickými měřeními ve sklovině LIBA (obráz. 3) lze konstatovat, že sklovina LIBA ulpívá na kovových vzorcích v daleko větší míře. Z toho je zřejmé, že gravimetrie není v případě korozních testů kovových slitin ve sklovinách pro hodnocení korozního napadení ideální z důvodu ulpívání skla na povrchu vzorků.

Tab. 4 Makroskopické snímky kovových vzorků po interakci se sklovinou Crystalin (velikost čtverců podložky je 5x5 mm)

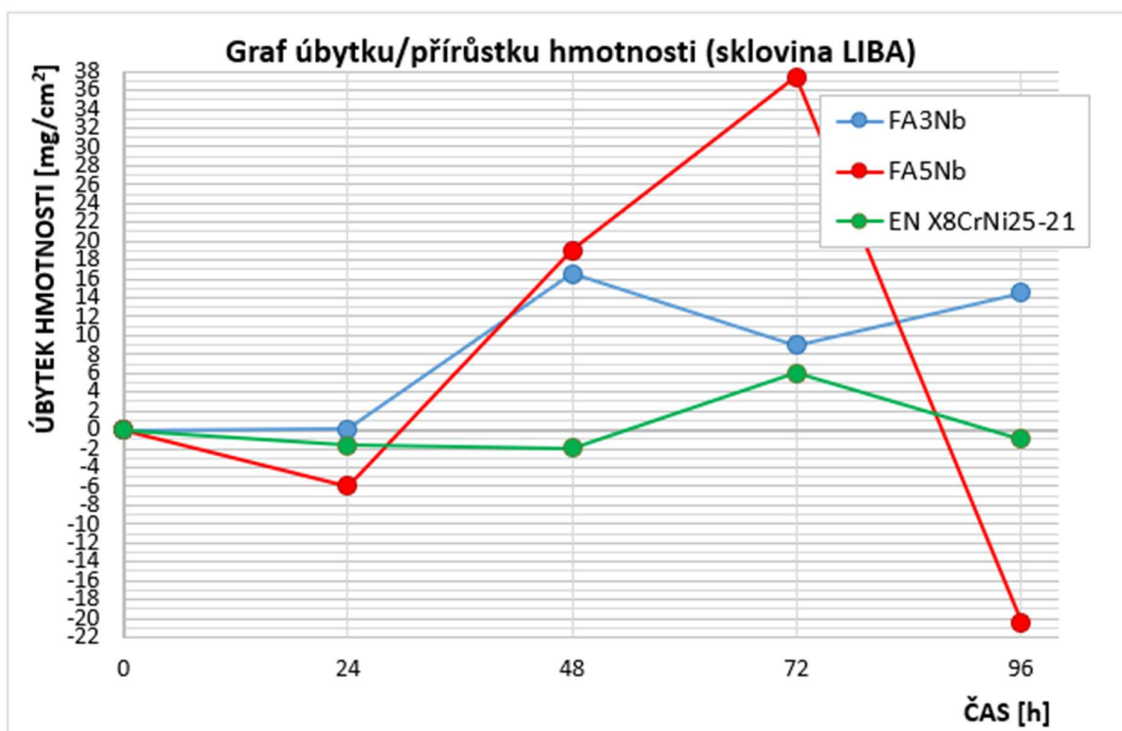
Slitina\čas	48 h	72 h	96 h
FA3Nb			
FA5Nb			
EN X8CrNi25-21			

Tab. 5 Makroskopické snímky kovových vzorků po interakci se sklovinou LIBA (velikost čtverců podložky je 5x5 mm)

Slitina\čas	48 h	72 h	96 h
FA3Nb			
FA5Nb			
EN X8CrNi25-21			



Obr. 2 Závislost hmotnostního úbytku testovaných slitin na čase po korozních testech ve sklovině Crystalline (záporné hodnoty – úbytek, kladné – přírůstek)



Obr. 3 Závislost hmotnostního úbytku testovaných slitin na čase po korozních testech ve sklovině LIBA (záporné hodnoty – úbytek, kladné – přírůstek)

Právě z důvodu ulpívání skla na povrchu kovových vzorků byla pro vyhodnocení korozního napadení povrchu kovových vzorků použita metoda využívající fraktální geometrii [5], která

pro stanovení kinetiky korozního napadení sleduje změny drsnosti povrchu vlivem korozních účinků skloviny. U všech slitin bylo (na vzorcích po cyklických korozních testech po 96 h) na deseti místech při stejném zvětšení a stejném nastavení optického mikroskopu nasnímáno rozhraní kov/sklo. Poté byla z každého snímku vytvořena křivka rozhraní, viz tab. 6. Pomocí metody využívající fraktální geometrii byly z křivek stanoveny parametry popisující drsnost korozně napadeného povrchu: střední aritmetická úchylka P_a [μm], střední rozteč nerovnosti profilu S_m [μm] a obvodová dimenze $DC1000$ [-]. Vypočítané parametry jsou v tab. 7.

Tab. 6 Křivky rozhraní kov/sklo po cyklických testech (po 96 h) ve sklovinách Crystalline a LIBA

	Crystalline	LIBA
	Cyklický test	Cyklický test
FA3Nb		
FA5Nb		
EN X8CrNi25-21		

Tab. 7 Výsledky korozního napadení povrchu vypočtené pomocí metody využívající fraktální geometrii (střední aritmetická úchylka P_a [μm] – ukazatel hloubky průniku koroze, střední rozteč nerovnosti profilu S_m [μm] – charakterizuje míru zvlnění analyzovaného povrchu, obvodová dimenze DC_{1000} [-] – popisuje složitost křivky rozhraní); zelené hodnoty – rovnoměrné napadení, žluté hodnoty – střední napadení povrchu, oranžové hodnoty – velmi nerovnoměrné napadení povrchu

Parametry pro kvantifikaci změn drsnosti povrchu po korozních testech				
Parametr	stav	slitina		
		FA3Nb	FA5Nb	EN X8CrNi25-21
P_a [mm]	výchozí stav	0,8	0,9	2,15
	Crystalline	1,7	2,1	5,8
	LIBA	5,4	7,1	8,2
S_m [mm]	výchozí stav	31,1	14,8	13,3
	Crystalline	13,5	8,2	12
	LIBA	9,2	7,9	10,4
DC_{1000} [-]	výchozí stav	1006	1016	1059
	Crystalline	1037	1058	1165
	LIBA	1192	1225	1196

Z parametrů uvedených v tabulce 7 vyplývá, že slitina na bázi aluminidu železa legovaná třemi procenty Nb je nejméně korozně napadena, má nejnižší hodnoty jak střední aritmetické úchylky, tak obvodové dimenze a nízká hodnota S_m ukazuje na malý počet velkých výstupků. Nejméně rovnoměrné napadení sklovinami naopak vykazuje slitina aluminidu železa s přídavkem pěti procent Nb.

Výsledky

Korozní odolnost slitin na bázi aluminidů železa legovaných niobem a oceli EN X8CrNi25-21, které byly podrobeny cyklickým korozním testům ve sklovinách Crystallin a LIBA, by se dala shrnout následovně:

1. Gravimetrická měření jsou u slitin na bázi aluminidů výrazně ovlivněna ulpíváním skla na kovových vzorcích, což zkresluje výsledky korozního napadení. Nejméně dochází k ulpívání skla na povrchu chromniklové oceli EN X8CrNi25-21, u které lze po korozních testech v obou sklovinách pozorovat, že na povrchu vzorku dochází ke vzniku šupin se žlutohnědým a modrým zbarvením.
2. U slitin na bázi aluminidů železa dochází – zejména po interakci se sklovinou LIBA – ke vzniku bublin a k výraznému ulpívání skla na povrchu vzorků, což je patrné zejména po 48 a 72 h cyklech.
3. Na základě vyhodnocení změn drsnosti povrchu korozně napadeného povrchu lze konstatovat, že nejrovnoměrnější korozní napadení můžeme pozorovat u slitiny FA3Nb.

4. Korozní testy ve sklovině LIBA ukazují větší napadení všech testovaných slitin. Gravimetrická měření ukazují na vyšší míru ulpívání skla na povrchu kovových vzorků. Parametry hodnotící změny drsnosti povrchu také ukazují na to, že sklovina LIBA je z korozního hlediska agresivnější nežli sklovina Crystalin.

Poděkování

Tato práce byla 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. Tato publikace vznikla také díky Institucionální podpoře pro dlouhodobý koncepční rozvoj výzkumných ústavů, kterou poskytlo Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR v roce 2026.

Literatura

- [1] Sedláček P.: Korozní chování slitin na bázi aluminidů železa během cyklického působení bezolovnatých sklovin. Diplomová práce. Liberec. Technická univerzita v Liberci, 2024
- Petr Šípál. Korozní chování slitin Fe-28Al-5Si-X v bezolovnatých sklovinách. Diplomová práce. Liberec. Technická univerzita v Liberci, 2023.
- [2] Šípál P., Hotař A., Pazourková Prokopčáková P., Hotař V.: Koroze slitin Fe-28Al-5Si-X (X= B, Ti, Nb) v bezolovnaté křišťálové sklovině, Sklář a keramik 74 (1-2) (2024), s. 3- 7.
- [3] Declaration of glass composition Crystalex CZ, s.r.o. [online]. [Cit. 17.12.2025]. Dostupné z: <https://www.crystalex.cz/media/c81e728d9d4c2f636f067f89cc14862c/storage/certifikaty/en/Chemick%C3%A9%20slo%C5%BEn%C3%AD%202024%20A.pdf>
- [4] Ideální produkt pro sklářské ateliéry a školy, LIBA kousky/LIBA drť, [online]. [Cit. 17.12.2025]. Dostupné z: <https://www.preciosa-ornela.com/content/files/downloads/sklenene-tyce-LIBA-kousky-drt.pdf>
- [5] HOTAŘ Adam, Petra PAZOURKOVÁ PROKOPČÁKOVÁ, Petr ŠÍPAL a Vlastimil HOTAŘ. Kvantifikace korozního napadení aluminidu železa na bázi Fe3Al po interakci s bezolovnatou sklovinou. Sklář a keramik, Tanvald, Česká sklářská společnost, p. 43-47, 5 pages, ISSN: 0037-637X, n. 3-4, [Online], 2023

Anotace

Slitiny Fe-26Al-3Nb, Fe-27Al-5Nb (at.%) a chromniklová ocel EN X8CrNi 25-21 byly cyklicky testovány v bezolovnaté sklovině LIBA (výrobce Preciosa a.s.). Testy byly provedeny ve sklovině s dynamickou viskozitou $\log \eta = 3,8$ dPa.s (při teplotě 1032 °C). Po korozních testech byla korozní odolnost analyzována a kvantifikována. Míra napadení povrchu byla kvantifikována pomocí parametrů drsnosti a parametrů využívajících poznatků fraktální geometrie. Změny chemického složení povrchu slitin byly analyzovány pomocí SEM-EDS. Složení skla bylo kvantifikováno pomocí XRF.

Abstract

Alloys Fe-26Al-3Nb, Fe-27Al-5Nb (at. %) and chromium-nickel steel EN X8CrNi 25-21 were cyclically tested in lead-free LIBA glass (manufacturer Preciosa a.s.). The tests were performed in molten glass with a dynamic viscosity $\log \eta = 3.8$ dPa.s (at 1032 °C). After corrosion tests, the corrosion resistance was analysed and quantified. The degree of surface attack was

quantified using roughness parameters and fractal-geometry-based parameters. Changes in the chemical composition of the alloy surface were analysed using SEM-EDS. The glass composition was quantified by XRF.

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

Korozní odolnost 3D tištěné oceli v bezolovnaté sklovině

Jakub Faistauer, Adam Hotař, Vlastimil Hotař, Filip Věle

Úvod

Díly využívané ve sklářském průmyslu musí dlouhodobě čelit působení vysokých teplot a intenzivního korozního prostředí roztavené skloviny, což výrazně snižuje jejich životnost. Proto je klíčové zvolit materiály, které budou těmto účinkům dlouhodobě odolávat. 3D tisk kovů, jako je například technologie SLM, dnes nabízí slibnou cestu k inovacím. Například pro výrobu sklářských forem je možné touto technologií ve formě vytvořit soustavu chladicích kanálků. Pozitivním vlivem těchto kanálků na rozložení teplot a zkrácení výrobních cyklů sklářských forem se zabývali ve své studii Rosa et al. [1]. Ačkoliv aditivní výroba přináší výhody při výrobě dílů se složitou geometrií, které by nemohly být vyrobeny konvenční technologií, otázkou zůstává korozní odolnost takto vyrobených dílů v dané sklovině. Charakter chování 3D tištěných ocelí ve sklovinách proto vyžaduje detailní zkoumání jejich korozní kinetiky a napadení v přímém srovnání s konvenčními materiály.

Za účelem hodnocení korozní odolnosti v prostředí skloviny LIBA byla zkoumána ocel AISI 316L vyrobená aditivní technologií SLM a její chování bylo porovnáno s konvenčně tvářenou ocelí AISI 316Ti. Prezentované výsledky byly získány v rámci bakalářské práce Jakuba Faistauera [2].

Experiment

Laboratorním korozním cyklickým testům byly podrobeny vzorky 3D tištěné oceli AISI 316L a konvenčně tvářené oceli AISI 316Ti v prostředí bezolovnaté skloviny LIBA (Tab. 1). Zkušební vzorky 3D tištěné oceli byly vyrobeny na zařízení SLM 280 2.0 TWIN z kovového prášku, jehož chemické složení je uvedeno v Tab. 2. Podle deklarace výrobce dosahovala velikost částic prášku 10–45 μm a jeho hustota činila 7,9 g/cm³ [3]. Při výrobě byla zvolena obousměrná strategie tisku, o níž lze nalézt více informací v [4]. Skutečné chemické složení obou testovaných ocelí bylo následně změřeno pomocí spektrometru DELTA (Tab. 3).

Tab. 1 Chemické složení bezolovnaté skloviny LIBA (deklarované výrobcem) [5]

Sklovina	Chemické složení v hm. %							
	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	Al ₂ O ₃	CaO	BaO	ZnO	B ₂ O ₃
LIBA	68	11	6	0,6	6	4	3	0,1

Tab. 2 Chemické složení kovového prášku AISI 316L (deklarované výrobcem) [3]

Prášek	Chemické složení v hm. %									
	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	C	S	N
AISI 316L	zbytek	16–18	10–14	2–3	≤2	≤1	≤0,045	≤0,030	≤0,030	-

Tab. 3 Chemické složení testovaných ocelí pomocí spektrometru DELTA

Materiál	Procenta [%]	Chemické složení									
		Si	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Nb	Mo
3D tištěná AISI 316L	hm.	0,54	0,06	0,05	17,7	0,88	65,84	12,44	-	-	2,48
	at.	1,07	0,07	0,05	18,97	0,89	65,69	11,81	-	-	1,44
Tvářená AISI 316Ti	hm.	0,49	0,3	0,08	17,19	1,46	68,1	9,92	0,41	0,013	2,04
	at.	0,97	0,35	0,09	18,38	1,48	67,79	9,4	0,36	0,008	1,18

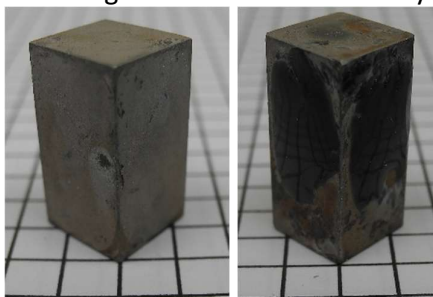
Příprava vzorků před samotným experimentem spočívala ve sjednocení jejich drsnosti povrchu. Za tímto účelem byly všechny ocelové vzorky postupně broušeny SiC papírem do zrnitosti P1200. Takto upravený povrch měl zajistit maximálně srovnatelné výchozí podmínky pro všechny testované vzorky a současně omezit případný vliv rozdílné drsnosti na výsledky experimentu. Následně byly vzorky změřeny a zváženy na analytické váze OHAUS Pioneer, aby bylo možné stanovit hmotnostní úbytky po jednotlivých korozních testech.

Připravené vzorky ocelí byly poté vloženy do korundových kelímků a zasypány 90 g střepů bezolovnaté skloviny LIBA. Kelímky se vzorky byly umístěny do vysokoteplotní pece a zahřáty na teplotu 1032 °C. Korozní působení bylo sledováno v průběhu čtyř různě dlouhých časových intervalů, a to 24, 48, 72 a 96 hodin. Po uplynutí každého korozního testu byly korundové kelímky rozbity a ocelové vzorky z nich vyjmuty. Následovalo jejich opětovné zvážení a pořízení fotografické dokumentace společně se střepy skloviny LIBA.

Korozní napadení vzorků po 96hodinovém testu bylo vyhodnoceno vizuálně a kinetika koroze byla stanovena na základě hmotnostních úbytků. Pro kvantifikování změny drsnosti povrchu byly využity poznatky fraktálové geometrie.

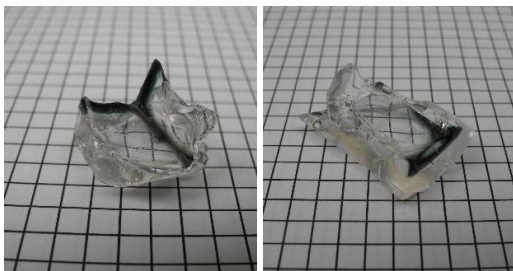
Výsledky

Vzhled vzorků po 96hodinové interakci se sklovinou LIBA zachycuje Obr. 1. Povrch 3D tištěné oceli AISI 316L získal během testu tmavě šedé zbarvení s ojedinělými světle hnědými oblastmi a ulpělo na něm pouze minimum skloviny. Naproti tomu konvenčně tvářená ocel AISI 316Ti vykazovala kromě tmavě šedého zbarvení i lokální výskyt tmavě hnědých oblastí a bylo u ní pozorováno výraznější ulpívání zbytků skloviny. Navzdory těmto povrchovým změnám zůstala celková geometrie obou testovaných vzorků zachována.



Obr. 1 Povrch 3D tištěné oceli AISI 316L (vlevo) a tvářené oceli AISI 316Ti (vpravo) po 96hodinovém korozním testu, velikost čtverců podložky je 5 × 5 mm.

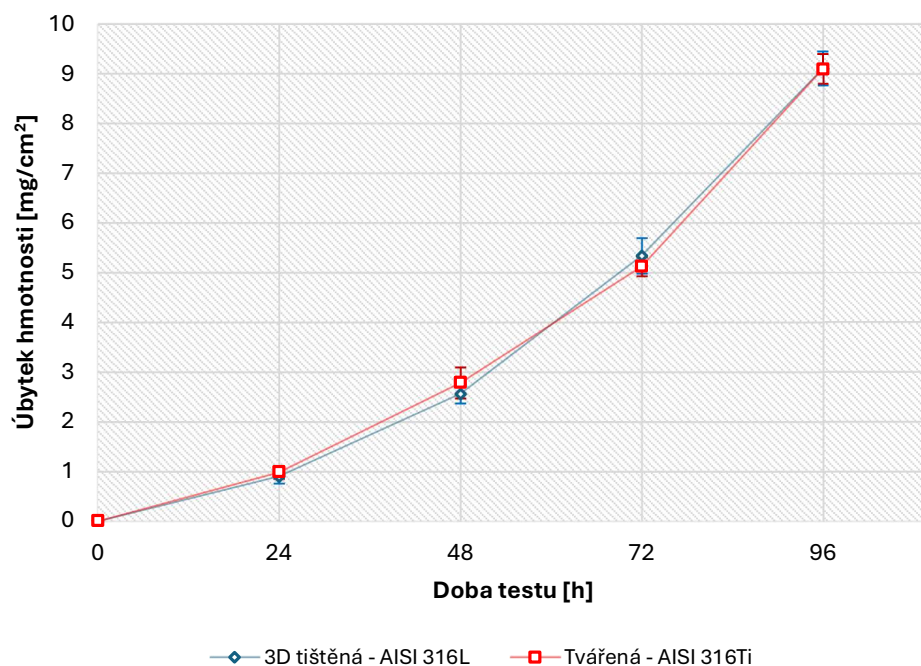
Kromě samotných vzorků byl po 96hodinovém korozním testu zdokumentován i vizuální stav střepů skloviny LIBA (Obr. 2). Sklovina si zachovala převážně svůj původní čirý vzhled, a to z důvodu cyklického korozního testu. K výrazné barevné změně došlo pouze v bezprostřední blízkosti rozhraní mezi kovem a sklovinou, kde se sklovina lokálně zbarvila do tmavě zelených odstínů.



Obr. 2 Střepy skloviny LIBA po interakci s 3D tištěnou ocelí AISI 316L (vlevo) a tvářenou ocelí AISI 316Ti (vpravo) po 96hodinovém korozním testu, velikost čtverců podložky je 5×5 mm

Kinetika koroze

Kinetika koroze testovaných ocelí byla stanovena na základě průměrných hmotnostních úbytků během jednotlivých cyklických korozních testů (vypočtených ze tří vzorků pro každou testovanou ocel), které byly vztaženy na skutečnou plochu vzorku v přímém kontaktu s bezolovnatou sklovinou LIBA. Jak je patrné z Obr. 3, s rostoucí dobou testu ve sklovině LIBA dochází k plynulému úbytku materiálu, přičemž charakter chování obou ocelí je obdobný. Po 96hodinovém testu dosahovala 3D tištěná ocel hmotnostního úbytku $9,10 \pm 0,34$ mg/cm² a tvářená ocel $9,10 \pm 0,30$ mg/cm².

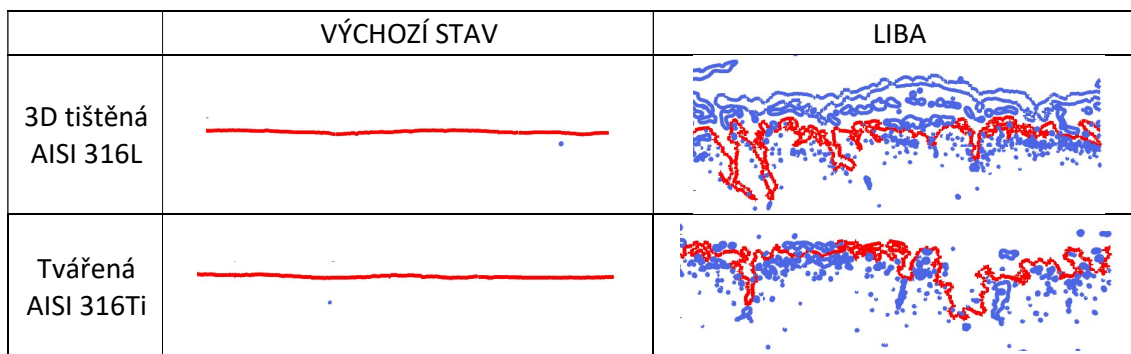


Obr. 3 Hmotnostní úbytky testovaných ocelí ve sklovině LIBA při teplotě 1032 °C

Změna drsnosti povrchu ocelí po expozici ve sklovině LIBA

Ke kvantifikaci změn drsnosti povrchu byly zhotoveny metalografické výbrusy testovaných ocelí ve výchozím stavu i po 96hodinovém korozním testu. Z těchto výbrusů bylo pomocí světelného mikroskopu (při zvětšení 500×) pořízeno pro každý stav minimálně 10 snímků ve formátu BMP. Získané snímky posloužily k vytvoření křivek rozhraní, jež jsou červeně zvýrazněny v Tab. 4. Linie a útvary, které byly softwarem také detekovány, ale s rozhraním nesouvisí, software znázornil v Tab. 4 modře. Z těchto křivek byly následně v softwaru MATLAB vypočteny parametry charakterizující profil rozhraní: střední aritmetická úchylka profilu P_a [μm], střední rozteč nerovností S_m [μm] a obvodová dimenze DC_{1000} [-]. Pro každý parametr byla stanovena minimální, maximální a průměrná hodnota, přičemž celkové výsledky shrnuje Tab. 5. Bližší detaily k použité metodice vyhodnocení lze nalézt v [6, 7].

Tab. 4 Křivky rozhraní před korozním testem a po 96hodinovém korozním testu ve sklovině LIBA



Tab. 5 Změna „vlnitosti“ povrchu ocelí po korozním testu ve sklovině LIBA

Materiál	Stav povrchu	P_a [μm]	S_m [μm]	DC_{1000} [-]
3D tištěná AISI 316L	Výchozí	0,4	10,5	1005
	Po 96 hod.	9,2	8,6	1251
Tvářená AISI 316Ti	Výchozí	0,4	8,5	1005
	Po 96 hod.	7,1	9,5	1229

Jak vyplývá z naměřených výsledků (Tab. 5), po 96hodinovém korozním testu ve sklovině LIBA došlo u obou vzorků k výraznému nárůstu parametrů P_a i DC_{1000} . Z porovnání obou materiálů je však zřejmé, že koroze proniká do aditivně vyráběné oceli AISI 316L hlouběji (vyšší hodnota P_a) a její rozhraní vykazuje větší nerovnoměrnost (nižší hodnota S_m) než v případě konvenčně tvářené oceli AISI 316Ti.

Závěr

Provedené experimentální testy 3D tištěné oceli AISI 316L a konvenčně tvářené oceli AISI 316Ti v roztavené sklovině LIBA vedly k následujícím zjištěním:

1. Po 96hodinové interakci se sklovinou LIBA si oba testované materiály plně zachovaly svou celkovou výchozí geometrii. U konvenčně tvářené oceli AISI 316Ti bylo nicméně pozorováno znatelně výraznější ulpívání zbytků skloviny na povrchu vzorku po 96hodinovém korozním testu.

2. Interakce obou ocelí s taveninou skla je z hlediska korozních úbytků srovnatelná. Po 96 hodinách testování vykazovaly oba materiály zcela srovnatelný identický úbytek hmotnosti.
3. Přestože u obou vzorků zůstala zachována původní geometrie, aditivně vyráběná ocel prokázala vyšší náchylnost k hlubšímu koroznímu napadení. Její rozhraní je zároveň výrazně členitější a nerovnoměrnější v porovnání s konvenčním materiálem při interakci se sklovinou LIBA.

Poděkování

Publikovaný výzkum byl podpořen Nadací Preciosa. Tato publikace vznikla také díky Institucionální podpoře pro dlouhodobý koncepční rozvoj výzkumných ústavů, kterou poskytlo Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR v roce 2026.

Literatura

- [1] ROSA, Nuno; José COSTA a António Gameiro LOPES. CFD study of transient heating and cooling of a blank mould with a conformal cooling channel for manufacturing glass containers. online. Results in Engineering, roč. 17 (2023), s. 100932. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100932>.
- [2] FAISTAUER, Jakub. Korozní odolnost 3D tištěné oceli v bezolovnaté sklovině. Technická univerzita v Liberci, 2025. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/177607>.
- [3] MDS_316L_2026-01.1_EN.pdfonline. Dostupné z: https://nikon-slm-solutions.com/wp-content/uploads/2026/01/MDS_316L_2026-01.1_EN.pdf. [citováno 2026-07-28].
- [4] JIA, Haolin; Hua SUN; Hongze WANG; Yi WU a Haowei WANG. Scanning strategy in selective laser melting (SLM): a review. online. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, roč. 113 (2021), č. 9–10, s. 2413–2435. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06810-3>.
- [5] LIBA kousky. Webové sídlo. Dostupné z: <https://www.preciosa-ornela.com/cs/liba-chunks>. [citováno 2026-07-28].
- [6] HOTAŘ, Adam; Petra PAZOURKOVÁ PROKOPČÁKOVÁ; Petr ŠÍPAL a Vlastimil HOTAŘ. Korozní slitin Fe-28Al-5Si-X (X = B, Ti, Nb) v bezolovnaté křišťálové sklovině. 2024, č. 1–2, s. 3–7. ISSN 0037-637X.
- [7] HOTAŘ, Vlastimil a Petr SALAC. Surface Evaluation by Estimation of Fractal Dimension and Statistical Tools. online. The Scientific World Journal, roč. 2014 (2014), s. 1–10. Dostupné z: <https://doi.org/10.1155/2014/435935>.

Anotace

Příspěvek se zabývá porovnáním korozní odolnosti aditivně vyráběné oceli AISI 316L (technologie SLM) a konvenčně tvářené oceli AISI 316Ti v prostředí taveniny bezolovnaté skloviny LIBA. Korozní testy probíhaly při teplotě 1032 °C po dobu 24, 48, 72 a 96 hodin. Pro vyhodnocení experimentu byly využity gravimetrická analýza a optická mikroskopie ve spojení s metodami fraktální geometrie. Výsledky ukázaly, že z hlediska hmotnostních úbytků je kinetika koroze u obou materiálů srovnatelná. Zřetelně se ovšem liší charakter samotného napadení, přičemž 3D tištěná ocel vykazuje oproti konvenčně tvářené oceli členitější rozhraní s hlubším průnikem koroze.

Abstract

This paper compares the corrosion resistance of additively manufactured AISI 316L steel (SLM technology) and conventionally formed AISI 316Ti steel in a LIBA lead-free glass melt. Corrosion tests were conducted at a temperature of 1032 °C for durations of 24, 48, 72, and 96 hours. Gravimetric analysis and optical microscopy, in conjunction with fractal geometry methods, were used to evaluate the experiment. The results showed that the corrosion kinetics of both materials are comparable in terms of mass loss. However, the nature of the corrosion attack itself differs markedly, with the 3D-printed steel exhibiting a more complex interface with deeper corrosion penetration compared to the conventionally formed steel.

Bc. Jakub Faistauer, Katedra materiálu, Technická univerzita v Liberci, Studentská 2, 461 17, e-mail: jakub.faistauer@tul.cz, tel.: 774 744 717

Poznámky/Notes

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

[illegible]

[illegible]



Název	Sborník abstraktů XVII. mezinárodní konference sklářské stroje a semináře kovy ve sklářských technologiích
Autoři	Kolektiv autorů (obsah)
Editor	Marie Stará
Vydavatel	Katedra sklářských strojů a robotiky, TUL
Vyšlo	v září 2026
Počet stran	52
Vydání	1.

Tato publikace neprošla redakční ani jazykovou úpravou.