IVANA KOPECKÁ, EVA SVOBODOVÁ

METODY PRŮZKUMU HISTORICKÝCH MATERIÁLŮ

GRADA

NÁRODNÍ TECHNICKÉ MUZEUM

GRADA

NÁRODNÍ TECHNICKÉ MUZEUM

IVANA KOPECKÁ, EVA SVOBODOVÁ

METODY PRŮZKUMU HISTORICKÝCH MATERIÁLŮ

GRADA PUBLISHING

Publikace vznikla za finanční podpory Ministerstva kultury v rámci institucionálního financování na dlouhodobý koncepční rozvoj výzkumné organizace Národní technické muzeum (DKRVO, MK000023299) v letech 2016–2017.

Ivana Kopecká, Eva Svobodová

Metody průzkumu historických materiálů

Autorky:
Ing. Ivana Kopecká
RNDr. Eva Svobodová, Ph.D.

Recenze:
Ing. Karol Bayer
Ing. Jiřina Přikrylová

Vydala Grada Publishing, a. s.
U Průhonu 22, Praha 7
obchod@grada.cz, www.grada.cz
tel.: +420 234 264 401
jako svou 7297. publikaci

Odpovědná redaktorka Mgr. Věra Slavíková
Grafická úprava a sazba Robert Prokopec
Počet stran 96
První vydání, Praha 2019
Vytiskly Tiskárny Havlíčkův Brod, a. s.

© Grada Publishing, a. s., 2019
Cover & Layout Design © Robert Prokopec, 2019

Názvy produktů, firem apod. použité v knize mohou být ochrannými známkami nebo registrovanými ochrannými známkami příslušných vlastníků.

Upozornění pro čtenáře a uživatele této knihy
Všechna práva vyhrazena. Žádná část této tištěné či elektronické knihy nesmí být reprodukována a šířena v papírové, elektronické či jiné podobě bez předchozího písemného souhlasu nakladatele. Neoprávněné užití této knihy bude ***trestně stíháno****.*

ISBN 978-80-271-2606-4 (ePub)
ISBN 978-80-271-2605-7 (pdf)
ISBN 978-80-271-2240-0 Grada Publishing
ISBN 978-80-7037-314-9 Národní technické muzeum

Obsah

1. Úvod **7**

2. Odběr vzorku a interpretace výsledků **9**

3. Analytické metody, jejichž výstupem je obraz **13**

3.1 Optická mikroskopie 14

3.2 Konfokální mikroskopie s rozmítaným laserovým paprskem (CLSM, LSCM) 18

3.3 Rentgenografie a gamagrafie 18

3.4 RTG-tomografie 20

3.5 Skenovací (rastrovací) elektronová mikroskopie (SEM) 20

3.6 UV fotografie 21

3.7 IR reflektoskopie (reflektografie) 23

4. Organická analýza **25**

4.1 Histologické barvicí metody a kapkové reakce 27

4.2 Spektrální metody 28

4.2.1 Infračervená spektrometrie 29

4.2.2 Ramanova spektrometrie 37

4.2.3 UV/VIS molekulová absorpční spektrometrie 40

4.2.4 Hmotnostní spektrometrie (MS) 41

4.2.5 Laserové techniky 42

4.3 Rozdělovací (separační) analytické metody 45

4.3.1 Tenkovrstvá chromatografie (TLC) 46

4.3.2 Vysokotlaká (vysokoúčinná) kapalinová chromatografie (HPLC) 48

4.3.3 Iontově výměnná chromatografie (IEC) 49

4.3.4 Plynová chromatografie (GC) 50

4.3.5 Elektromigrační metody 52

5. Anorganická analýza **59**

5.1 Metody prvkové analýzy 60

5.1.1 Rentgenfluorescenční analýza (XRF) 60

5.1.2 Skenovací elektronová mikroskopie (SEM) 62
5.2 Strukturní (fázová) analýza 64
5.2.1 RTG strukturní difrakční analýza neboli prášková RTG difrakce 64
6. Průzkum fotografických materiálů 67
7. Speciální analytické metody a jejich kombinace 75
7.1 Datování radioaktivním uhlíkem $^{14}_{6}C$ (radiokarbonové datování) 79
7.2 Dendrochronologie 81
7.3 Radiačně indukovaná termoluminiscence 82
8. Závěr 85
Literatura 86
Použité prameny 86
Publikace, které předcházely této publikaci 89
Rejstřík 94

1. Úvod

Mají-li být výsledky analýz skutečně přínosem, musejí být správně interpretovány a jasně a srozumitelně formulovány i pro laiky v oblasti chemie. Publikace je určena především restaurátorům, kurátorům sbírek nebo historikům umění. Tedy těm, kteří nemají speciální přírodovědné znalosti. Měla by také upozornit na některé relativně nové, méně rozšířené, většinou i méně dostupné analytické metody, jejichž rozšíření je však jen otázkou času.

Publikace by také měla pomoci orientovat se ve výsledcích a závěrech chemických analýz, měla by představit ty analytické metody, které jsou při studiu historických materiálů používány nejčastěji, ukázat jejich možnosti i omezení i jejich nároky na odběr vzorku.

Chemická analýza historických materiálů – památek, sbírkových předmětů nebo uměleckých děl usiluje o získání exaktních (chemických a fyzikálních) informací o díle s cílem:

- Zjistit příčiny poruch a degradace materiálu.
- Navrhnout technologii restaurování.
- Stanovit optimální podmínky pro další uchování díla.
- Potvrdit autenticitu nebo upřesnit dataci díla.

Spolupráce přírodovědců s historiky umění a s restaurátory může být velmi přínosná, ovšem jen za předpokladu, že průzkum, respektive analýza, dává odpověď na konkrétní kvalifikovanou otázku a odpověď je správně interpretována. Je tedy třeba jasně formulovat problém – otázku, na kterou má analýza odpovědět. *Mělo by být samozřejmé, že se omezíme na analýzy, které skutečně na nějakou otázku mohou odpovědět.* Dále je třeba zvážit, je-li položená otázka natolik důležitá (nebo zajímavá), aby ospravedlnila odběr vzorku, neboť málokterý typ analýzy je skutečně neinvazivní, a je třeba zvážit i ekonomickou stránku konkrétní analýzy.

Potom je nutné formulovat, „co" je třeba analyzovat pro zodpovězení dané otázky *(např. informaci o technice malby podá analýza pojiva, informaci jak sejmout lakovou vrstvu podá analýza složení tohoto laku…)*. Nakonec je třeba specifikovat, „jak" analyzovat – jakou metodou a jakou technikou. Z dostupných metod by měla být zvolena ta analytická metoda, která na konkrétní otázku dává odpověď, zatíženou co nejmenší chybou.

Analýza historických materiálů má určitá specifika:

- Objem vzorku, který je eventuálně možné odebrat, je velmi malý, což samo o sobě použití některých analytických metod vylučuje.
- Chemická podstata analyzovaných materiálů je již s velkou pravděpodobností pozměněna – buď již způsobem přípravy, nebo způsobem aplikace *(např. změny ve struktuře terpenických pryskyřic v důsledku působení vysokých teplot během přípravy olejopryskyřičných laků)*, nebo samotným stárnutím *(např. síťování olejů, denaturace bílkovin, rozpad polysacharidů),* nebo působením příměsí, které mohou jejich degradační procesy urychlovat *(např. těžké kovy jako součásti pigmentů mohou urychlovat degradaci bílkovinných pojiv nebo mohou reakcí s oleji tvořit tzv. mýdla[1])*.
- Většinou se nejedná o jednu látku, ale o směs látek.

1 Mýdla nemusejí vznikat pouze reakcí hydroxidu sodného či draselného s mastnými kyselinami (oleji). Termínem zmýdelnění můžeme označit i esterifikaci (chemická reakce, při které z organické nebo anorganické kyslíkaté kyseliny a alkoholu vzniká ester) olejů jinými kovy, např. kovy alkalických zemin (např. vápník, baryum) či těžkými kovy (nejčastěji olovem a zinkem), které jsou součástí pigmentů (např. křídy, olovnaté běloby, zinkové běloby a dalších) nebo plniv barevné vrstvy. Dlouhodobým působením iontů kovů na oleje pak oleje degradují nejčastěji za vzniku stearátů a oxalátů (šťavelanů) těchto kovů.

2. Odběr vzorku a interpretace výsledků

Úspěch analýzy nezávisí jen na výběru vhodné analytické metody, ale také na výběru místa analýzy, respektive místa odběru vzorku. Vzorek pro analýzu musí být reprezentativní z hlediska zkoumaného materiálu, v rámci možností musí být co nejvíce homogenní a musí být odebrán v množství, které je pro zvolený typ analýzy dostatečné[2]. Úzká spolupráce restaurátorů, přírodovědců a historiků umění je při zadávání analýz i interpretaci výsledků velmi nutná.

Obecně rozlišujeme analytické metody kvalitativní a kvantitativní. **Kvalitativní** metody podávají informace pouze o chemickém složení analyzovaných látek, čímž odpovídají na otázku „co?“ a používají se k identifikaci neznámých látek ve vzorku. **Kvantitativní** metody naopak zjišťují množství analyzované látky ve vzorku, odpovídají na otázku „kolik?“. Z hlediska odběru vzorku pak analytické metody dělíme na **nedestruktivní** (vzorek není při analýze zničen a může být eventuálně použit k dalšímu zkoumání) a **destruktivní** (v průběhu analýzy se vzorek zničí), případně **mikro-destruktivní** (vzorek či část vzorku, která je v průběhu analýzy zničena, je

2 Vyžaduje-li analytická metoda úpravu vzorku, musí se počítat s minimálními ztrátami vzorku během jeho úprav, a musí se tedy odebírat větší množství vzorku. Stejně tak i v případě, kdy restaurátor požaduje více analýz na témže vzorku, zejména jedná-li se o metody destruktivní.

velmi malá). Metody však mohou být nedestruktivní vzhledem k odebranému vzorku, avšak tento vzorek musí být pro analýzu z díla odebrán – tyto metody označujeme jako **invazivní** (vyžadují odběr vzorku). Jako metody **neinvazivní** označujeme ty metody, které nevyžadují odběr vzorku a jsou tak nedestruktivní vzhledem k dílu samotnému. Těmito metodami lze pak díla analyzovat i přímo v terénu, tzv. *in situ*.

Několik poznámek k odběru vzorků, které vycházejí z praktických zkušeností:

- Při odběru vzorků pro určení stratigrafie jednotlivých vrstev barevných nátěrů jsme většinou nuceni odebírat vzorky v hloubce záhybů a v úžlabích, neboť zbytky nátěrů se často dochovaly právě jenom v těchto hůře přístupných místech. Takto odebrané vzorky jsou sice reprezentativní z hlediska superpozice vrstev (posloupnosti vrstev), ale síla jednotlivých nátěrů, měřená v těchto „zátokových“ oblastech, může být vzhledem k převládajícím rovinným plochám díla zcela zavádějící.
- Má-li být stanovena „původní“ barevná úprava povrchu, pro mikroskopické zkoumání je nutné odebrat vzorek povrchové úpravy včetně materiálu podkladu. (Tím může být např. dřevo, kámen, kov…) Jedině tak je zaručeno, že nejspodnější vrstva bude skutečně ona hledaná původní úprava[3].
- Vzorky pro analýzu pojiv barevné vrstvy malby by měly být odebrány vždy ještě před jakýmkoli restaurátorským zásahem (zpevnění, retuš, fixáž…). Kontaminace vzorku konzervačními a restaurátorskými materiály analýzu značně komplikuje, pokud ji zcela neznemožní[4].
- Při odběru vzorku se obvykle snažíme o výběr nenápadného místa, které není v prvním plánu na očích, ale zároveň je třeba pro odběr vzorku nebo pro analýzu zvolit místo, které bude z hlediska výskytu nebo rozložení zkoumané látky reprezentativní. Například při analýze fixativu pastelu na papíře (*in situ*) je nutné analyzovat místo, kde se fixativ skutečně nalézá – oblast kresby, nikoli okraj podložky, kde s největší pravděpodobností žádný fixativ nebyl aplikován. Při analýze citlivé vrstvy fotografie (např. želatiny nebo kolodia) je možné analyzovat jakékoli místo fotografie, zatímco při analýze kovu tvořícího foto-

3 Analýza povrchových úprav historických dřevěných stavebních prvků je vždy diskutabilní. Jsme sice schopni popsat nejspodnější vrstvu, ale nemůžeme o ní s jistotou tvrdit, že je to vrstva původní, neboť obvykle není známo, kolikrát byl nátěr na okenních rámech v minulosti odstraněn (opálen). I zde je vhodné odebírat vzorky ze „skrytých“ míst, kde je větší pravděpodobnost, že nátěr nebyl v minulosti odstraněn.

4 Například po fixaci nástěnné malby konsolidační látkou na bázi akrylových pryskyřic je analýza pojiva velmi komplikovaná, ale po použití vaječné emulze je analýza původního pojiva již zcela nemožná (je detekována pouze použitá vaječná emulze).

grafický obraz je nutné analyzovat tmavá místa fotografie, kde je koncentrace kovu nejvyšší.

Jak už bylo na počátku řečeno, při zadávání analýzy, tak i při interpretaci výsledků je nutná úzká spolupráce přírodovědce, restaurátora a historika umění. Přitom je třeba skládat informace ze všech oblastí chemie, které se restaurování a konzervace památek zásadně dotýkají. Jsou to:

a) Historie chemie jako přírodovědné disciplíny
Znát dobové technologické možnosti umělců, tedy vědět, které chemické poznatky mohli ve své umělecké tvorbě použít. Tyto informace mohou být důležité nejen pro potvrzení autenticity[5] díla, ale také při volbě analytické metody. (Pomáhají vymezit škálu materiálů, které mohly být v dané době použity.)

b) Historie restaurování
Je velmi užitečné mít dostatek informací o chemických prostředcích, které byly nebo mohly být v minulosti k restaurování a konzervaci používány, znát jejich složení a způsob stárnutí. Tyto znalosti mohou přispět k interpretaci výsledků chemické analýzy.

c) Analytická chemie
Zabývá se analýzou, tedy studiem materiálového složení díla nebo jeho korozních produktů. Tento obor, který se stále vyvíjí, zahrnuje řadu citlivých analytických metod.

Optimální volbou by měla být metoda reprodukovatelná[6], maximálně citlivá a zatížená co nejmenší chybou. Ideálně by tato metoda měla být také dostupná – a to i ekonomicky. Je na přírodovědci, aby na základě svých znalostí a zkušeností analytickou metodu vybral, respektive aby při jejím výběru učinil jen přijatelné kompromisy[7].

5 Pojem autenticita není jednoznačně definován, v rámci památkové péče se její výklady různí. Velmi obecně ji však lze specifikovat jako pravost, hodnověrnost či původnost.
6 Reprodukovatelnost metody je schopnost analytické metody získat ideálně stejné výsledky pří analýze téhož vzorku (analytu) měřeného různými pracovníky na přístrojích v různých laboratořích; viz norma ČSN ISO 5725: Přesnost (správnost a shodnost) metod a výsledků měření.
7 Nemá smysl analyzovat IR spektrometrií látky, které mají v IR oblasti velmi slabou či vůbec žádnou odezvu, např. symetrické molekuly nebo molekuly s lineární strukturou – jako jsou rumělka (HgS) či řada oxidů kovů (zinková běloba – ZnO, minium – $PbO \cdot PbO_2$ apod.). Je-li ovšem barevná vrstva obsahující např. zinkovou bělobu (ZnO – oxid zinečnatý) pojena olejem, s velkou pravděpodobností budou v IR spektru nalezeny vibrační pásy příslušející stearátu zinečnatému, který vzniká dlouhodobým působením oleje na ionty zinku. Ačkoliv oxid zinečnatý sám o sobě vykazuje velmi slabou odezvu v IR oblasti, může být přesto nepřímo identifikován.

3. Analytické metody, jejichž výstupem je obraz

Nejobecnější, nejjednodušší a zároveň nejužitečnější metodou při jakémkoli průzkumu je optická mikroskopie. Pozorování binokulární lupou se uplatňuje už při prohlídce díla, při posouzení jeho stavu a poškození a při výběru vhodných míst k odebrání reprezentativních vzorků pro analýzy. Optická mikroskopie slouží k popisu morfologie a struktury řady materiálů, v některých případech i k jejich identifikaci, např. k identifikaci přírodních vláken nebo typů dřevin.

Také první zhodnocení jakéhokoli odebraného vzorku se obvykle děje pod mikroskopem a některé analýzy, cílené jen na část odebraného vzorku (například analýzy jednotlivých vrstev malby), mohou být uskutečněny pouze v kombinaci s optickou mikroskopií (např. mikro FTIR spektrometrie nebo mikro Ramanova spektrometrie). I když v některých oblastech analýzy[8] byla optická mikroskopie již na konci minulého století nahrazena moderními instrumentálními metodami, optické mikroskopy zůstávají základním a nutným vybavením každé laboratoře.

Zobrazení v elektronovém skenovacím mikroskopu (SEM) poskytuje ve srovnání s optickou mikroskopií veliká zvětšení; výstupem je nebarevný obraz ve stupních

8 Např. minerální pigmenty byly v minulosti často specifikovány optickou polarizační mikroskopií tzv. roztěrem. Pojiva malby bývala identifikována pouze pod mikroskopem, na základě histologických reakcí.

šedi. Elektronová mikroskopie je vhodná pro studium morfologie jakéhokoli materiálu, ale pouze ve formě odebraných malých vzorků (velikost vzorku – řádově nanejvýše v cm – je limitována rozměry vzorkového prostoru přístroje). Jedná se tedy o invazivní analýzu, kdy vzorek musí být odebrán.

Zobrazovací metody v UV světle, jak v reálné velikosti, tak v mikro měřítku, využívají luminiscence některých látek *(většinou se jedná o organické látky, ale také o některé minerální pigmenty).* Jejich rozdílná luminiscence umožňuje jejich vzájemné rozlišení. Toho se vyžívá např. při lokalizaci míst pozdějších oprav díla, anebo rozlišení některých vrstev, které se v bílém světle pod mikroskopem jeví jako identické.

Rentgenografie a příbuzných metod se využívá ke zjištění vnitřní stavby 3D předmětů (vnitřní konstrukce, doplňky, opravy) a ke zviditelnění podmaleb pigmenty s obsahem těžkých kovů (např. olůvkem).

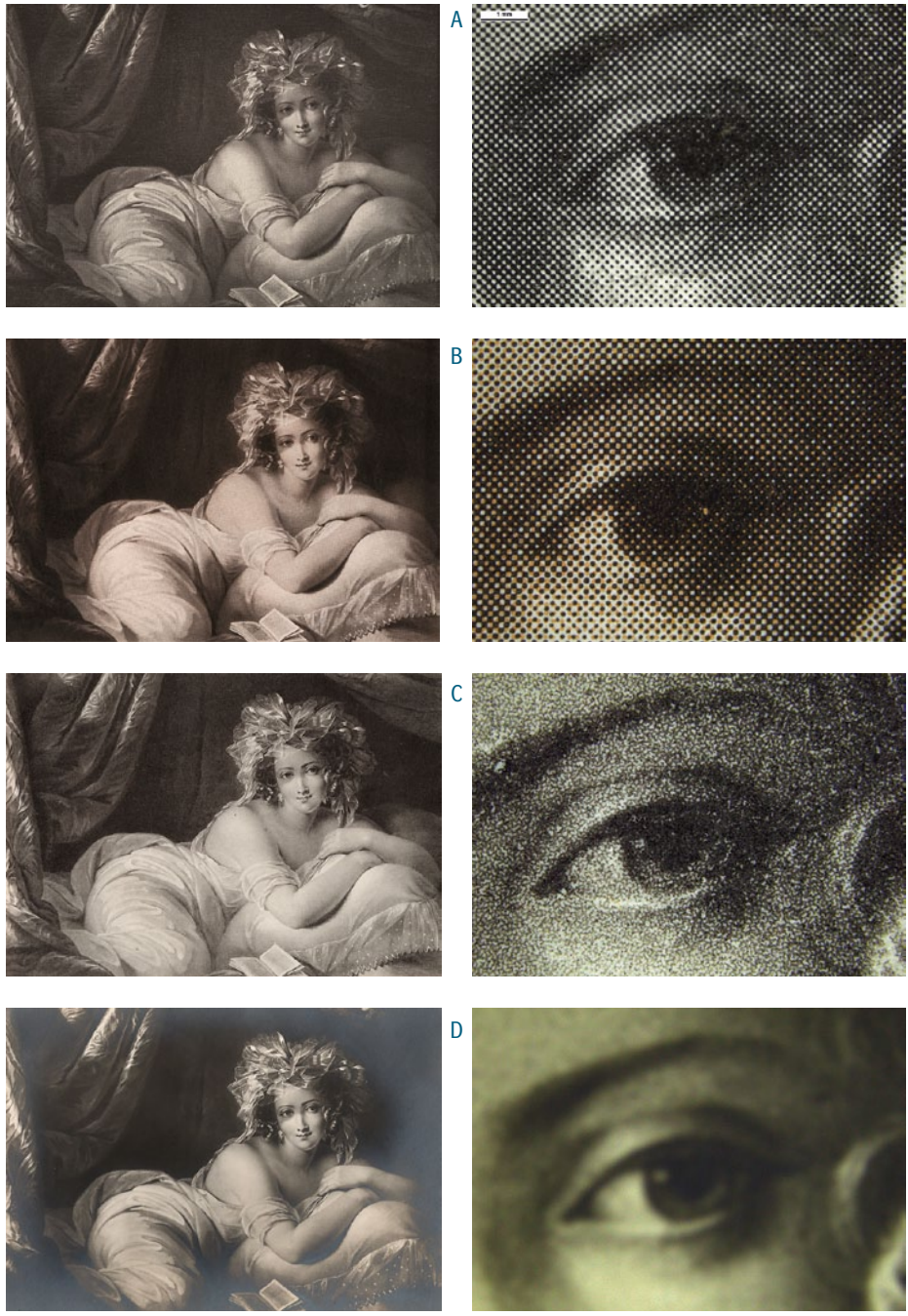
Obraz ve viditelné spektrální oblasti světla lze zkoumat pouhým okem. Záření z UV (ultrafialové), IR (infračervené) nebo RTG (rentgenové) oblasti mohou s materiálem interagovat nebo jím procházet a za určitých podmínek umožňují zobrazení situace uvnitř materiálu nebo za ním, tedy to, co je prostému oku neviditelné. Schopnost pronikat různými typy materiálů je pro různé typy záření rozdílná. Metodu průzkumu je nutné volit s ohledem na její možnosti a na cíl zkoumání.

3.1 Optická mikroskopie

Optická mikroskopie (stereomikroskop[9] neboli binokulární lupa) podává základní informace o morfologii (struktuře) povrchu díla nebo odebraného vzorku. Různá orientace a různá intenzita osvětlení umožní větší čitelnost povrchového reliéfu. Takto lze například rozlišit některé fotografické techniky či tisky (viz obr. 1), pozorovat charakter krakel[10] na malbě, strukturu kovu nebo jeho koroze či korozi na povrchu skla. Metoda umožňuje základní makroskopický a morfologický popis korozní vrstvy, lokalizaci erodovaných či degradovaných oblastí a poruch.

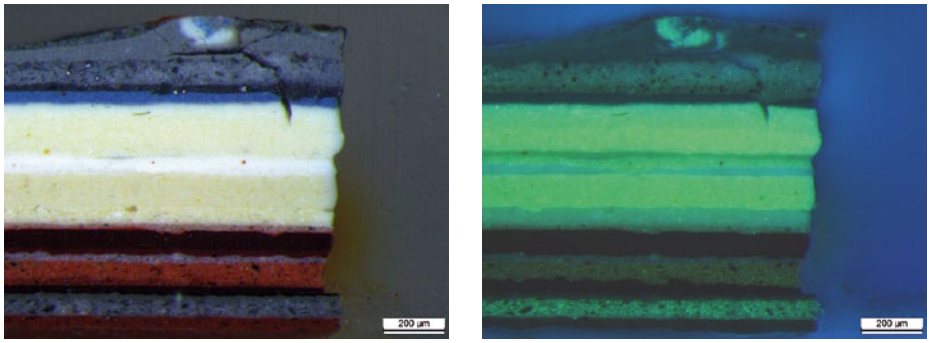
9 Stereomikroskop je mikroskop s větší hloubkou ostrosti. Je složen ze dvou samostatných optických mikroskopů, pro každé oko zvlášť. Výhoda dvou optických cest umožňuje vidět prostorově ostře do větší hloubky. V praxi to znamená, že pozorovatel vidí ostře nejen zaostřenou rovinu povrchu vzorku, ale i menší praskliny či výstupky na povrchu a výsledný obraz se mu jeví jako 3D.

10 Jedná se o praskliny či systém prasklin v obrazové vrstvě. Vzhled krakel může přispět k rozlišení malířských technik, materiálu podložky i toho, zda byla dodržena správná technologie malby. Podrobněji KUBIČKA R., ZELINGER J.: *Výkladový slovník malířství, grafiky a restaurátorství*. Grada Publishing, a. s., Praha 2004, ISBN 80-247-9046-7, str. 131.



Obr. 1: Rozlišení různých technik tisku při zvětšení pod mikroskopem: A) autotypie s lineárním rastrem a její detail, B) duplex – dvoubarevná autotypie a její detail, C) světlotisk a jeho detail, D) fotografie – bromostříbrná technika a její detail.

Optická mikroskopie v dopadajícím světle, aplikovaná na nábrusu vrstevnatého vzorku v příčném řezu, podává obraz o stratigrafii (o posloupnosti) superponovaných vrstev různých materiálů nebo nátěrů (viz obr. 2) – v tomto případě je pro mikroskopické zkoumání nutný odběr vzorku a zhotovení preparátu ve formě nábrusu[11]. Většina organických látek vykazuje v UV osvětlení přirozenou fluorescenci[12], tzv. autofluorescenci. Proto může pozorování v optickém mikroskopu ve spojení s UV osvětlením nebo s použitím selektivních histologických barviv podat i orientační informace o materiálovém složení pozorovaného vzorku, respektive o povaze přítomných organických látek (pojiv, laků, polymerních konsolidantů...) i některých minerálních pigmentů, které mají v UV světle charakteristickou fluorescenci. S pomocí optické mikroskopie lze také popsat mikrobiální poškození materiálu (řasy, bakterie, plísně)[13].



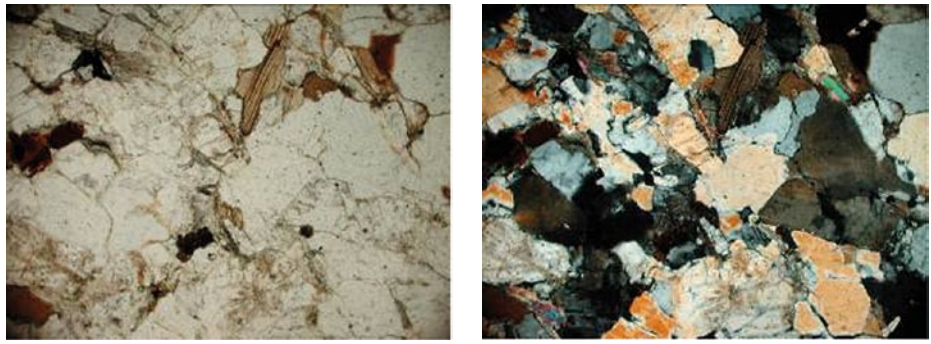
Obr. 2: Mikroskopické snímky příčného řezu (tzv. nábrus) souvrstvím laků odebraného z kapoty automobilu JAWA Minor, v dopadajícím bílém světle (vlevo) a pod ultrafialovým zářením (vpravo). Fluorescence v UV záření může zvýraznit nebo dokonce zviditelnit vrstvy, které v bílém světle barevně splývají. V tomto případě je efekt zřejmý na světlé části souvrství.

11 Pro studium souvrství je třeba připravit vzorek ve formě příčného řezu. Vzorek musí být nejprve zafixován v nějaké hmotě, která se dá snadno řezat, brousit a leštit – nejčastěji to bývají syntetické pryskyřice (polyakrylové, polyesterové nebo epoxidové). Vzorek, zafixovaný ve vytvrzené pryskyřici, je pak vybroušen a vyleštěn tak, aby plocha příčného řezu souvrstvím byla rovná a hladká. Takto připravený preparát se nazývá nábrusem (metalograficky správně výbrusem). Pro analýzu v infračervené spektrometrii je výhodnější, je-li vzorek zalisován do tablety z bromidu draselného. Podrobněji KOPECKÁ I., SVOBODOVÁ E.: Methodology for infrared spectroscopy analysis of sandwich multilayer samples of historical materials. *Heritage Science* (2014) 2:22 https://doi.org/10.1186/s40494-014-0022-1.

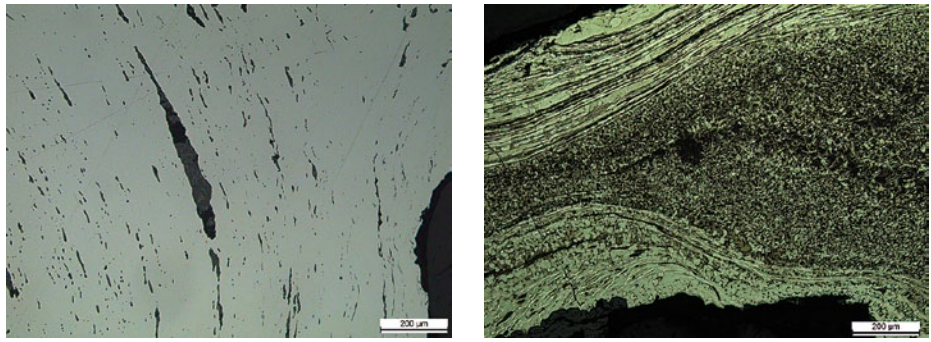
12 Jevu, kdy látka vysílá světlo, říkáme luminiscence. Může k ní docházet při chemické reakci – např. enzym luciferáza oxiduje luciferin u světlušky – a potom hovoříme o chemiluminiscenci. Pokud luminiscence nastává jako důsledek osvětlení zářením, hovoříme o fluorescenci nebo fosforescenci. Záření, které luminiscenci vyvolává (excituje), se nazývá excitační; záření, které pak ozářená látka vysílá (emituje), se nazývá emisní. U fluorescence trvá vyzařování emisního světla krátkou dobu a po zhasnutí excitačního záření emise téměř okamžitě zhasíná (asi za 10^{-8} sekundy), ale u fosforescence může k emisi docházet i dlouhou dobu po zhasnutí excitačního záření. Látky schopné fluorescence se nazývají fluorochromy.

13 Opět je nutný odběr vzorku.

Pozorování výbrusu silikátového materiálu (horniny, kamene, omítky) optickým mikroskopem v dopadajícím světle v paralelních a ve zkřížených hranolech (tzv. nikolech) je výchozím bodem k petrografickému[14] popisu materiálu (viz obr. 3). Pozorování preparátů dřeva[15] slouží k určení jeho původu, respektive k určení typu dřeva, nikoli jeho stáří. Metalografie – pozorování vybroušeného, vyleštěného a případně ještě leptaného vzorku kovu nebo slitiny slouží ke studiu vnitřní stavby kovů a slitin, způsobu jejich výroby, vad a koroze (viz obr. 4).



Obr. 3: Příklad mikroskopie petrografického výbrusu granitu (žuly) v polarizovaném světle s paralelními hranoly (vlevo) a se zkříženými hranoly (vpravo).



Obr. 4: Detaily metalografického výbrusu hlavičky nýtu z bicího hodinového stroje věžních hodin přibližně ze 17. století (vlevo před a vpravo po leptání Nitalem). Nehomogenní struktura je typická pro svářkovou ocel. Horní a spodní oblast (s hrubším zrnem) obsahuje větší podíl feritu, ve kterém jsou uloženy řádky masivních struskových vměstků. Střední jemnozrnnější pás lze charakterizovat jako perliticko-feritický.

14 Pro petrografickou analýzu je nutné vzorek odebrat a vytvořit z něj preparát ve formě nábrusu nebo výbrusu.
15 Je nutný odběr vzorku a speciální příprava mikroskopických preparátů – řezů ve dvou na sebe kolmých směrech a v tangenciálním směru – ze vzorku zalitého do parafinu nebo do měkké syntetické pryskyřice.

3.2 Konfokální mikroskopie s rozmítaným laserovým paprskem (CLSM, LSCM)

Na rozdíl od optického mikroskopu, u něhož je zvětšení limitováno vlnovou délkou světla a pozorování je zkresleno paprsky vycházejícími z hmoty nad a pod zaostřenou rovinou, konfokální mikroskop využívá jako zdroj světla lasery[16] (z oblasti UV, IR nebo viditelného spektra). Laserový paprsek prochází bodovou (konfokální) clonou a objektivem a osvětluje preparát. Paprsek světla odraženého od zaostřené roviny vzorku pak stejným objektivem prochází zpět přes dichroické zrcadlo[17] a pokračuje k bodové cloně, která propustí pouze světlo vycházející ze zaostřené roviny (světlo vycházející z jiných rovin odfiltruje). Nakonec je paprsek zesílen a detekován fotonásobičem. U konfokálního mikroskopu s rozmítaným laserovým paprskem probíhá rastrování posouváním paprsku pomocí clony na podobném principu jako pohyb paprsku po stínítku televize. Konfokální mikroskopie je v současné době využívána hlavně v biologii při studiu prostorových struktur buněk a při studiu struktury moderních kompozitních materiálů. Není však vyloučeno, že časem najde uplatnění i při průzkumu historických materiálů.

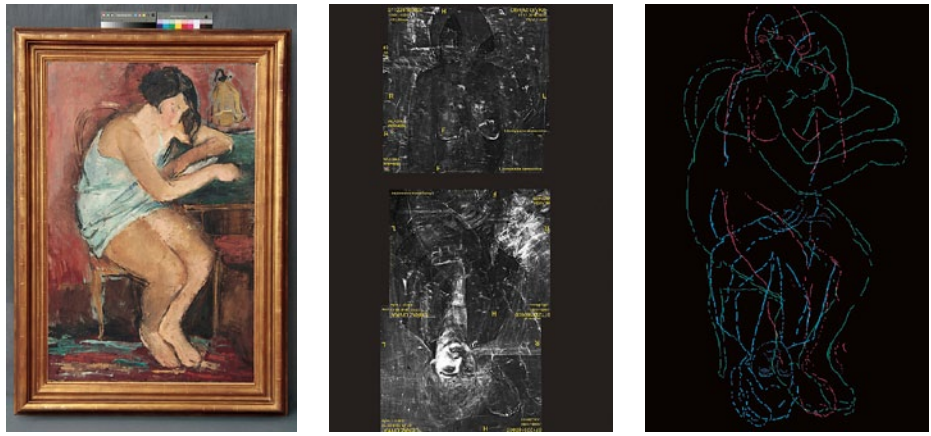
3.3 Rentgenografie a gamagrafie

Elektromagnetické vlnění v oblasti RTG záření (záření X) nebo γ-záření prochází analyzovaným materiálem a je jím více či méně absorbováno (pohlcováno). Míra absorpce je přímo úměrná hustotě analyzovaného materiálu, respektive protonovému (atomovému) číslu analyzovaných prvků. Rentgenografie nebo gamagrafie může postihnout i korozní produkty (kyslíkaté sloučeniny kovů jsou pro tento typ záření více prostupné než samotný kov).

Metoda umožňuje lokalizovat vnitřní konstrukce plastik z odlišného materiálu, doplňky, vysprávky, případně i praskliny, poruchy a zkorodované oblasti. Rentgenografie, aplikovaná na závěsnou malbu nebo polychromovanou plastiku, lokalizuje oblasti malby nebo podmalby (viz obr. 5), kde byly použity pigmenty na bázi těžkých kovů (olovnatá běloba, rumělka, minium nebo podkresba olůvkem).

16 Laser (z anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) je zdroj elektromagnetického záření o jedné konkrétní vlnové délce (koherentní a monochromatické záření), na rozdíl od např. viditelného světla, které vyzařuje elektromagnetické záření současně v celém rozmezí vlnových délek (cca 400–780 nm).

17 Dichroické zrcadlo je tenké skleněné zrcadlo, které má schopnost odrážet světlo určitého rozsahu vlnových délek a naopak jiné vlnové délky propouštět.



Obr. 5: Ukázka rentgenografie temperové malby *Čtoucí dívka* od Karla Holana (z roku 1929) na plátně ze sbírky Galerie Středočeského kraje v Kutné Hoře. Vlevo stav díla po restaurování, uprostřed RTG snímky a vpravo zákresy nalezených tří různých kompozic v podkladu malby. Modrá, nejstarší vrstva malby otočená o 180º, zachycuje sedící ženu s drdolem; červená, malba ženského aktu orientována jako pohledová nejsvrchnější malba, a zelená, nejmladší pohledová malba. RTG průzkum provedl Ján Saksun na Radiologickém oddělení Litomyšlské nemocnice. [Háková, 2017]

Obr. 6: Ukázka polychromované dřevěné sochy *Madony s Ježíškem* z druhé poloviny 14. století z Fabriana v Itálii (vlevo) a tomografický snímek spodní části sochy Madony se zabudovaným relikviářem se zámkem (vpravo). V tomogramu jsou také velmi dobře patrny spojovací hřeby. [Kapitany et al, 2016]