

Avtorica: Sabina Kramar

Vsebina

1. Uvod
2. Vrsta pridobljene informacije
3. Nedestruktivne preiskave
4. Destruktivne preiskave
5. Zaključek
6. Literatura in viri

1. Uvod

V konservatorsko-restavratorski stroki opravljamo naravoslovne preiskave zaradi različnih namenov. Tehnike izberemo glede na vrsto informacije, ki jo želimo pridobiti, ter vrsto materiala oz. stanja predmeta. Pomemben dejavnik je tudi dostopnost določene metode. Med naravoslovne preiskave, ki jih uporabljamo na tem področju, sodijo številne metode; nekatere se uporabljajo rutinsko, nekatere zahtevnejše pa le za pomembnejše predmete.

Konservator-restavrator se pri svojem delu srečuje z različnimi predmeti in objekti, vse od arheoloških najdb do sodobnih umetniških del, pri tem pa rokuje z različnimi materiali, tako anorganskimi kot organskimi, naravnimi in sintetičnimi. Med materiali, ki jih preiskujemo, so najpogostejši pigmenti, kamen, kovine, les, veziva, tekstilije, steklo, keramika, papir, pa tudi številni sintetični materiali. Različne metode nam dajo različne informacije o materialni sestavi ali stanju predmeta. Z njimi identificiramo materiale, analiziramo njihove spremembe oz. propadanje, ugotavljamo pristnost ali kasneje dodane elemente ter tudi posledice morebitnih preteklih posegov.

Ločimo metode, ki ne zahtevajo odvzema vzorca in jih imenujemo **neporušne (nedestruktivne)**, in take, ki zahtevajo odvzem vzorca in so zato **porušne (destruktivne)**. Pomembna je optimizacija pridobljenih informacij ob čim manjšem odvzemu vzorca. V vsak sklop spada več metod in vsaka ima svoje prednosti in slabosti. Poudariti je treba, da je za pravilen rezultat priporočljivo kombinirati več metod.

Večina uporabljenih metod je destruktivnih, saj moramo za analizo z objekta odvzeti vzorec, pa čeprav majhno količino. Nedestruktivne metode omogočajo preiskave na mestu samem (in situ) ali pa predmet, če je premičen, prenesemo v laboratorij, kjer opravljajo preiskave.

2. Vrsta pridobljene informacije

Z uporabo določene preiskave lahko dobimo odgovore na številna vprašanja. Med prvimi in najpomembnejšimi je vsekakor **sestava materialov in zgradba predmetov**. Ta informacija ima dokumentacijski značaj, saj prispeva k védenju o določenem predmetu, hkrati pa je tudi osnova za izbor optimalnega konservatorsko-restavratorskega posega.

Ugotavljamo lahko tudi **tehnologijo izdelave ter pristnost predmeta**.

Tehnološke študije vključujejo identifikacijo materialov in tehnike izdelave. Kot primer lahko navedemo, da so pri keramiki med glavnimi cilji identifikacija mineraloške sestave ter vir in tehnike za glaziranje, pa tudi uporabljena temperatura in atmosfera žganja.

Za konservatorsko-restavratorski poseg je izredno pomembno **stanje predmeta oz. ugotavlja procesov propadanja in sekundarnih sprememb na predmetu** ter vrsta teh sprememb.

Na podlagi nekaterih tehnik lahko ugotovimo tudi **izvor predmeta oz. uporabljenih materialov**. Izvor materialov, kot so steklo ali kovine, lahko določimo na podlagi kemične sestave, ki je značilna za določene delavnice in za določeno obdobje. Podobno je tudi s kamnitimi in keramičnimi predmeti. Študije provenience vključujejo karakterizacijo in lociranje naravnih nahajališč vhodnih surovin, ki so jih uporabili za izdelavo predmetov, kar omogoča prepoznavanje vzorcev v nabavi materiala, trgovanju in izmenjavi. Izvora pa ne določamo samo s stilistično primerjavo, pač pa še na dva načina: prvi je primerjanje sestave predmeta z znanim nahajališčem, drugi pa primerjava sestave predmeta s kontrolno skupino predmetov, katerih izvor je določen oz. znan. Kemijska karakterizacija vključuje predvsem t. i. sledne prvine, ki so ponavadi značilne oz. pokazatelj določenega geološkega izvora surovine. Uporabljamo številne metode, npr. metodo rentgenske fluorescenčne spektrometrije (XRF), induktivno sklopljeno plazmo z masno spektrometrijo (ICP-MS) ali nevtronsko aktivacijsko analizo (NAA). Včasih pomagata tudi mineraloška in petrografska karakterizacija.

3. Nedestruktivne preiskave

Pod pojmom nedestruktivne preiskave na splošno poznamo t. i. **neinvazivne, mikrodestruktivne ter nedestruktivne tehnike**. Resnično neinvazivne tehnike so tiste, ki ne zahtevajo odvzema vzorcev s predmeta – torej po preiskavi pustijo predmet v enakem stanju kot pred preiskavo. Tehnike, pri katerih porabimo material ali odvzamemo minimalno količino vzorca, se imenujejo mikrodestruktivne. Nedestruktivne pa so tiste tehnike, pri katerih lahko vzorec ali celoten predmet ponovno analiziramo z drugo tehniko. Kljub vsemu v tem poglavju obravnavamo le neinvazivne tehnike, preostale pa navajamo pri destruktivnih metodah.

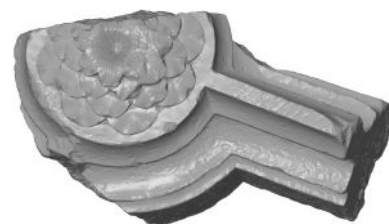
Nedestruktivne preiskave materialov oz. nedestruktivno testiranje uporabljamo za pridobivanje zelenih informacij, ne da bi za to posegali v predmet ali ga poškodovali. To je glavna prednost teh metod.

Med najpogosteje uporabljene neporušne metode sodijo **ultravijolična fluorescenca (UVF), infrardeča fotografija in infrardeča reflektografija (IRR), rentgenska radiografija, rentgenska fluorescenčna spektroskopija (XRF) ter 3D-skeniranje (slika 1)**.

Slika 1: (a) Zajem podatkov z optičnim 3D-skenerjem. (b) 3D-posnetek kamnitega sklepnika.



1a



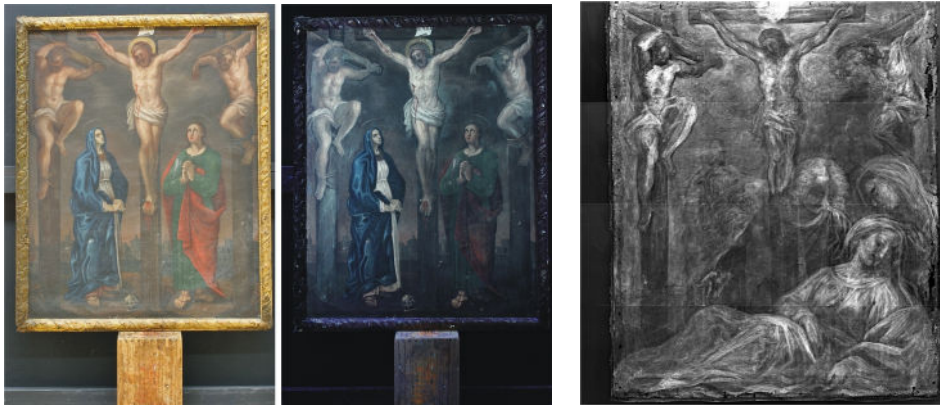
1b

Eden izmed prvih postopkov je prav gotovo **vizualni pregled predmeta** pred začetkom konservatorsko-restavratorskih postopkov, pri katerem se natančno pregledajo gradniki umetnine. Predmet pregledujemo pri **vidni (VIS) in ultravijolični svetlobi** oz. fluorescenci (UVF) in ga fotografiramo. Ko z ultravijolično svetlobo predmet osvetlimo, lahko iz UVF-podobe razberemo naknadne dopolnitve slikovnih plasti (retuše, preslikave) in ugotovimo, ali je bila slika lakirana (**slika 2a**). Po drugi strani pa lahko z infrardečo fotografijo in reflektografijo ločujemo med pigmenti in črnili, ugotavljamo prisotnost podrisb, skic, uporabo različnih materialov ipd.

Predmet lahko pregledamo tudi z **lupo ali stereomikroskopom (slika 3a)**. Tako opazujemo morebitne poškodbe vzorca, pa tudi barvo in druge teksture ter strukture predmeta ali samega materiala (**slika 3b**).

Dokaj pogosta in dostopna je uporaba **rentgenske radiografije**. Pri tej tehniki z rentgenskimi žarki fotografiramo celoten predmet ali samo detajle. Žarki, ki imajo močno energijo, prodirajo skozi večino materialov, njihova absorpcija je odvisna od lastnosti snovi in njene

Slika 2: (a) Posnetek v vidni svetlobi (levo) in UVF-posnetek (desno) slike na platnu. (b) Rentgenski posnetek slike na platnu.



2a

2b

debeline. Rentgenska podoba predmeta nam pokaže njegovo notranjo zgradbo. Rutinsko se uporablja pri preiskavah slik na platnu, pri katerih ugotavljamo morebitne preslikave (slika 2b). Pogosto jo uporabljamo tudi pri kovinskih predmetih ali kovinskih sprimkih. S to tehniko tako lahko razpoznamo obliko določenega predmeta, ki je zaradi sekundarnih sprememb oz. korozijskih produktov pri vizualnem pregledu sicer skrita (slika 4). Tu in tam imamo priložnost rokovati tudi z nekoliko redkejšimi predmeti, pri katerih bi radi videli njihovo notranjo zgradbo, npr. pri amuletu iz Slovenskega etnografskega muzeja (slika 5).

Slika 4: (a) Stanje kovinskega sprimka pred konservatorsko-restavratorskim posegom. (b) Rentgenski posnetek sprimka. (c) Skenogram sprimka pred konservatorsko-restavratorskim posegom.



4a

4b

4c

Naslednja metoda, ki omogoča nedestruktivne preiskave predmetov, vendar je nekoliko bolj zahtevna in manj dostopna, je **rentgenska računalniška mikrotomografija (CT)** (slika 6). To je tehnika rentgenskega slikanja pri

različni postavitvi vzorca, s katero dobimo tridimenzionalni posnetek notranjih struktur materiala in tudi površine (slika 7). Dosežemo lahko prostorsko ločljivost do okoli enega mikrometra, vendar je končna ločljivost močno odvisna od velikosti preiskovanega predmeta. Metoda je popolnoma nedestruktivna, kar je velika prednost pri preiskavah arheoloških oz. muzejskih predmetov. Ugotavljamo lahko notranjo zgradbo predmeta, homogenost oz.

Slika 5: (a) Amulet iz afriške zbirke Slovenskega etnografskega muzeja. (b) Rentgenski posnetek amuleta razkriva, da je napolnjen s peskom.



5a

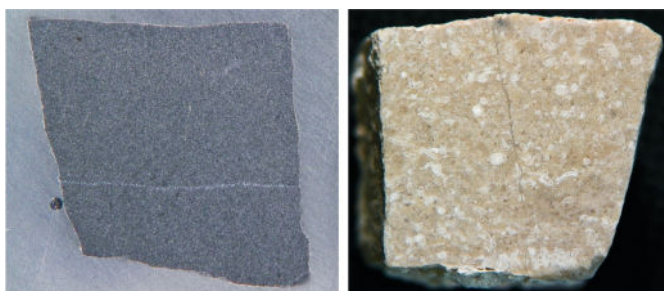


5b

Slika 3: (a) Stereomikroskop. (b) Posnetek kamnitih mozaičnih kock pod stereomikroskopom. Desno: črni apnenec, levo: beli apnenec.



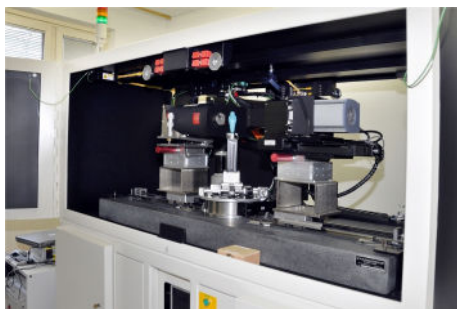
3a



3b

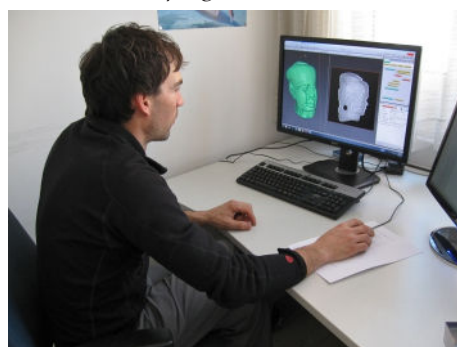
heterogenost materiala ali predmeta, npr. način glaziranja pri egipčanski fajansi (slika 8). Včasih želimo vedeti, ali je določen predmet izdelan iz enega kosa ali

Slika 6: Predmet v komori računalniškega mikrotomografa

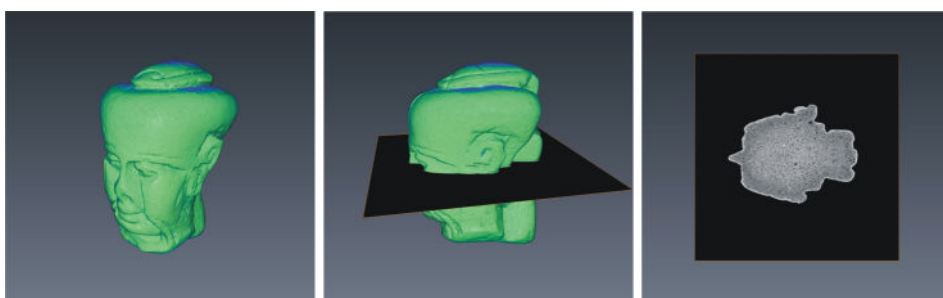


več, kot se je to npr. izkazalo pri uhanu, ki je bil skovan iz enega kosa medenine (slika 9). Tehnika pa tudi omogoča, da po 3D-rekonstrukciji izdelamo natančno kopijo (slika 10).

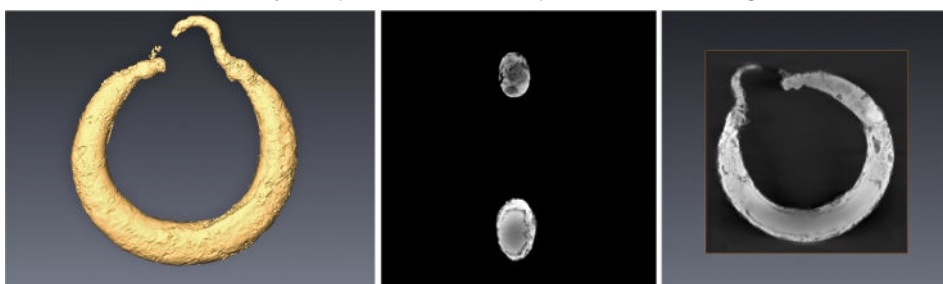
Slika 7: Obdelava podatkov z računalniškim programom



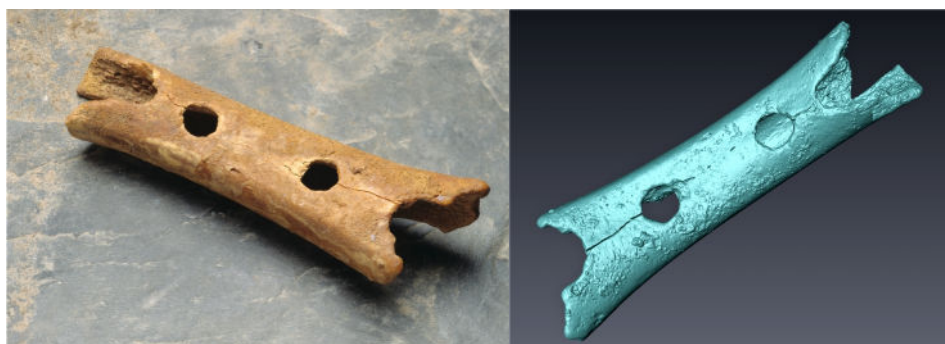
Slika 8: 3D-rekonstrukcija tomografskega posnetka predmeta iz egipčanske fajanse, označeno mesto prečnega preseka in prečni presek



Slika 9: 3D-rekonstrukcija ter prečni in vzdolžni presek medeninastega uhana



Slika 10: (a) Piščal z Divjih bab, 60 tisoč let pred sedanostjo, najdišče Divje babe na Idrijskem, kost jamskega medveda, d. 11,2 cm, hrani Narodni muzej Slovenije. (b) 3D-posnetek prazgodovinske piščali, ki je služila za izdelavo kopije.



10a

10b

Z uporabo **mikrodestruktivne karakterizacijske metode DRMS** (drilling resistance measurement system) zanesljivo določamo učinkovitost in globino utrjevanja najrazličnejših historičnih materialov. Metoda DRMS omogoča tudi globinsko analizo trdnosti materialov. Princip njenega delovanja je merjenje sile vrtenja svedra v preiskovani material s konstantno hitrostjo. Z merjenjem vrednosti sile vrtenja v odvisnosti od globine lahko zanesljivo spremljamo spreminjanje trdnosti

Slika 11: DRMS-preiskava kipov



materiala po njegovi globini. S tem lahko določimo homogenost materiala, stopnjo propadanja na različnih globinah in učinkovitost utrjevanja ob restavratorskih posegih. Z metodo je tako možno ločiti tudi plasti kasneje dodanih elementov (slika 11).

Za ugotavljanje sestave imamo na voljo kar nekaj metod, odvisno od vrste materiala oz. predmeta. Lahko si pomagamo tudi s preprostimi tehnikami, npr. z magnetom lahko preizkusimo, ali je predmet železen. Na razpolago so tudi številne nekoliko zahtevnejše tehnike, ki omogočajo ugotavljanje sestave

materialov. Mednje sodijo **rentgenska fluorescenčna spektroskopija, ramanska mikrospektroskopija, spektroskopija FTIR in vrstična elektronska mikroskopija (SEM).**

Analizna tehnika, s katero lahko brez nevarnosti za predmet raziščemo, iz katerih elementov je sestavljen, je **rentgenska fluorescenčna spektroskopija (slika 12).** Prenosni rentgenski fluorescentni analizator s pomočjo

Slika 12: Preiskave predmeta s prenosnim rentgenskim fluorescenčnim spektrometrom



srebrove rentgenske cevi pošilja rentgenske žarke na/v vzorec in pri tem na detektorju meri emitirane energije fluorescentnih rentgenskih žarkov. Prednost te metode je v tem, da za analizo ne potrebujemo nikakršne priprave vzorca, po opravljeni analizi pa predmet ostane nedotaknjen. Celotna analiza poteka izjemno hitro, saj je povprečni čas merjenja največ tri minute. Preiščemo lahko različne kovinske, kamnite, steklene ali keramične predmete (slika 13).

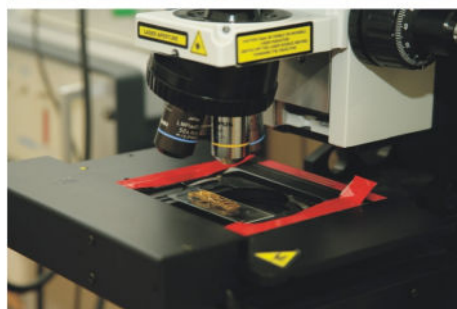
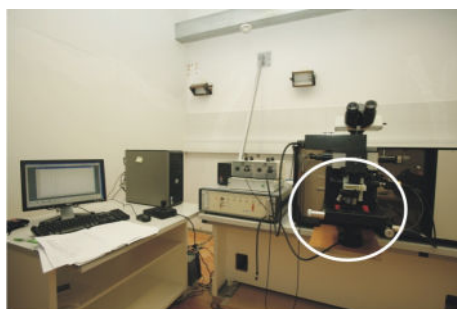
Ena izmed možnosti, ki je na razpolago kot nedestruktivna preiskava različnih materialov in predmetov, je uporaba **ramanskega mikrospektrometra**, ki omogoča hitro informacijo in ne zahteva predhodne priprave vzorca oz. predmeta. Nedestruktivno lahko analiziramo manjše predmete,

Slika 13: Preiskave rimske fibule na XRF-mizici



katerih velikost je omejena s razdaljo med mizico in objektivom mikroskopa (sliki 14 in 15). Velikokrat namreč kljub vsemu s to metodo analiziramo odvzete vzorce, ki jih postavimo na mizico. Z ramanskim mikrospektrometrom analiziramo izbrano točko, pri čemer kot rezultat dobimo spekter, ki je karakterističen za posamezni mineral. Nekatere izvedbe prenosnega ramanskega spektrometra omogočajo in situ

Slika 14: Preiskave dragih kamnov – granatov iz poznoantičnega okova z ramanskim mikrospektrometrom



preiskave objektov ali predmetov brez odvzema vzorca. Nekateri neprenosni spektrometri pa imajo horizontalni izhod laserskega žarka, kar omogoča analizo večjega predmeta, saj analiza ni omejena le na razdaljo med mizico in objektivom. Ugotavljamo lahko vrsto različnih anorganskih in tudi organskih materialov, kot so dragi kamni, pigmenti in produkti preperevanja, predvsem vrsta topnih soli. Muzeji hranijo številne predmete z dragimi kamni, ki jih večinoma ni bilo mogoče analizirati, saj so vgrajeni v predmet. Druge kamne bi za potrebe nekaterih analiz namreč morali ločiti od

Slika 15: Preiskave dragih kamnov na baročnem kelihu z ramanskim mikrospektrometrom



predmeta, s tem pa bi ga poškodovali. Zaradi tega mineralne sestave dragih kamnov pri marsikaterem predmetu ni bilo mogoče določiti oz. preveriti, opis predmeta pa ostaja pri splošni informaciji (npr. »dragi kamen«) ali podajanju barve (npr. »rdeč dragi kamen«).

Fourierjeva transformacijska infrardeča spektroskopija (FTIR), ki jo uporabljamo za preiskave anorganskih in predvsem organskih materialov, ponavadi zahteva odvzem mikrovzorca. Ena izmed možnosti omogoča tudi nedestruktivne preiskave predmeta, npr. papirnega gradiva ali tekstilij. Ugotavljamo lahko npr. strukturne

Slika 16: (a) Fibula in (b) SEM-EDS-posnetek dela fibule, okrašenega z nieliranjem



16a

16b

Slika 17: (a) Delo z elektronskim mikroskopom. (b) Pripravljene zbruski in obrusi vzorcev različnih materialov.



17a

spremembe celuloznih vlaken ter identificiramo prisotnost polnil in klejev na analiziranih predmetih kulturne dediščine na papirju.

Kadar je predmet dovolj majhen, lahko njegovo sestavo ugotovljamo tudi z vrstičnim elektronskim mikroskopom z energijsko disperzijskim spektrometrom (SEM-EDS). V tem primeru je velikost predmeta omejena na velikost delovnega prostora mikroskopa – torej na nekaj centimetrov (sliki 16 in 17a).



17b

4. Destruktivne preiskave

Pri destruktivnih metodah je potreben odvzem vzorca, z analizo lahko predmet spremenimo ali porabimo del materiala. Vzorec je pogosto mikroskopskih ali milimetrskih velikosti, zato govorimo tudi o mikrodestruktivnih metodah. Velikost odvzetega vzorca v prvi vrsti narekuje velikost in stanje predmeta, seveda pa tudi izbrana metoda.

Na razpolago imamo veliko število destruktivnih metod, ki zahtevajo različne količine odvzetega vzorca; tega je lahko od nekaj miligramov do nekaj gramov. Nekaterih informacij ne moremo pridobiti brez

Slika 18: Delo z optičnim mikroskopom



odvzema vzorca. Med destruktivne metode, ki se najpogosteje uporabljajo v konservatorstvu-restavratorstvu, sodijo optična in vrstična elektronska mikroskopija z energijsko disperzijskim spektrometrom, infrardeča in ramanska spektroskopija, praškovna rentgenska difrakcija (XRD), plinska kromatografija z masno spektroskopijo (GC-MS) itd. Marsikatera metoda je v določenih pogojih lahko tudi nedestruktivna ali pa je možna tudi izvedba v prenosni obliki.

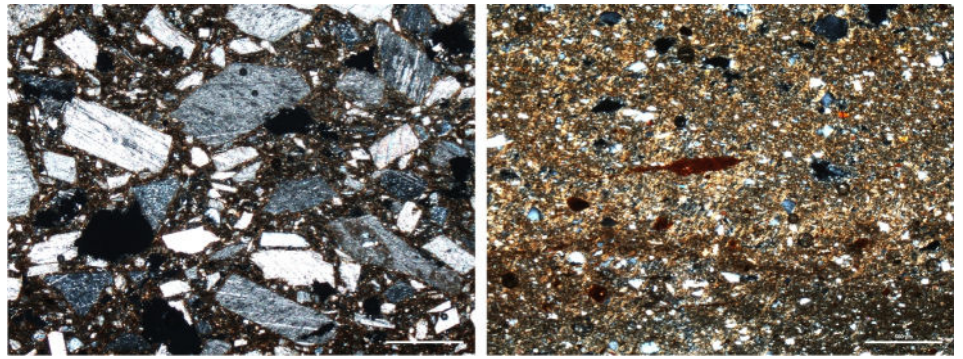
Optična mikroskopija gotovo sodi med najpogosteje uporabljene metode, poleg tega je tudi dokaj dostopna. Za preiskave odvezamemo vzorec, ki ga ponavadi zalijemo v

smolo in spoliramo v obrus ali tanek zbrusek (slika 17b). Preiskave v odsevni in presevni svetlobi omogočajo preiskave zgradbe velikega spektra materialov in njihovo identifikacijo, in to tako organskih kot anorganskih kovinskih in nekovinskih materialov (slike 18-22a).

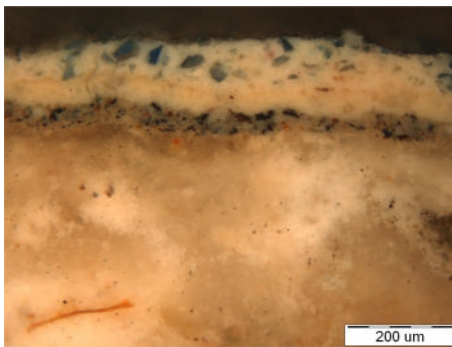
Preiskujemo lahko stratigrafijo barvnih plasti in ometov, določamo vrsto kamnin, keramike, kovin ali zgradbo sekundarnih pojavov.

Tako pripravljene vzorce, pa tudi vzorce brez posebne predhodne

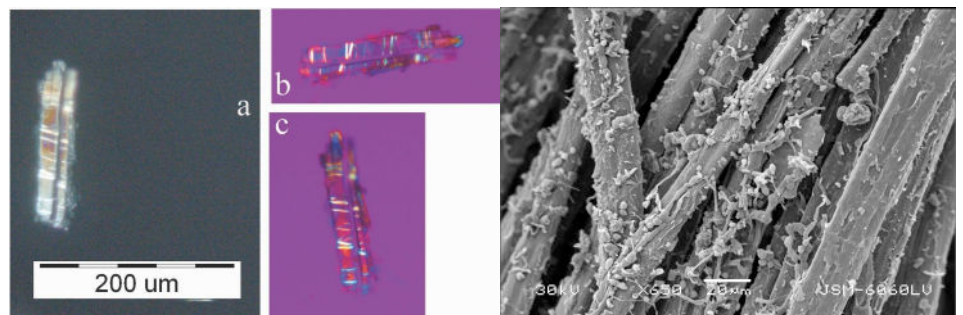
Slika 21: Zbrusek vzorca grobe in fine keramike v presevni svetlobi



Slika 19: Stratigrafija barvnih plasti stenske poslikave v odsevni svetlobi



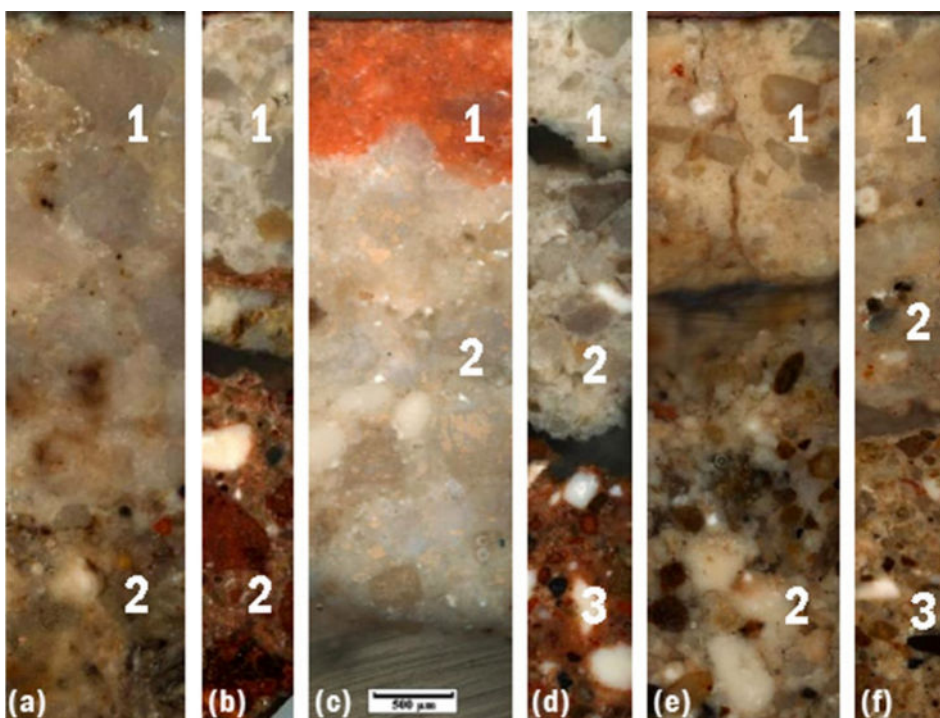
Slika 22: (a) Lanena vlakna s fibule v presevni svetlobi. (b) Fotografija lanenih vlaken, odvzetih s hrbtišča slike in okuženih z glivami, narejena z elektronskim mikroskopom.



22a

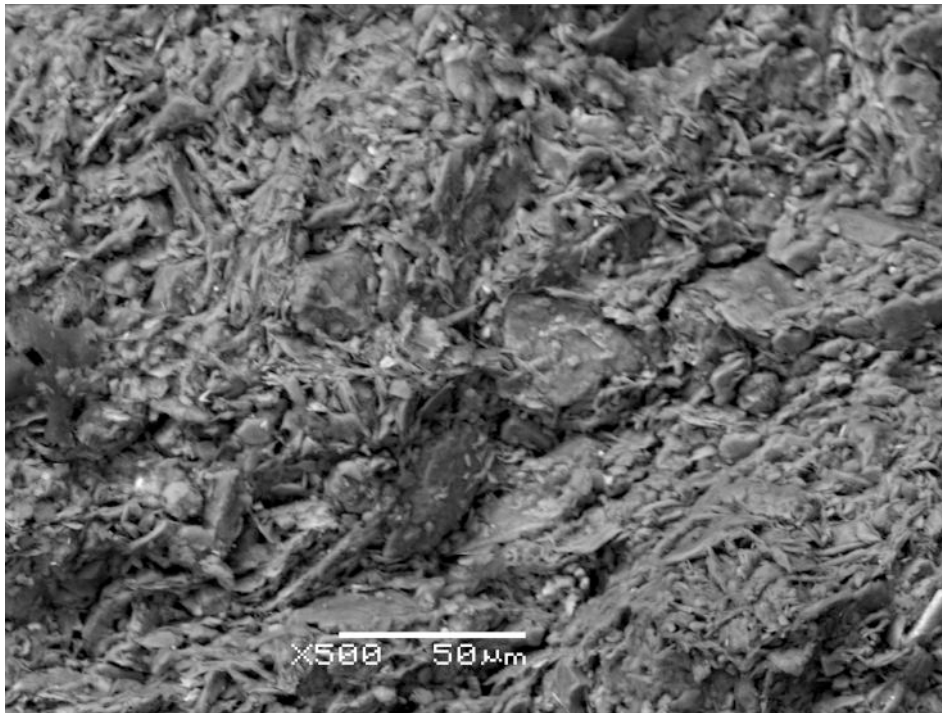
22b

Slika 20: Stratigrafija ometov v odsevni svetlobi



priprave, lahko preiskujemo tudi z drugimi metodami. Ena izmed njih je **elektronska mikroskopija**, ki nam da informacijo o elementni sestavi vzorcev v točno določeni točki (sliki 22b in 23). Opazujemo lahko tudi zgradbo predmetov, npr. debelino določenih plasti ali glazur, velikost in obliko posameznih zrn itd. Poleg tega lahko opazimo spremembe, ki z optičnim mikroskopom niso vidne. Prav tako lahko vzorce analiziramo z **ramansko** (sliki 24 in 25) in **Fourierjevo transformacijsko infrardečo mikrospektroskopijo** (slika 26). Ramansko mikrospektroskopijo uporabljamo predvsem pri identifikaciji pigmentov, infrardečo spektroskopijo pa za ugotavljanje organskih materialov, npr. veziv.

Slika 23: SEM-EDS-posnetek odlomka keramike



Nekatere tehnike zahtevajo, da različne količine vzorca homogeniziramo in uprašimo. Tako lahko npr. z **rentgensko praškovno difrakcijsko analizo** določamo kvalitativno in kvantitativno mineralno sestavo vzorca. Preiskujemo lahko številne materiale, predvsem anorganske

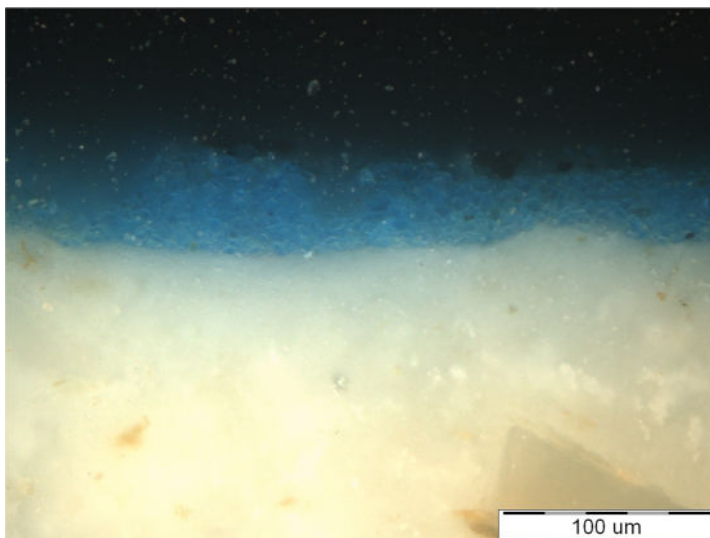
nekovinske ter kamnite in keramične materiale, in sekundarne produkte, npr. vrsto kristalizirane topne soli. Potreben je odvzem vzorca, ki ga homogeniziramo in zdrobimo v prah. Odvisno od posamezne aparature za analizo potrebujemo od nekaj miligramov do 1 grama vzorca.

Za določitev provenience določenih materialov uporabljamo različne tehnike, s katerimi določamo kemijsko sestavo, predvsem sledne prvine, npr. **induktivno sklopljeno plazmo z masnim spektrometrom (ICP-MS)**, **metodo protonsko vzbujenih rentgenskih žarkov (PIXE)**, **metodo protonsko vzbujenih žarkov gama (PIGE)**, **nevtronsko aktivacijsko analizo (NAA)** itd. S **plinsko kromatografijo** lahko ugotovljamo sestavo organskih snovi, npr. voskov. Za ugotavljanje provenience kamnin so pogoste tudi **izotopske analize**, za katere pa zadostujejo že manjše količine materialov. Glejte tudi poglavje 6.3.7.

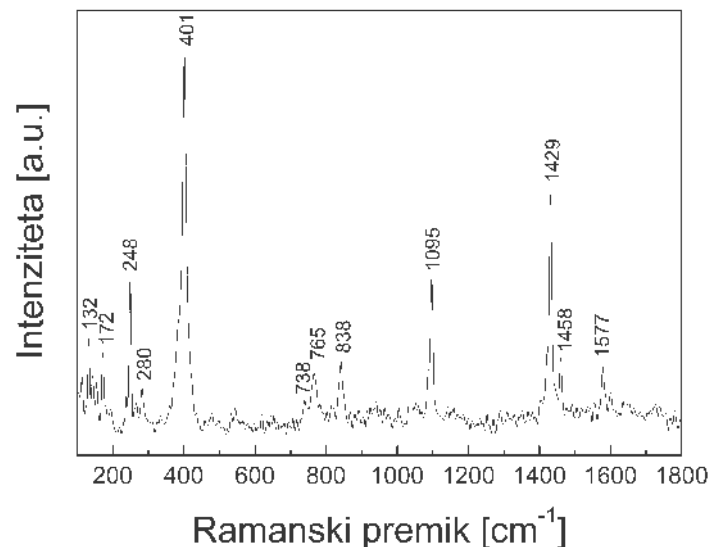
5. Zaključek

Na razpolago imamo številne preiskovalne metode, na podlagi katerih lahko ugotovljamo vrsto materialov oz. zgradbo predmetov. Informacije, ki jih lahko dobimo s posamezno metodo, ter stanje predmeta poleg določenih specifičnih vprašanj narekujejo izbiro metode, pri čemer je pomembna tudi njena dostopnost.

Slika 24: (a) Presek modre barvne plasti. (b) Ramanski spekter pigmenta – azurit

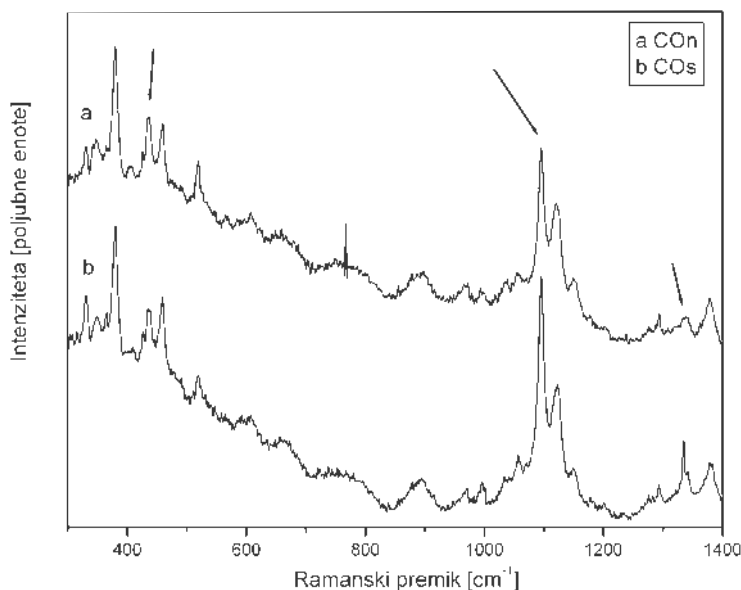


24a



24b

Slika 25: Ramanska spektra sodobnega bombaža (CO_n) in umetno staranega bombaža (CO_s)



Glede na to, ali metoda zahteva odvzem vzorca ali ne, ločimo destruktivne in nedestruktivne metode. Nekatere uporabljamo skorajda rutinsko in so dostopne v konservatorsko-restavratorskih delavnicah, nekatere pa le za pomembnejše predmete oz. specifična vprašanja in so dostopne na univerzah ali inštitutih. Poudariti je treba, da je za kvaliteten rezultat pogosto potrebno kombiniranje metod.

6. Literatura in viri

1. Annemie Adriaens, Non-destructive analysis and testing of museum objects: An overview of 5 years of research, *Spectrochimica Acta Part B* 60 (2005), 1503–1516.
2. James Martin, Testing objects, *Scientific Examination and Materials Analysis in Authenticity Studies*, v: *Fakes and Forgeries: The Art of Deception* (2007), 141–147.

3. Peter Vandenabeele, Jim Tate, Luc Moens, Non-destructive analysis of museum objects by fibre-optic Raman spectroscopy, *Anal Bioanal Chem* (2007), 387: 813–819.

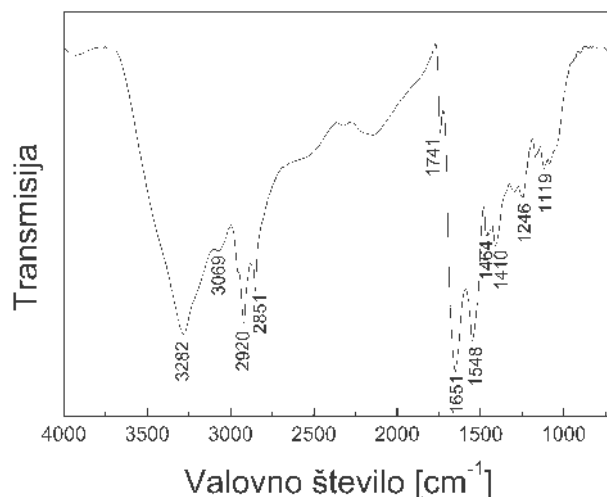
Avtorji fotografij

- Valentin Benedik: slika 14
 Aleš Česen: slike 7, 8, 9
 Janko Čretnik: slika 1
 Matej Dolenc: sliki 12, 13
 Sonja Fister: sliki 2b, 5b
 Maja Gutman: slike 3a, 19, 20, 24, 26
 Marko Habič: slika 5a
 Katja Kavkler: sliki 22, 25
 Petra Kavšek: slika 16a
 Miro Klincov: slika 4b
 Lidija Korat: slika 10b
 Sabina Kramar: slike 15, 16b, 21, 23
 Robert Kuret: slika 11
 Tomaž Lauko: slika 10a
 Matevž Peternoster: slika 4a
 Lucija Štepančič: slika 2a
 Andrej Šmuc: slika 3b
 Ivan Turk: slika 4c
 Matjaž Zupanc: slike 6, 17a, 17b, 18

Slika 26: (a) Spektrometer FTIR. (b) FTIR-spekter veziva v barvni plasti – prisotnost proteinov, najverjetneje gre za jajčni rumenjaki.



26a



26b