FORUM 2026 / roč. XVI / č. 2

PRO KONZERVÁTORY-RESTAURÁTORY
FORUM FOR CONSERVATORS-RESTORERS

2026 / Vol. XVI / No. 2
Peer-reviewed open access journal

Chief editor: Ing. Alena Selucká
Editors: Mgr. Pavla Stöhrová, Mgr. Jana Fricová

Editorial Board:
Ing. Ivo Štěpánek (Head of Editorial Board)
doc. Mgr. art. Jakub Ďoubal, Ph.D.
prof. Dr. Ing. Michal Ďurovič
akad. mal. Igor Fogaš
Ing. Pavel Jirásek
Ing. Jan Josef
doc. akad. soch. Petr Kuthan
Ing. Radka Šefců, Ph.D
Mgr. Pavla Stöhrová (Secretary)

Open acces since 2019 available for free
on https://mck.technicalmuseum.cz/casopis-fkr/
The journal is indexed and abstracted in EBSCO.

Published by:
Technické muzeum v Brně
Purkyňova 105, 612 00 Brno, Czech Republic

Contact for communication:
fricova@tmbrno.cz / stohrova@tmbrno.cz / selucka@tmbrno.cz

© Technické muzeum v Brně, 2026
ISSN (Online) 2571-4384
ISSN (Print) 1805-0050

DOI 10.61574/FKR.2026.2.120

TECHNICKÉ MUZEUM V BRNĚ

METODICKÉ CENTRUM KONZERVACE

VYUŽITÍ 3D TECHNOLOGIÍ PŘI RESTAUROVÁNÍ PORCELÁNOVÉHO SERVISU ZN. PIRKENHAMMER

Pavla Dvořáková · Mária Kolářová · Otto Wiener · Alexandra Kloužková

Vysoká škola chemicko-technologická v Praze

Ing. et Ing. Pavla Dvořáková, Ph.D., je absolventkou studijních programů Chemie a technologie materiálů a Technologie konzervování-restaurování objektů kulturního dědictví na VŠCHT Praha. Specializuje se na příčiny poškození a restaurování keramických materiálů. (pavla.dvorakova@vscht.cz)

Příspěvek se zabývá možnostmi využití 3D skenování a 3D tisku při restaurování historického porcelánového servisu zn. Pirkenhammer z porcelánky v Březové. Část restaurátorského zásahu proběhla klasickou technikou lepení a doplňování s následnou retuší, chybějící víčka od konvičky a cukřenky byla replikována 3D technologiemi. Pro výrobu replik byla zvolena metoda digitálního 3D modelování, po níž následovalo vytištění modelů a testování různých způsobů povrchové úpravy polymerních výtisků. Cílem bylo dosáhnout optimální napodobení vzhledu povrchu glazovaného porcelánu. Pro digitalizaci dochovaných víček byl použit bezkontaktní ruční 3D skener se strukturovaným světlem Go!SCAN 20, následně byly modely upraveny pomocí softwaru VXmodel a zmenšeny podle vnitřních průměrů hrdel konvičky na kávu a cukřenky. Repliky byly zhotoveny na 3D tiskárně dvěma metodami: modelováním tavným nanášením (FDM) z polymerních filamentů PLA, ASA a PETG a stereolitografií (SLA) z fotopolymerní pryskyřice. U všech vzorků byly testovány různé varianty tryskání, broušení a imitace glazury. Výsledky prokázaly, že při vhodné volbě materiálu a povrchové úpravy lze dosáhnout vizuálně věrohodných doplňků, které respektují požadavky na čitelnost zásahu.
Klíčová slova: 3D skenování, 3D tisk, restaurování porcelánu, technologie FDM (modelováním tavným nanášením) a SLA (stereolitografie), Pirkenhammer

USE OF 3D TECHNOLOGIES IN RESTORATION OF PIRKENHAMMER PORCELAIN SERVICE

The paper examines the possibilities of using 3D scanning and 3D printing in the process of restoration of a historical Pirkenhammer porcelain service from the Březová porcelain factory. Part of the restoration was carried out using traditional techniques of bonding and filling, followed by retouching, while two missing lids – from the coffee pot and the sugar bowl – were replicated using 3D technologies. To produce the replicas, a method based on digital 3D modelling was used, followed by printing the models and testing various methods of surface finishing on the polymer prints. The aim was to achieve an optimal imitation of the appearance of glazed porcelain. For the digitization of the preserved lids, a handheld, non-contact 3D scanner with structured-light Go!SCAN 20 was used. The models were subsequently processed using VXmodel software and made smaller according to the inner diameters of the coffee pot and sugar bowl openings. The replicas were produced on a 3D printer using two methods: fused deposition modeling (FDM) with PLA, ASA, and PETG polymer filaments, and stereolithography (SLA) with a photopolymer resin. On all samples, different variants of blasting, sanding, and glaze imitation were tested. The results demonstrated that with an appropriate choice of material and surface treatment, it is possible to achieve visually convincing replacements that respect the requirement for clear legibility of the intervention.
Keywords: 3D scanning, 3D printing, porcelain restoration, FDM (Fused Deposition Modeling) and SLA (Stereolithography) technologies, Pirkenhammer

Restaurování keramických a porcelánových předmětů se řídí obecně uznávanými principy konzervátorsko-restaurátorského kodexu, jak je formulují mezinárodní profesní organizace (ICOMCC, E.C.C.O.) i národní metodiky. Tyto dokumenty zdůrazňují zejména minimální zásah, reverzibilitu použitých materiálů, čitelnost doplňků a důslednou dokumentaci všech kroků zásahu. Tyto zásady se v oblasti restaurování keramiky uplatňují dlouhodobě a zůstávají platné i při využívání moderních digitálních technologií, které rozšiřují možnosti dokumentace, analýzy i samotného restaurátorského procesu [Varlamoff, 2000; ICOM].

Využití 3D technologií představuje zásadní posun v dokumentaci, analýze a restaurování archeologických keramických a porcelánových nálezů. U těchto předmětů umožňuje 3D skenování vytvořit přesný 3D model často velmi křehkých či degradovaných předmětů bez nutnosti jejich opakované manipulace, která by mohla vést k dalšímu poškození [Higueras et al., 2021; Montusiewicz et al., 2022].

3D skenováním lze zachytit nejen rozměrové proporce, tvarové a geometrické dispozice, ale i strukturu a povrchovou texturu. Získaná data umožňují provádět detailní analýzy, včetně přesných měření rozměrů, zjišťování míry a rozsahu poškození, studia lomů a trhlin či sledování jejich změn v čase. Tím výrazně rozšiřují a zkvalitňují dokumentaci předmětů pro studijní, evidenční i prezentační účely. 3D digitalizace zároveň otevírá nové možnosti virtuálního zachování kulturního dědictví, kde usnadňuje vzájemné srovnávání fragmentů, virtuální rekonstrukce nedochovaných nebo poškozených částí a tvorbu vysoce detailních vizualizací [Fragkos et al., 2018; Uğuryol et al., 2025].

Takto vytvořené digitální 3D modely mohou dále sloužit jako výchozí podklad pro modelování chybějících či poškozených částí

předmětu. V konzervátorsko-restaurátorské praxi lze zvolit dva přístupy, jak modely využít. V prvním případě slouží 3D model pouze jako dokumentační nástroj. Samotná fyzická kopie nebo replika je zhotovena tradičními řemeslnými postupy, například tvarováním, odléváním nebo ručním modelováním podle digitálně zpracovaného vzoru. Druhý přístup využívá 3D model přímo k výrobě fyzické repliky či doplňku prostřednictvím 3D tisku. Volba mezi oběma přístupy závisí na povaze a rozsahu poškození předmětu, požadované míře věrnosti, dostupných materiálech a také na požadavcích týkajících se reverzibility a čitelnosti zásahu [Fragkos et al., 2018; Uğuryol et al., 2025].

TEORIE

Prvním krokem restaurátorského procesu je vždy komplexní dokumentace předmětu. Slouží jako podklad pro analýzu stavu, návrh restaurátorského zásahu a zároveň jako trvalý záznam o podobě a historii předmětu. Tradičně zahrnuje kresebnou dokumentaci, která přesně zaznamenává tvar, proporce, profily a detaily poškození, a fotodokumentaci zachycující celkový vzhled, barevnost, povrchovou strukturu a technologické stopy. Tyto postupy zůstávají základním standardem, avšak v současnosti jsou stále častěji doplňovány digitálními metodami, jako je 3D skenování, fotogrammetrie či počítačová analýza fragmentů. Moderní technologie tradiční dokumentaci nenahrazují, ale významně rozšiřují její možnosti.

Technologie digitální dokumentace keramiky

Pro digitalizaci keramických předmětů se využívají tři hlavní technologie: strukturované světlo, laserová triangulace a fotogrammetrie. Metoda strukturovaného světla pracuje na principu projekce vzorů světelných šablon na povrch objektu, jejichž deformace jsou snímány kamerami a následně zpracovány k vytvoření přesného 3D modelu s rozlišením do 0,01–0,1 mm. Příkladem jsou skenery Artec Space Spider nebo Go!SCAN 3D. Laserová triangulace využívá laserový paprsek v kombinaci s kamerou a dosahuje velmi vysoké přesnosti (až kolem 0,05 mm), což ji činí vhodnou pro skenování geometricky složitých nebo lesklých povrchů. Fotogrammetrie SfM (Structure from Motion) vytváří 3D modely pomocí algoritmů, které zpracovávají fotografie pořízené z různých úhlů, přičemž kvalita rekonstrukce je zásadně ovlivněna stabilním osvětlením a dostatečným překryvem snímků. Jedná se o efektivní metodu pro terénní i muzejní dokumentaci, zejména při použití digitálních zrcadlovek i kvalitních fotoaparátů v mobilních telefonech či tabletech. Vědecká praxe však upozorňuje, že běžné obrazové formáty (JPEG, TIFF) ani snímky pořízené mobilními telefony nejsou příliš vhodné pro restaurátorskou dokumentaci. Fotografie pořízené mobilními telefony bývají výrazně softwarově upravovány (např. algoritmy pro doostřování, redukci šumu, automatické vyvážení bílé barvy, barevné korekce či rekonstrukci detailů pomocí AI), což zásadně omezuje kontrolu nad barevností a tonálním podáním, tedy klíčovými parametry restaurátorské dokumentace. Použitím barevné škály lze tyto vlivy částečně eliminovat. Pro účely restaurátorské fotodokumentace se proto doporučuje stále využívat především zrcadlové fotoaparáty [Barbero-Álvarez et al., 2023; Iakovaki et al., 2026].

Při skenování lesklých keramických povrchů, zejména glazur, je často nutné potlačit odlesky pomocí sublimujících antireflexních sprejů (např. AESUB, cyklododekan). Ty vytvářejí tenký matný povlak o tloušťce 20–50 µm, který se během několika hodin samovolně odpaří [Acke et al., 2021; Balletti & Ballarin, 2019; Fragkos et al., 2018; Kim et al., 2025; Uğuryol et al., 2025].

Zachycení textury a barvy

Věrné zachycení povrchu keramických předmětů (textury a barevnosti) zajišťují RGB kamery integrované ve skenerech, které automaticky mapují texturu na vytvořený geometrický model. Fotogrammetrie SfM v kombinaci s kvalitní fotografií dosahuje vysoce detailních a fotorealistických textur díky využití vysokého rozlišení.

U většiny metod 3D skenování je zachycení textury sekundární funkcí doplňující primární měření geometrie. Naproti tomu metoda RTI (Reflectance Transformation Imaging), často označovaná jako 2.5D dokumentace, představuje specializovaný přístup určený pro detailní záznam mikrodetailů, lesku a jemných povrchových struktur. RTI umožňuje interaktivně měnit směr osvětlení na digitálním snímku, čímž odhaluje detaily běžně neviditelné při běžném snímkování, například otisky prstů, rytý dekor, jemné povrchové úpravy či stopy po výrobních technikách [Balletti & Ballarin, 2019; Torres et al., 2012; Uğuryol et al., 2025].

Virtuální rekonstrukce a doplňování chybějících částí

Virtuální rekonstrukce představuje přirozený krok navazující na 3D skenování, protože umožňuje dále pracovat s 3D modelem předmětu bez nutnosti manipulace s originálem. Přesná geometrická data získaná skenováním tvoří základ pro digitální sestavení fragmentů i pro následnou výrobu fyzických doplňků či replik pomocí 3D tisku. Naskenované fragmenty lze skládat několika způsoby lišícími se mírou automatizace. Plně automatické zarovnání (*alignment*), běžné zejména ve fotogrammetrii, dokáže fragmenty orientačně poskládat podle shody struktury povrchů, avšak v restaurátorské praxi se využívá spíše omezeně. Častější je poloautomatické nebo manuální skládání, kdy operátor fragmenty přesně usazuje podle geometrie lomových ploch či struktury povrchu. Tento postup se označuje jako virtuální anastylóza a představuje digitální obdobu klasického vyhledávání částí předmětu. U rotačně symetrických nádob se často využívá rekonstrukce pomocí extrakce profilové linie, která se následně rotuje kolem osy symetrie a umožňuje přesné doplnění celkového tvaru.

V procesu rekonstrukce se uplatňují dva typy softwaru, každý s odlišnou funkcí:

- CAD software (např. Geomagic Design X, CloudCompare): pracuje s 3D skenem jako s technickou předlohou, kterou zpřesňuje, analyzuje nebo překresluje. Je vhodný pro přesná měření, rekonstrukci profilů, technickou dokumentaci a přípravu dat pro výrobu přesných doplňků.
- 3D modelovací programy (např. Blender, Geomagic Freeform): umožňují pracovat se skenem jako s digitální hmotou. Jsou ideální pro organické domodelování chybějících částí, vizuálně přesné rekonstrukce a přípravu modelů pro retuše textur či vizualizace.

Hybridní modelování v programech umožňuje pracovat s 3D daty jako s organickou hmotou, což je ideální pro domodelování chybějících částí (uch, hrdel, okrajů a částí plecí nádob nebo reliéfních/plastických dekorů) [Fragkos et al., 2018; Torres et al., 2012].

Možnosti doplňování keramických nálezů a tvorba replik

Doplňování chybějících částí je součástí restaurátorského zásahu, jehož cílem je stabilizace předmětu, obnova jeho vizuální celistvosti. Tradičně se doplňky modelují z tmelů či sádry, které se následně mechanicky upravují a barevně retušují, případně opatřují i imitací glazury. Tyto postupy jsou dlouhodobě ověřené, zároveň však bývají časově náročné a komplikované zejména u složitější geometrie, jemných detailů, při větším počtu doplňků nebo při tvorbě objemnějších doplňků či replik, kdy je ruční modelování méně efektivní [Kališová, 2020; Kloužková et al., 2022].

Moderní digitální technologie rozšiřují možnosti doplňování o postupy založené na 3D modelu předmětu. Virtuální rekonstrukce umožňuje navrhnout doplněk ve virtuálním prostředí a následně jej vyrobit pomocí 3D tisku. Tento přístup zvyšuje přesnost dosedacích ploch, minimalizuje nutnost další manipulace s originálem a umožňuje opakovanou výrobu doplňků bez rizika poškození předmětu. 3D model tak slouží jako přesná předloha pro tvorbu replik, vnitřních výplní, podpůrných konstrukcí i přiznaných doplňků, které lze kdykoli reverzibilně odstranit [Fragkos et al., 2018; Uğuryol et al., 2025].

Volba doplňujícího materiálu vychází z požadavků na stabilitu a reverzibilitu. V praxi se proto často pro 3D tisk upřednostňují polymerní materiály, které nevyžadují vysokoteplotní zpracování. Keramické tisky jsou vhodné spíše pro výrobu replik, protože jejich výpal znemožňuje přesné přizpůsobení originálu a činí je nereverzibilní. Polymerní doplňky jsou naopak lehké, mechanicky stabilní, snadno odlišitelné od originálu a umožňují bezpečné začlenění i pozdější odstranění [Diz-Mellado et al., 2024; Fragkos et al., 2018; Uğuryol et al., 2025].

Pro výrobu doplňků a replik se v restaurátorské praxi uplatňují tři hlavní technologie 3D tisku, které se liší použitým materiálem i dosažitelnou úrovní geometrické a povrchové přesnosti.

Technologie FDM (Fused Deposition Modeling) využívá termoplasty, například PLA (kyselinu polymléčnou), PETG (polyethylentereftalát-glykol) ASA (akrylonitril-styren-akryl) nebo ABS (akrylonitrilbutadienstyren). Tyto polymerní filamenty jsou v restaurátorské praxi oblíbené zejména pro tisk výplní, protože je lze po vytištění snadno brousit a dále povrchově upravovat (tmelem, barvou či patinou) tak, aby se vizuálně přiblížily původní struktuře restaurovaného předmětu. K dispozici jsou také kompozitní filamenty s příměsí keramického, kamenného nebo kovového prášku, které zvyšují realistický vzhled, povrchovou strukturu i hmotnost tištěných prvků [Fragkos et al., 2018; Ramírez-Revilla et al., 2023; Vyhnánková, 2025].

Z hlediska dlouhodobé stability však jednotlivé filamenty vykazují výrazně odlišné chování, což je pro restaurátorskou praxi zásadní. Současný stav výzkumu ukazuje, že:

- PLA je široce používaný, avšak z hlediska dlouhodobé stability problematický materiál. Jedná se o biodegradabilní polyester s teplotou skelného přechodu kolem 60 °C, který je hydrolyticky labilní a při stárnutí vykazuje žloutnutí, pokles mechanické pevnosti a tvorbu degradačních produktů.
- PETG vykazuje vyšší chemickou stabilitu, nízkou degradaci barvy a velmi omezené uvolňování VOC. Je považován za jeden z nejvhodnějších materiálů pro konzervátorské aplikace, zejména tam, kde je vyžadována vyšší houževnatost a rozměrová stabilita.
- ABS je mechanicky odolný, ale při stárnutí může uvolňovat styrenové deriváty, které jsou potenciálně reaktivní vůči některým historickým materiálům. Je proto vhodný spíše pro konstrukční prvky, nikoli pro přímý kontakt s citlivými povrchy.
- ASA se v praxi ukazuje jako vhodný pro tisk funkčních dílů díky své vyšší teplotní odolnosti, rozměrové stabilitě a dobré povrchové soudržnosti vrstev. Oproti PLA je méně křehký a lépe snáší mechanické namáhání, zároveň však vyžaduje přesnější kontrolu teploty a proudění vzduchu během tisku, aby se minimalizovalo kroucení a delaminace. Představuje UV odolnou alternativu k ABS a je využívána tam, kde je požadována rozměrová stabilita a mechanická pevnost.

[Cimino et al., 2018; González-López et al., 2020; Higueras et al., 2021; Higueras et al., 2023; Limsukon et al., 2023; Shanmugam et al., 2024; Vyhnánková, 2025]

Stereolitografie (SLA) pracuje na principu vytvrzování kapalné pryskyřice UV laserem vrstvu po vrstvě. Tato metoda dosahuje vysoké rozlišovací schopnosti a velmi hladkého povrchu, což ji činí vhodnou pro výrobu detailních doplňků, například drobných fragmentů profilací, dekoru nebo jemných plastických prvků. SLA je výhodná tam, kde je požadována vysoká přesnost dosedacích ploch a minimální post-processing před finálním začleněním doplňku do originálu [Uğuryol et al., 2025; Acke et al., 2021; Balletti & Ballarin, 2019].

Metoda Binder Jetting nanáší tekuté pojivo do lože sypkého prášku, obvykle sádrového nebo keramického. Prášková vrstva zároveň slouží jako podpora, takže lze tisknout i velmi složité geometrie bez nutnosti generovat samostatné podpůrné struktury. Významnou výhodou je možnost plnobarevného tisku, což je vhodné pro tvorbu vizuálně věrných kopií nebo barevných modelů pro muzejní prezentaci. Po tisku následuje sušení a případné vypalování, při němž se organické pojivo odstraní a keramický výrobek se vypálí tak, aby jeho vlastnosti co nejvíce odpovídaly skutečné keramice [Bourgeois et al., 2025; Diz-Mellado et al., 2024].

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem předkládaného příspěvku je představit praktickou aplikaci 3D skenování a 3D tisku při výrobě replik dvou nedochovaných víček z porcelánového servisu zn. Pirkenhammer. Práce ukazuje, jak lze digitální technologie využít při doplňování historického porcelánu jako alternativu k tradičním restaurátorským postupům, a dokumentuje jejich použití na konkrétním restaurátorském zásahu.

3D technologie byly využity při tvorbě replik zcela chybějících víček, zatímco u poškozeného šálku, podšálku a drobných otluků na dalších částech servisu byl proveden standardní restaurátorský zásah zahrnující vyhledávání, čištění, lepení, doplňování a mechanickou i barevnou retuš. Následující kapitola proto nejprve popisuje digitální postup výroby replik a poté shrnuje průběh klasického restaurátorského zásahu.

3D skenování

3D skeny byly pořízeny pomocí kompaktního ručního 3D skeneru Go!SCAN 20 (Creaform) pracujícího na principu strukturovaného světla ve spojení se softwarem VXelements 6. Skener osvětluje objekt projektorem a zachycuje povrch dvěma kamerami, přičemž třetí barevná kamera současně monitoruje texturu a barevnost povrchu. Skener dosahuje garantované přesnosti skenování 0,1 mm na metr.

Každý vzorek byl skenován ze dvou pohledů – zespoda a shora – za účelem kompletního zachycení geometrie. Porcelánové předměty byly umístěny na podložce obklopené nosiči reflexních pozičních značek, které zajišťovaly přesnou orientaci jednotlivých skenů v prostoru. Navzdory lesklému povrchu nebylo nutné použít žádné antireflexní úpravy. Snímání probíhalo v laboratorních podmínkách za stabilních světelných podmínek.

Zpracování dat

Získané skeny byly následně zpracovány a složeny do trojrozměrných modelů v programu VXmodel (Creaform). Na základě skutečných rozměrů byly výsledné 3D modely rovnoměrně škálovány. Finální modely byly exportovány ve formátu STL pro následný 3D tisk.

3D tisk

Pro výrobu fyzických doplňků byly použity dvě metody tisku:

- SLA (stereolitografie) – tiskárna Original Prusa SL1S SPEED.
- FDM (Fused Deposition Modelling) – tiskárna Original Prusa i3 MK3S + s MMU3 kit Bundle.

Použité materiály

Pro FDM tisk byly zvoleny tři typy filamentů:

- PLA – bílý filament Prusament PLA Pristine White (Ø 1,75 ± 0,02 mm), materiál s dobrou tisknutelností a biodegradabilitou, ale omezenou mechanickou a teplotní odolností.
- ASA – bílý filament Prusament ASA Natural (Ø 1,75 ± 0,04 mm), kopolymer vhodný pro exteriér s vyšší pevností, odolností vůči UV záření a možností chemického vyhlazování acetonem.
- PETG – bílý filament Prusament PETG Signal White (Ø 1,75 ± 0,02 mm), polymer s dobrou houževnatostí a voděodolností, méně vhodný pro jemné detaily a mechanické opracování.

Pro SLA tisk byla použita bílá pryskyřice Smart Materials Resin STANDARD WHITE, poskytující vysoké rozlišení a hladký, tvrdý povrch, avšak s nižší pevností a nutností pečlivého post-processingu.

Celkem bylo vytištěno osm víček: pro konvičku i pro cukřenku vždy jedna čtveřice víček, přičemž každé z nich bylo vyrobeno z jiného materiálu (PLA, ASA, PETG a fotopolymerní pryskyřice). Současně byly z filamentů vytištěny testovací vzorky (4 × 4 × 1 cm) pro experimenty s povrchovými úpravami.

Parametry tisku byly voleny s ohledem na dosažení dobré rozlišovací schopnosti a dostatečné pevnosti: u FDM byly nastaveny

běžné průměry vrstev v řádu desítek mikrometrů a generovány podpěry v převislých partiích, u SLA probíhalo vrstevní vytvrzování fotopolymerní pryskyřice s následným promýváním v isopropanolu a vytvrzení v UV komoře.
Pro FDM tisk byla použita mosazná tryska o průměru 0,4 mm a výška vrstvy byla nastavena na 0,15 mm, což představuje vhodný kompromis mezi kvalitou povrchu a časovou náročností výroby. Teplota trysky se lišila podle použitého materiálu (PLA – 220 °C; ASA – 230 °C; PETG – 230 °C). Hustota výplně byla nastavena na 15 % se strukturou gyroid, která poskytuje dobrou mechanickou stabilitu při relativně nízké spotřebě materiálu. Základní rychlost tisku vycházela z doporučení výrobce filamentu (ASA, PLA i PETG – 1,75 mm) a následně byla mírně upravována podle geometrie jednotlivých dílů, aby bylo dosaženo optimální kvality detailů.

Povrchové úpravy
Povrchové úpravy byly nejprve testovány na testovacích vzorcích (4 × 4 × 1 cm) z FDM 3D tisku, které umožnily přesněji vyhodnotit vliv jednotlivých kroků na drsnost povrchu. Tryskání probíhalo v boxu Guyson FORMULA 1200 při různých kombinacích tryskacích médií (korund F80 0,12–0,25 mm; balotina B159 0,08–0,15 mm), tlaku (2–8 bar) a doby expozice. Pro každý polymer byly zvoleny parametry, které nepoškozovaly geometrii výtisku, ale účinně redukovaly výškové rozdíly mezi jednotlivými vrstvami.
Na tryskání navazovalo broušení brusnými papíry zrnitosti P240, P320, P1000, P2000 a P2500, aplikované za sucha nebo za mokra podle typu použitého polymeru, až do dosažení opticky hladkého povrchu vhodného pro následnou imitaci glazury. V závěrečné fázi byly na vybrané vzorky a víčka naneseny tenké vrstvy transparentních či tónovaných laků simulujících porcelánovou glazuru. Testovány byly vysoce lesklý akrylový lak PENTART POURING GLAZE, 10% roztok Paraloidu B72 v acetonu a kombinace akrylové barvy s Hxtal NYL-1 nebo Paraloidem B72. Přehled všech povrchových úprav testovaných na vytištěných vzorcích je uveden v tabulce (tab. 1).
Drsnost povrchu byla měřena na digitálním mikroskopu Keyence VHZ260R při 500násobném zvětšení a doplněna vizuálním hodnocením. K fotodokumentaci povrchu byl použit stereomikroskop Olympus SZX9 s fotoaparátem Canon EOS 1100D a softwarem QuickPHOTO INDUSTRIAL 3.0.

Tab. 1 Přehled povrchových úprav testovaných na vytištěných vzorcích / Overview of surface treatments tested on printed samples

Materiál	Následná úprava	
PLA	mokré broušení	vysoce lesklý akrylový lak
	mokré broušení	akrylová barva + Hxtal NYL-1
	mokré broušení	akrylová barva + Paraloid B72
ASA	broušení	vysoce lesklý akrylový lak
	broušení	akrylová barva + Hxtal NYL-1
	broušení	akrylová barva + Paraloid B72
	leptání acetonem	příp. dobroušení / vysoce lesklý akrylový lak
PETG	broušení	vysoce lesklý akrylový lak
	broušení	akrylová barva + Hxtal NYL-1
	broušení	akrylová barva + Paraloid B72
fotopolymerní pryskyřice	broušení	vysoce lesklý akrylový lak
	broušení	Paraloid B72
	broušení	Hxtal NYL-1

Restaurování porcelánu klasickým postupem
Klasický restaurátorský zásah byl aplikován na poškozený šálek, podšálek, víčko od konvičky na čaj a na otluky u dvou šálků, jednoho podšálku a podnosu. Postup zahrnoval jednotlivé kroky běžné při restaurování porcelánu:
- ***Fotodokumentace***

Celý průběh zásahu byl průběžně fotograficky dokumentován fotoaparátem Canon EOS 90D.
- ***Čištění***

Předměty byly při převzetí znečištěny prachem a na několika z nich se nacházely zbytky doplňků a retuší z předchozího restaurátorského zásahu. Základní čištění proběhlo mokrou cestou pomocí vlažné vody a jemných kartáčků. Zbytky doplňků a barevných retuší z předchozího zásahu nebylo možné odstranit vodou, a proto byly následně aplikovány ethanolové a acetonové zábaly. Dočištění probíhalo pomocí vatových tyčinek a buničiny za použití ethanolu. Po očištění byly jednotlivé fragmenty položeny na podložku a ponechány k přirozenému vyschnutí.
- ***Vyhledávání***

Po usušení střepů následovalo vyhledávání a sestavování fragmentů podle tvaru, profilu a tloušťky střepu.
- ***Lepení***

K lepení bylo zvoleno epoxidové adhezivum Hxtal NYL-1. Vzhledem k jeho vysoké pevnosti a omezené reverzibilitě byla na všechny lomové plochy předem nanesena trvalá separační vrstva tvořená 10% roztokem Paraloidu B72 v acetonu. Po jejím zaschnutí byly jednotlivé fragmenty slepeny, fixovány lepicí páskou (Scotch Magic Invisible) a uloženy do stabilní polohy. Přetoky adheziva byly průběžně odstraňovány ethanolem nebo po vytvrzení skalpelem.
- ***Doplňování ztrát***

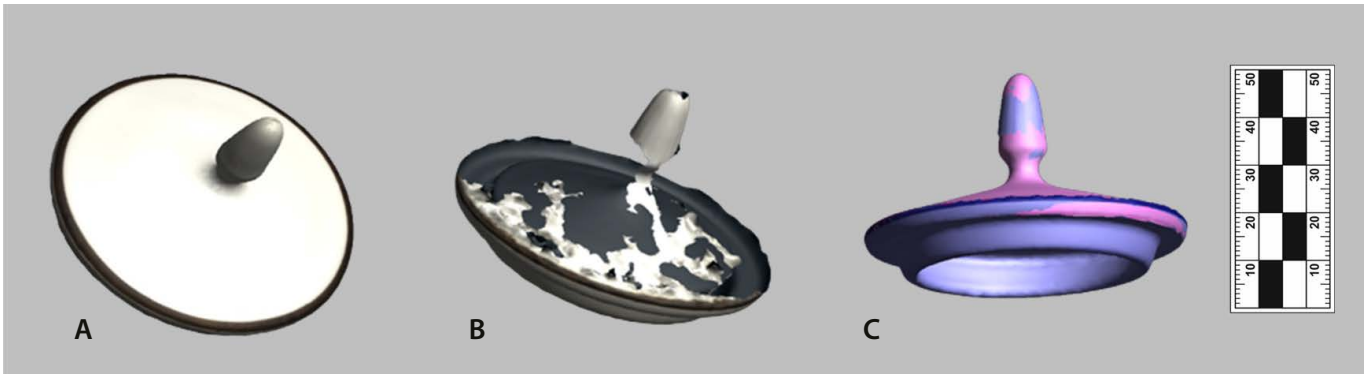
Před doplňováním byla na lomové plochy opět aplikována separační vrstva Paraloidu B72 (10% roztok v acetonu). Jako doplňující materiál byla použita dvousložková epoxidová hmota Milliput, připravená v poměru 1 : 1. Hmota byla modelována dřevěnými a kovovými špachtlemi přímo na předmětu. U víčka konvičky byla část doplňku vytvarována pomocí otevřené formy z dentálního vosku.
- ***Mechanická retuš doplňků***

Po vytvrzení epoxidové hmoty byly doplňky mechanicky upraveny pomocí flexibilních brusiv o zrnitosti P180, P260, P320, P600, P1200 a skalpelu tak, aby odpovídaly původnímu tvaru a povrchu porcelánu. Po broušení následovalo očištění vodou a lokálně ethanolem.
- ***Barevná retuš a doplnění zlacení***

Na přání zadavatele byla provedena barevná retuš doplňků nevypalovacími barvami Pébéo Ceramic. Odstín byl volen tak, aby odpovídal barvě porcelánu, ale zůstal vizuálně rozlišitelný. Retuš byla předem testována na vzorcích epoxidové hmoty. V závěrečné fázi bylo doplněno i chybějící zlacení pomocí směsi dvou akrylových barev (Decorlack Acryl – Marabu, PRIMAcryl Antik Gold – Schmincke), jejichž odstín byl přizpůsoben původnímu dekoru.

VÝSLEDKY A DISKUZE

3D modely a přizpůsobení geometrie
Skenování víček, konvičky a cukřenky umožnilo získat detailní polygonové modely bez nutnosti přímého kontaktu s historickým porcelánem. U konvičky a cukřenky byla geometrie zachycena velmi přesně, přičemž výsledný model víček vznikl složením dvou skenů rubové a lícové strany (obr. 1). U celých předmětů (konvičky, cukřenky) bylo nutné použít dva a více skenů z různých směrů, aby bylo dosaženo úplného pokrytí povrchu (obr. 2). Víčko ke konvičce na kávu bylo vytvořeno naskenováním víčka z větší konvičky na čaj, které bylo tvarově shodné, a následně bylo rovnoměrně zmenšeno podle vnitřního průměru menší konvičky. Stejným způsobem bylo zhotoveno i víčko k cukřence, které vzniklo skenováním víčka z větší cukřenky ze stejného setu



Obr. 1 *Postup vytváření 3D skenu víčka na konvičku na kávu – 3D sken lícové strany (A); rubové strany (B); spojení skenů a vytvoření modelu (C)*
Procedure for creating a 3D scan of the coffee pot lid – 3D scan of the outer side (A); inner side (B); merging the scans and generating the model (C)

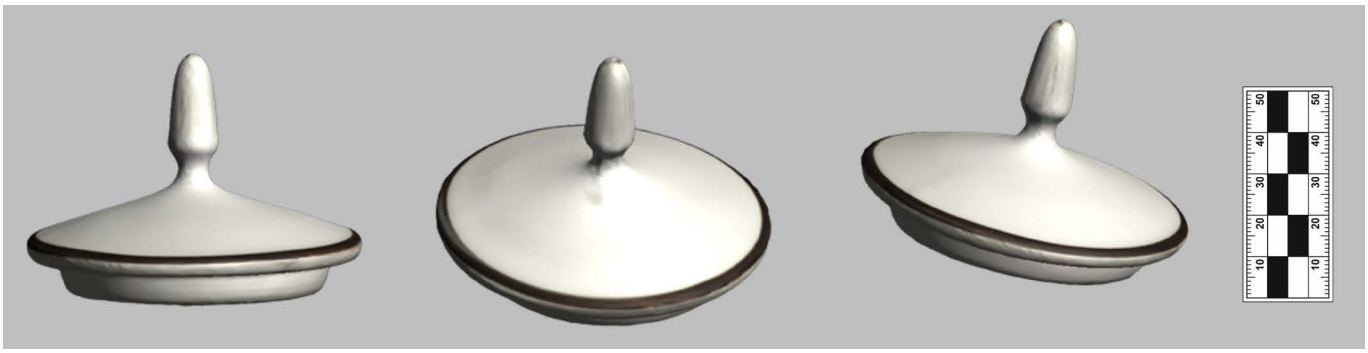
Obr. 2 *3D sken konvičky i s vytvořeným víčkem / 3D scan of the coffee pot including the newly created lid*

a jeho následným zmenšením na odpovídající rozměr. Na základě poměru vnitřních průměrů hrdla větších a menších nádob byly tedy 3D modely obou víček rovnoměrně zmenšeny tak, aby přesně odpovídaly menší konvičce a cukřence (obr. 3). Po vytištění se ukázalo, že takto škálovaná víčka do hrdel dobře zapadají. Pro dosažení optimálního dosednutí bylo nutné provést pouze drobné úpravy dosedacích ploch broušením.

3D výtisky – vliv technologie a materiálu

Na tiskárnách FDM a SLA bylo vyrobeno devět testovacích kvádrových vzorků a osm víček (pro konvičku a cukřenku) z PLA, ASA, PETG a fotopolymerní pryskyřice. Tyto výtisky sloužily jako základ pro ověření kvality tisku a možnosti následné povrchové úpravy.

Již po vytištění se ukázaly výrazné rozdíly mezi oběma technologiemi tisku i jednotlivými materiály. FDM výtisky vykazovaly typickou vrstvenou strukturu povrchu s viditelnými liniemi po dráze trysky, přičemž kvalita detailů odpovídala vlastnostem použitých filamentů (tab. 2). PLA umožnilo relativně jemný tisk, ASA poskytlo dobré mechanické vlastnosti, zatímco PETG vykazovalo vyšší houževnatost, ale horší opracovatelnost. Naproti tomu SLA výtisky z fotopolymerní pryskyřice měly již po tisku hladký povrch a dobře reprodukovaly jemné detaily tvaru úchytů víček.



Obr. 3 *3D sken víčka na konvičku (zmenšení o 17 %) / 3D scan of the coffee pot lid (scaled down by 17%)*

Tab. 2 *Vytištěná víčka na konvičku z různých materiálů, ukázka povrchu vzorků z PLA, ASA, PETG a fotopolymerní pryskyřice po vytištění a následně po mechanické retuši / Printed coffee pot lids made of various materials, surfaces of samples made of PLA, ASA, PETG and photopolymer resin after printing and after mechanical retouching*

Materiál	Povrch vzorku po vyčištění	Mechanicky upravený povrch broušení P2500

Výchozí drsnost povrchu Ra neupravených FDM výtisků se mezi jednotlivými materiály výrazně lišila. U PLA činila přibližně R_a 163 µm, u ASA 47 µm a u PETG 264 µm (tab. 3). Pro dosažení hladkého povrchu vhodného pro nanesení laku (imitaci glazury) byly testovací vzorky podrobeny sérii mechanických úprav.

První bylo testováno tryskání za použití korundu F80 a balotiny B159 při tlacích 2–8 bar. Výsledky ukázaly výrazné snížení drsnosti u všech testovaných filamentů (R_a v jednotkách mikrometrů) a celkové optické zjemnění povrchu. Nejvyšší účinnosti bylo dosaženo při použití korundu při vyšším tlaku, který však u PLA a ASA způsobovalo mírné zešednutí povrchu. U PETG bylo tryskání méně efektivní, což souviselo s jeho vyšší houževnatostí.

Na tryskání navazovalo broušení za pomoci brusných papírů o zrnitosti P240–P2500, aplikované za sucha nebo za mokra podle typu polymeru. Po broušení zrnitostí P2500 se drsnost všech FDM materiálů snížila pod 1 µm (tab. 3), což odpovídá vizuálně hladkému povrchu vhodnému pro imitaci glazury. SLA výtisky měly již v počátečním stavu drsnost výrazně nižší (R_a = 1,20 ± 0,46 µm), a proto u nich nebylo tryskání nutné, postačilo lokální přebroušení. Po dosažení hladkého povrchu byly na vybrané vzorky aplikovány tenké vrstvy transparentních či tónovaných laků a dalších akrylátových a epoxidových systémů určených k imitaci glazury. V tabulce (tab. 3) jsou uvedeny hodnoty drsnosti naměřené po nanesení vysoce lesklého akrylového laku PENTART POURING GLAZE.

Tab. 3 *Výchozí drsnost povrchu 3D výtisků, drsnost po mechanické retuši a po nanesení laku (imitace glazury) / Initial surface roughness of 3D prints, roughness after mechanical retouching and after the application of the coating (glaze imitation)*

Vzorek	Výchozí drsnost R_a (µm)	Drsnost R_a (µm) po mechanické retuši (broušení P 2500)	Drsnost R_a (µm) po nanesení akrylového laku PENTART POURING GLAZE
PLA	163,15 ± 72,87	0,49 ± 0,20	1,50 ± 0,75
ASA	46,90 ± 27,96	0,61 ± 0,06	0,16 ± 0,07
PETG	264,14 ± 30,37	0,49 ± 0,09	1,13 ± 1,45

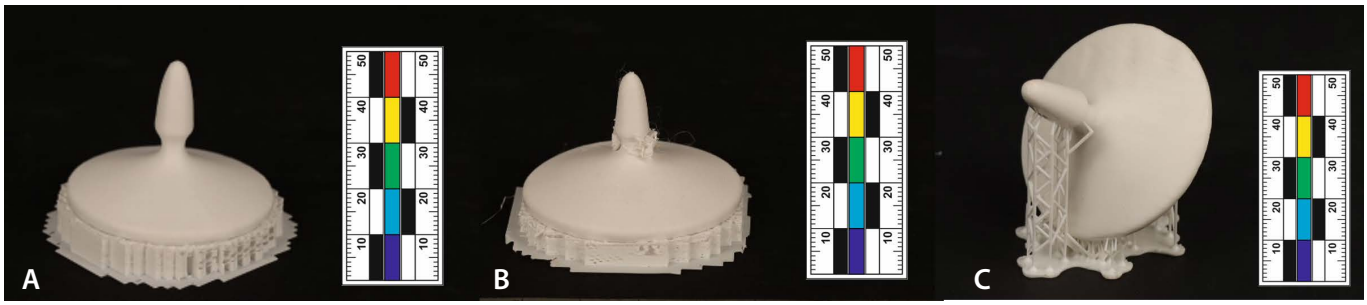
Z výsledků je patrné, že aplikace laku vedla u většiny vzorků k mírnému zvýšení drsnosti v řádu jednotek mikrometrů. Tento nárůst byl způsoben zejména vznikem drobných bublinek a lokálním zvlněním povrchu v důsledku stékání laku, tedy faktory souvisejícími s procesem nanášení.

Výroba repliky víčka

Na základě výsledků získaných z testovacích vzorků byly následně upraveny i samotné repliky víček určené k doplnění porcelánové soupravy. Po vytištění bylo nejprve nutné odstranit podpěry, jejichž charakter měl zásadní vliv na kvalitu povrchu (obr. 4). U FDM výtisků zůstávaly v místech kontaktu podpěr s modelem drobné nerovnosti, které vyžadovaly další mechanické opracování. U SLA výtisků byl povrch po odstranění podpěr výrazně hladší, avšak technologie vyžadovala promývání v isopropanolu a následné UV vytvrzení.

Vzhledem k tomu, že testy potvrdily nejlepší výsledky při kombinaci vícestupňového broušení a aplikace transparentního lesklého laku, byl tento postup použit i při finální úpravě replik. Pro výrobu funkčních replik víček byl nakonec zvolen bílý PLA filament, který barevně nejlépe odpovídal porcelánu původní soupravy a nevyžadoval dodatečnou barevnou retuš. Tato volba představovala vědomý kompromis mezi vizuální věrností a materiálovou stabilitou, protože PLA vykazuje omezenou dlouhodobou odolnost. V kontrolovaných muzejních podmínkách je však jeho použití akceptovatelné s předpokladem omezené životnosti doplňku (orientačně 5–10 let). Po tisku byla víčka mechanicky opracována pomocí flexibilních brusiv, aby byl odstraněn vrstvený charakter povrchu a bylo dosaženo rovnoměrně hladké struktury.

Po broušení měl povrch víček matný vzhled, a proto byla aplikována imitace glazury. Lesklého, kompaktního povrchu bylo dosaženo ponořením víček do vysoce lesklého akrylového laku



Obr. 4 *Víčko na konvičku vytištěné i s podpěrami z PLA (A); PETG (B) a z fotopolymerní pryskyřice (C) / Coffee pot lid printed with supports in PLA (A); PETG (B); and photopolymer resin (C)*

Obr. 5 *Víčko na konvičku vytištěné z PLA po mechanické retuši – nahoře vlevo; po barevné retuši/zlacení – dole vlevo; konečný stav konvičky i víčkem – vpravo / Coffee pot lid printed in PLA after mechanical retouching – top left; after color retouching/gilding – bottom left; final condition of the pot and lid – right*

PENTART POURING GLAZE, který vytvořil souvislou vrstvu vizuálně odpovídající porcelánové glazuře. V závěrečné fázi byla doplněna zlatá linka po celém obvodu, aby dekor odpovídal původnímu provedení porcelánové soupravy (obr. 5).

Aplikace klasického postupu při restaurování porcelánu

Klasický restaurátorský postup byl v rámci souboru uplatněn především u drobných a lokálních ztrát, kde se tato metoda ukázala jako nejvhodnější. Jednalo se zejména o doplnění menších otluků na šálcích, podšálcích a podnosu a o rekonstrukci chybějící části víčka konvičky. U těchto typů poškození poskytla tradiční technika rychlé, přesné a vizuálně stabilní řešení, které nebylo nutné nahrazovat 3D tiskem.

Po očištění a vyhledání fragmentů byly jednotlivé části slepeny (obr. 6) a chybějící místa doplněna epoxidovou hmotou Milliput. Ta umožnila přesné modelování detailů přímo na předmětu, což se osvědčilo jak u podšálku (obr. 7), tak zejména u víčka konvičky, kde bylo nutné doplnit část profilovaného okraje. Po vytvrzení byly doplňky mechanicky upraveny do požadovaného tvaru a povrch sjednocen jemným broušením. Výsledkem byla plynulá návaznost na původní střep bez viditelných přechodů.

Barevná retuš byla provedena nevypalovacími barvami Pébéo Ceramic, jejichž odstín byl volen tak, aby odpovídal barvě porcelánu, ale zůstal při bližším zkoumání rozlišitelný. U doplňků na víčku a podšálku (obr. 8) se tato metoda ukázala jako plně dostačující, protože šlo o malé, jasně ohraničené ztráty, které nevyžadovaly prostorovou rekonstrukci. V závěrečné fázi bylo doplněno i chybějící zlacení pomocí směsi akrylových barev přizpůsobených původnímu dekoru.

Obr. 6 *Ukázka postupu lepení dvousložkovým epoxidovým adhezivem Hxtal NYL-1 – vlevo; stav podšálku po lepení – vpravo / Example of bonding using the two component epoxy adhesive Hxtal NYL-1 – left; condition of the saucer after bonding – right*

Obr. 7 *Ukázka modelování doplňků za pomoci špachtle – vlevo; stav podšálku po mechanické retuši doplňků – vpravo / Example of modeling fills using a spatula – left; condition of the saucer after mechanical retouching – right*

ZÁVĚR

Při vložení nově vyrobených víček do porcelánové soupravy se potvrdilo, že vhodně zvolená kombinace 3D technologie, materiálu a povrchové úpravy umožňuje vytvořit doplňky, které nenarušují celkový vizuální dojem servisní sady. Při bližším zkoumání zůstávají rozdíly v lesku, barevném tónu a struktuře povrchu rozpoznatelné, což odpovídá požadavkům na čitelnost zásahu a zároveň respektuje estetickou integritu předmětu.

Významným přínosem je také skutečnost, že doplňky jsou vyrobeny jako samostatné vložené prvky z odlišného materiálu, které lze v případě potřeby relativně snadno odstranit nebo nahradit jiným řešením, aniž by bylo nutné znovu zasahovat do původního porcelánu. Studie tak potvrzuje, že 3D skenování a 3D tisk představují vhodné rozšíření tradičních metod doplňování chybějících částí, zejména tam, kde složitá geometrie, potřeba opakovatelnosti nebo požadavek na minimalizaci manipulace s originálem činí digitální přístup výhodným.

Klasický postup se tak ukázal jako optimální řešení všude tam, kde byly ztráty malé, dobře definované a nezasahovaly do tvarově složitých částí.

Obr. 8 Stav porcelánových předmětů po restaurování / Condition of porcelain objects after restoration

LITERATURA

- ACKE, L.; DE VIS, K.; VERWULGEN, S. a VERLINDEN, J. Survey and literature study to provide insights on the application of 3D technologies in objects conservation and restoration. *Journal of Cultural Heritage*, 2021, roč. 49, s. 272–288. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.12.003.
- BALLETTI, C. a BALLARIN, M. An application of integrated 3D technologies for replicas in cultural heritage. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2019, **8**(6). Dostupné z: https://doi.org/10.3390/ijgi8060285.
- BARBERO-ÁLVAREZ, M. A.; BRENNER, S.; SABLATNIG, R. a MENÉNDEZ, J. M. Preserving Colour Fidelity in Photogrammetry—An Empirically Grounded Study and Workflow for Cultural Heritage Preservation. *Heritage*, 2023, **6**(8), s. 5700–5718. Dostupné z: https://doi.org/10.3390/heritage6080300.
- BOURGEOIS, I.; SUGIYAMA, G.; CAPISTRANO, J.; ASCENSÃO, G.; FERREIRA, V. a RODRIGUES, H. Smart 3D printed elements for conservation of damaged heritage structures. *Journal of Building Engineering*, 2025, **112**. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.113595.
- DIZ-MELLADO, E.; PEREZ-FENOY, J.; MUDARRA-MATA, M.; RIVERA-GÓMEZ, C. a GALAN-MARIN, C. Enhancing 3D-Printed Clay Models for Heritage Restoration Through 3D Scanning. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2024, **14**(23). Dostupné z: https://doi.org/10.3390/app142310898.
- FRAGKOS, S.; TZIMTZIMIS, E.; TZETZIS, D.; DODUN, O. a KYRATSIS, P. 3D laser scanning and digital restoration of an archaeological find. *MATEC Web of Conferences*. 2018, **178**. Dostupné z: https://doi.org/10.1051/matecconf/201817803013.

- HIGUERAS, M.; CALERO, A. I. a COLLADO-MONTERO, F. J. Digital 3D modeling using photogrammetry and 3D printing applied to the restoration of a Hispano-Roman architectural ornament. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*. 2021, **20**. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.daach.2021.e00179.
- HIGUERAS, M.; COLLADO-MONTERO, F. J. a MEDINA, V. J. Colorimetric evaluation of 3D printing polymers exposed to accelerated aging for Cultural Heritage applications. *Color Research & Application*. 2023, s. 1–3. Dostupné z: https://doi.org/10.1002/col.22846.
- GONZÁLEZ-LÓPEZ, M. E.; MARTÍN DEL CAMPO, A. S.; ROBLEDO-ORTÍZ, J. R.; ARELLANO, M. a PÉREZ-FONSECA, A. A. Accelerated weathering of poly(lactic acid) and its biocomposites: A review. *Polymer Degradation and Stability*, 2020, **179**. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109290.
- IAKOVAKI, E.; KONSTANTAKIS, M.; GIAOURTSAKIS, I.; RENTOUMI, E.; PROTOPAPAS, D.; PSARRAS, C. a KOSKERIDOU, E. When Reality Meets Practice: Challenges and Pitfalls in 3D Digitization Using Structured Light Scanning and Photogrammetry in Cultural Heritage. *Information (Switzerland)*, 2026, **17**(3). Dostupné z: https://doi.org/10.3390/info17030237.
- ICOM. *Code of Ethics*. Online. Dostupné z: https://icom.museum/en/resources/standards-guidelines/code-of-ethics/.
- KALIŠOVÁ, L. Restaurování porcelánové sestavované vázy. *Fórum pro konzervátory-restaurátory*, 2020, roč. 10, č. 1.
- KIM, H. J.; KIM, M. J.; CHOI, S. Y.; OH, J. E. a LEE, S. O. A Study on the Prevention of Specular Reflections in 3D Scanning of Glossy Artifacts. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2025, XM2–2025, s. 157–163. Dostupné z: https://doi.org/10.5194/isprs-annals-x-m-2-2025-157-2025.
- KLOUŽKOVÁ, A.; SVOBODOVÁ, L.; DVOŘÁKOVÁ, P.; KOLÁŘOVÁ, M.; KOHOUTKOVÁ, M.; RANDÁKOVÁ, S.; ŠEFCŮ, R.; KLOUŽEK, J.; VOKÁČ, M. a KUBÁSEK, J. *Metodika konzervování-restaurování glazované keramiky*, 2022.
- LIMSUKON, W.; RUBINO, M.; RABNAWAZ, M.; LIM, L. T. a AURAS, R. Hydrolytic degradation of poly(lactic acid): Unraveling correlations between temperature and the three phase structures. *Polymer Degradation and Stability*, 2023, **217**. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110537.
- MONTUSIEWICZ, J.; BARSZCZ, M. a KORGA, S. Preparation of 3D Models of Cultural Heritage Objects to Be Recognised by Touch by the Blind—Case Studies. *Applied Sciences (Switzerland)*, 2022, **12**(23). Dostupné z: https://doi.org/10.3390/app122311910.
- RAMÍREZ-REVILLA, S.; CAMACHO-VALENCIA, D.; GONZALES--CONDORI, E. G. a MÁRQUEZ, G. Evaluation and comparison of the degradability and compressive and tensile properties of 3D printing polymeric materials: PLA, PETG, PC, and ASA. *MRS Communications*, 2023, **13**(1), s. 55–62. Dostupné z: https://doi.org/10.1557/s43579-022-00311-4.
- SHANMUGAM, V.; BABU, K.; KANNAN, G.; MENSAH, R. A.; SAMANTARAY, S. K. a DAS, O. The thermal properties of FDM printed polymeric materials: A review. *Polymer Degradation and Stability*, 2024, **228**. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2024.110902.
- TORRES, J. C.; ARROYO, G.; ROMO, C. a DE HARO, J. 3D Digitization using Structure from Motion. Online. *CEIG – Spanish Computer Graphics Conference*. 2012. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/258246473_3D_Digitization_using_Structure_from_Motion.
- UĞURYOL, D.; AKGÜN, C.; GÜNGÖR, N. E. a UĞURYOL, M. The use of desktop 3D scanners and printers in the restoration of archaeological ceramics: an evaluation from the perspective of the conservator. *International Journal of Conservation Science*, 2025, **16**(2), s. 831–854. Dostupné z: http://www.ijcs.ro.
- VARLAMOFF, M.-T. *Safeguarding our Documentary Heritage = Conservation préventive du patrimoine documentaire*. Paris: UNESCO, 2000.
- VYHNÁNKOVÁ, Š. *Suitability of Selected 3D Printing Materials for Conservation Purposes Using FDM Technology*. 2025. Diplomová práce. University of Pardubice.