

MOŽNOSTI VYUŽITÍ NEDESTRUKTIVNÍCH ANALÝZ NA BÁZI RTG ZÁŘENÍ V ARCHEOLOGII

Jan Říha*, Denisa Brejchová*, Petr Menšík**, Petr Koscelník**, Ondřej Chvojka†

*Nové technologie – výzkumné centrum, Západočeská univerzita v Plzni

**Katedra archeologie, Filozofická fakulta, Západočeská univerzita v Plzni

†Archeologický ústav, Filozofická fakulta, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
janriha@ntc.zcu.cz, pmensik@kar.zcu.cz

The usage possibilities of non-destructive analyses on the basis of X-ray radiation in archaeology

Abstract—X-ray diffraction (XRD) and X-ray fluorescence spectrometry (XRF) are among the basic methods for evaluation of the inner structure and chemical composition of materials. This paper describes the principles and possibilities of using these methods primarily in archaeology and anthropology. Specific results of analyses of a series of ceramic potsherds and a steel crossbow arrow are presented.

Keywords—X-ray diffraction; X-ray fluorescence; material structure; phase analysis; chemical composition; archaeology; anthropology

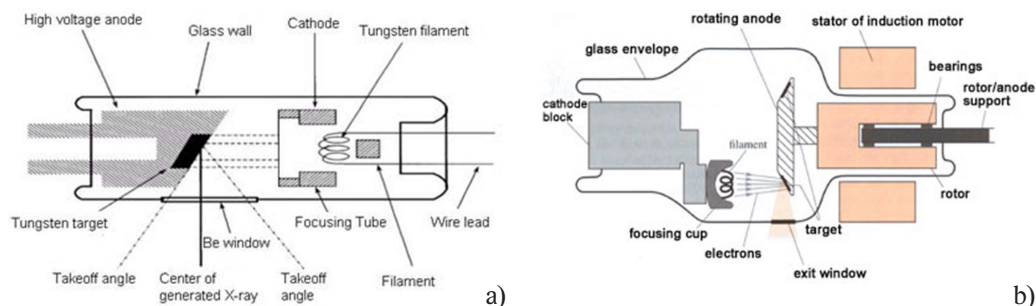
ÚVOD

PŘÍSPĚVEK je výsledkem mezioborové spolupráce Katedry archeologie a Výzkumného centra – Nové technologie, které se zabývá především vývojem nových speciálních materiálů a měřením jejich vlastností, vývojem laserových technologií v oblasti materiálového inženýrství a počítačovým modelováním speciálních problémů, jako je například chování lidského těla během autonehody, proudění plynů a kapalin

nebo deformace kontejnerů na vyhořelé jaderné palivo během nárazů. Součástí přístrojového vybavení jsou, kromě jiného, špičkové analytické přístroje umožňující podrobnou charakteristiku širokého spektra materiálů. Takovéto analýzy pak mohou také v archeologii výrazně rozšířit okruh informací o zkoumaných artefaktech. V této práci byly využity nedestruktivní analýzy na bázi rentgenového záření, které podávají informace o chemickém složení a struktuře (vnitřním uspořádání) materiálu, čímž lze například usuzovat na místo původu výrobních surovin nebo kvalitu zpracování jednotlivých výrobků.

Objev rentgenového záření se řadí mezi nejvýznamnější objevy, které lidstvo uskutečnilo. Je to dáno zejména velmi širokým polem aplikací, v nichž lze toto záření využít. V současné době jeho působnost sahá od medicíny, přes například antropologii a defektoskopii, až po výzkum struktury látek. Objevitelem tohoto záření byl německý fyzik Wilhelm Conrad Röntgen 8. listopadu 1895, který při pokusu s katodovými paprsky objevil do té doby neznámé záření, které dokázalo prostupovat i neprůhlednými látkami (Kraus 1985; Valvoda, V. et al. 1992).

Rentgenové záření je v elektromagnetickém spektru umístěno mezi ultrafialovým zářením



Obrázek 1. Rentgenové lampy, a) s pevnou anodou (X-ray tube), b) s rotační anodou (Components of an X-ray).

a zářením gama v intervalu vlnových délek $10^{-12} \div 10^{-10}$ nm. Nejrozšířenějším zdrojem umělého rentgenového záření jsou rentgenové lampy (obr. 1 a).

Jako katoda slouží wolframové vlákno rozžhavené na velmi vysokou teplotu, pracující ve vakuu 10^{-4} Pa. Z vlákna jsou pak uvolňovány elektrony urychlované v elektrickém poli, jež pak s velkou energií dopadají na povrch anody, kde generují RTG záření. Zejména v medicíně se používají rentgenky s rotační anodou mající vyšší intenzitu rentgenového záření (obr. 1 b).

Pro analytické metody se v drtivé většině používá takzvané charakteristické záření, které vzniká na základě diskretních hladin v atomech uvolněním některého z elektronů z vnitřních hladin elektronového obalu atomu.

RENTGENOVÁ DIFRAKCE

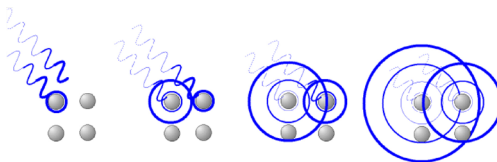
Rentgenová difrakce je základní metodou pro studium vnitřního uspořádání – struktury – krystalických látek. Je založena na interakci fotonů RTG záření s elektrony v atomech zkoumaného materiálu, kdy dochází k takzvanému *pružnému rozptylu* (bez ztráty energie) RTG záření (obr. 2, 3). Díky pravidelnému periodickému uspořádání atomů v krystalické látce dochází k rozptylu a následné interferenci RTG záření od jednotlivých rovnoběžných krystalových rovin ve zkoumaném vzorku, a tím ke vzniku difrakčních maxim, jejichž poloha, intenzita a tvar závisí na druhu atomů a dokonalosti jejich uspořádání v 3D prostoru. Podmínky, za nichž dochází k interferenci (skládání) jednotlivých difraktovaných paprsků, a tím ke vzniku difrakčního maxima (difrakční linie), popisuje Braggův zákon:

$$n \cdot \lambda = 2d \cdot \sin\theta$$

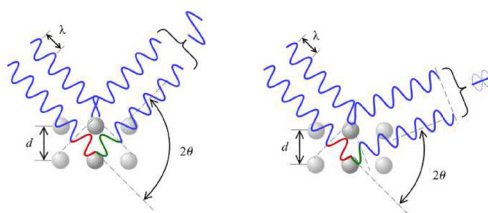
,kde λ je vlnová délka RTG záření, θ je Braggův úhel a d je vzdálenost krystalových rovin. K difrakci dochází, je-li dráhový rozdíl paprsků difraktovaných dvěma sousedními krystalovými rovinami roven celistvému násobku vlnové délky (obr. 4). Každé difrakční maximum potom odpovídá osnově (souboru) rovnoběžných rovin v krystalu, které jsou značeny pomocí tzv. Millerových indexů (obr. 5).

Pro analýzu struktury se používají dvě základní metody RTG difrakce. *Monokrystalová (Laueho) metoda* – určená pro studium mono-

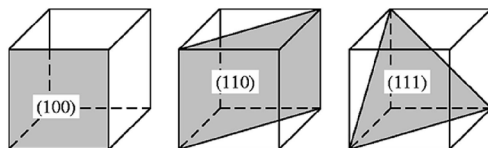
krystalů. Využívá spojité RTG záření, tedy celé spektrum vlnových délek. Dále je to *Prášková metoda* – určená pro studium prášků nebo polykrytalických pevných vzorků. Využívá charakteristické RTG záření. Tato metoda je v praxi používána nejčastěji.



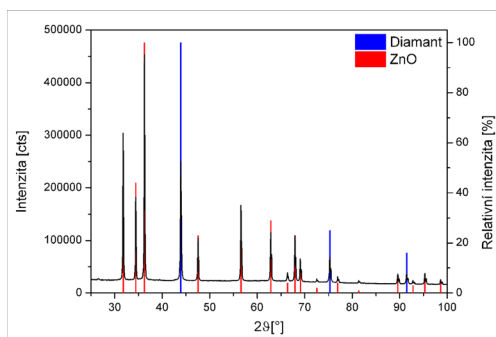
Obrázek 2. Interakce RTG záření s atomy.



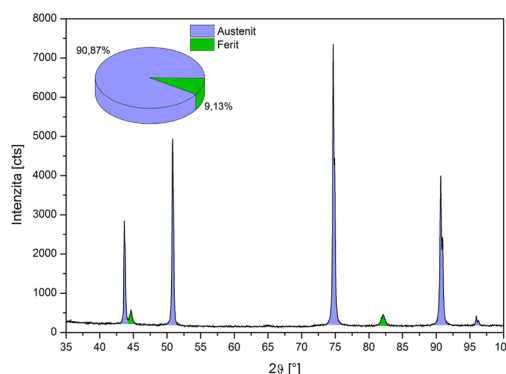
Obrázek 3. Grafické vyjádření Braggova zákona.



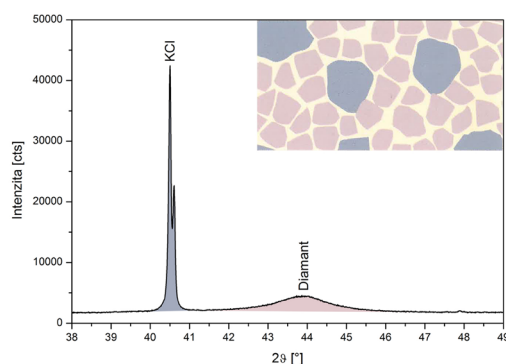
Obrázek 4. Značení rovin v krystalu Millerovými indexy.



Obrázek 5. Značení rovin v krystalu Millerovými indexy.



Obrázek 6. Kvantitativní fázová analýza dvoufázové oceli.



Obrázek 7. Vliv velikosti krystalitů na šířku a tvar difrakčních linií.

Na základě jediného měření je RTG difrakce schopna podat informace o celé řadě parametrů zkoumaného materiálu:

- Identifikace přítomných strukturních fází (oblastí v materiálu, které se liší typem nebo rozměry krystalové mřížky) – kvalitativní fázová analýza (obr. 6);
- Určení množství strukturních fází – kvantitativní fázová analýza (obr. 7);
- Analýza přednostní orientace (textury) struktury materiálu;
- Analýza zbytkových napětí;
- Výpočet velikosti krystalitů a mikrodeformací krystalové mřížky (obr. 8);
- Výpočet velikosti parametrů krystalové mřížky.

RENTGENOVÁ FLUORESCENČNÍ SPEKTROMETRIE

Rentgenová fluorescenční spektrometrie je jednou ze základních metod pro určování chemického (prvkového) složení látek. Principem metody je interakce rentgenového záření se zkoumaným vzorkem. Při této interakci dochází k vyražení elektronu z jedné z vnitřních slupek atomu zkoumané látky. Následně dojde k přesunu elektronu z vyšších energetických hladin a vyzáření sekundárního rentgenového záření, které je charakteristické pro všechny prvky. Toto záření je poté detekováno na detektoru a je zároveň možné určit i množství přítomných prvků (RTG spektrometrie...).

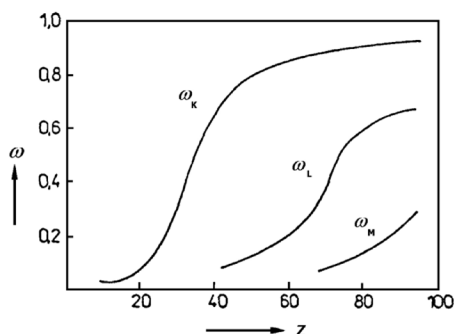
Množství emitovaných fotonů charakteristického záření vytvářejících výslednou intenzitu spektrálních linií je přímo úměrné množství jader daného druhu, a je tedy mírou koncentrace sledovaného prvku. Hlavní předností rentgenové fluorescenční spektrometrie je nedestruktivní analýza vzorků ve všech skupenstvích. Rozsah analyzovaných koncentrací je od desítek procenta do sta procent, tím je metoda vhodná k současné analýze stopových obsahů i hlavních matričních prvků. Použití metody je univerzální, od metalurgie a strojírenství, přes medicínu až po kontrolu životního prostředí. Pro využití rentgenové spektrální analýzy je důležité to, jak velký počet vakancí se zaplní zářivým přechodem. To udává veličina nazývaná rentgenový fluorescenční výtěžek ω_q , který udává pro sérii q počet zářivých přechodů n_z z celkového počtu vakancí n_q na hladině q :

$$\omega_q = n_z/n_q$$

Jak je patrné z (obr. 8), který popisuje závislost ω_q na atomovém čísle Z , je fluorescenční výtěžek pro lehké prvky velmi malý, což je příčinou nízké citlivosti jejich stanovení metodami rentgenové fluorescenční analýzy. Většina vakancí je rušena nezářivými přechody (emise Augerova elektronu). Proto také jednodušší rentgenové spektrometry slouží k analýze prvků s atomovým číslem 20 a více (Ca). Analýza lehčích prvků (od atomového čísla 12 Mg) vyžaduje přístroje vybavené vysoce citlivým detektorem. Analýza ještě lehčích prvků je možná pouze na lépe vybavených laboratorních přístrojích.

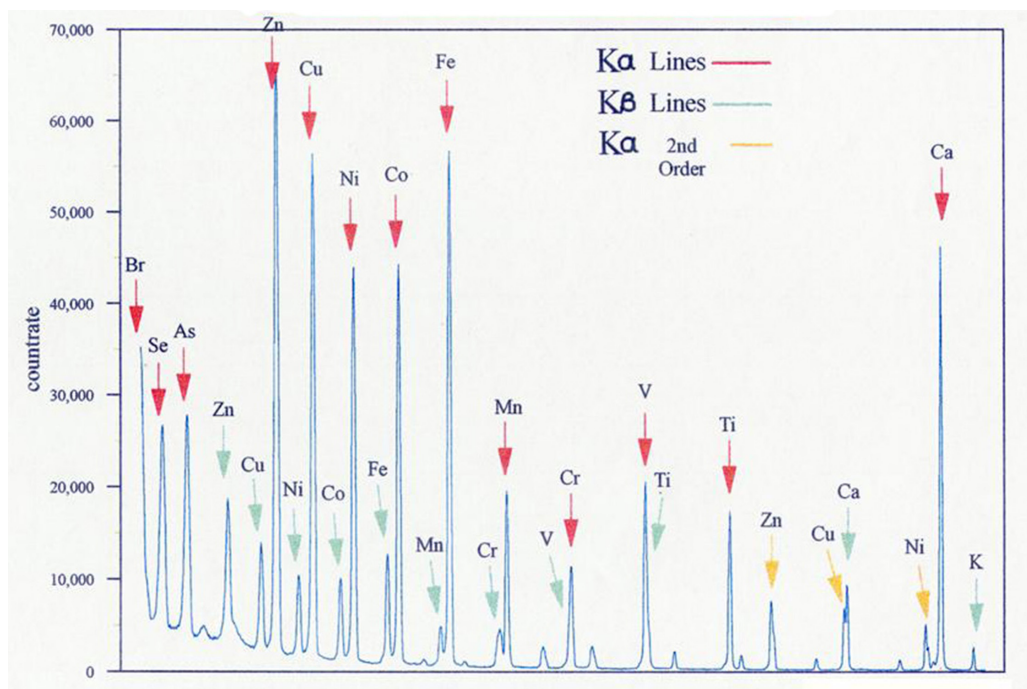
Zdrojem budícího rentgenového záření u vlnové disperzních přístrojů je výhradně rentgenová lampa, tzv. rentgenka. U energiově dis-

perzních může být kromě rentgenky zdrojem rentgenového záření také radionuklid (radioaktivní zářič). Pro vybuzení potřebné vlnové délky záření lze pak použít terč z vhodného materiálu.



Obrázek 8. Závislost rentgenfluorescenčního výtěžku na atomovém čísle Z prvku.

Využití rentgenové fluorescenční spektrometrie je velmi široké. Zasahuje do všech oblastí průmyslu i výzkumu. Tato metoda je schopna identifikovat prvky v rozsahu Al–U na vzduchu a při použití vakua je možno identifikovat až Be. Na obr. 9 je uvedeno typické rentgenfluorescenční spektrum s identifikovanými liniemi přítomných prvků.



Obrázek 9. Rentgenfluorescenční spektrum s identifikovanými liniemi přítomných prvků.

EXPERIMENT

Cílem experimentálního programu bylo v první řadě ukázat možnosti a postupy výše popsaných metod při hodnocení archeologického materiálu. Pro demonstraci byly vybrány dva typy materiálů. Prvním typem byly zlomky keramiky, druhým pak ocelová šipka z kuše. Pomocí rentgenové fluorescenční spektrometrie byly analyzovány zejména keramické střepy. Tento typ materiálů obsahuje poměrně značné množství prvků, které vytváří velké množství strukturních fází s poměrně složitými krystalovými mřížkami. To se následně projevuje ve výsledcích rentgenové difrakce přítomností velkého množství linií v difraktogramu, které je tak dosti obtížné identifikovat. Zjištění chemického (prvkového) složení je tedy v tomto případě nutností pro následné spolehlivé provedení kvalitativní fázové analýzy difraktogramu.

KERAMICKÉ STŘEPY

Soubor sledovaných střepů z mladší doby bronzové byl nalezen v Březnici na Táborsku během archeologického výzkumu, který vedl O. Chvojka v letech 2005–2009. Podařilo se zde odhalit 55 sídlištních objektů, mimo jiné také 10 lineárních žlabů. Analýza keramických zlomků byla provedena ze dvou objektů. V prvním při-

padě se jednalo o sídlištní jámu 5/05 odkrytou v sondě 7/05. V druhém případě šlo o lineární žlab 3/06 odkrytý v sondě 1/06, (Chvojka 2007; Chvojka et al. 2011). Hodnoceny byly keramické střepy z různých úrovní objektů i rozdílných keramických makroskopicky odlišitelných tříd (jemná, středně hrubá, hrubá).

OCELOVÁ ŠIPKA Z KUŠE

Analyzovaný hrot šipky pochází ze skupiny projektilů, které vystřelili dobyvatelé při obléhání hradu Sion. Hrad bránili husitští radikálové v čele s Janem Roháčem z Dubé. Hrad byl dobýván čtyři měsíce roku 1437 pražskými oddíly, nejmenovanou šlechtou a uherskými jednotkami.

Hrot šipky (obr. 11) byl nalezen stále vstřelený do svahu pod hradem (obr. 10). Můžeme tedy konstatovat, že se nacházel v primární poloze. Střelba se odehrála z protějšího svahu, kde se ve vzdálenosti 105–137 m od zabodnuté šipky nacházejí relikty obléhacích prací. Tvarově se jedná o hrot s tulejkou a čtvercovým průřezem, který se běžně používal po celé 15. století. Svou délkou 83 mm a hmotností 56 g spadá hrot do standardu běžně užívaných šipek (Prihoda 1932; Krajc 2003).

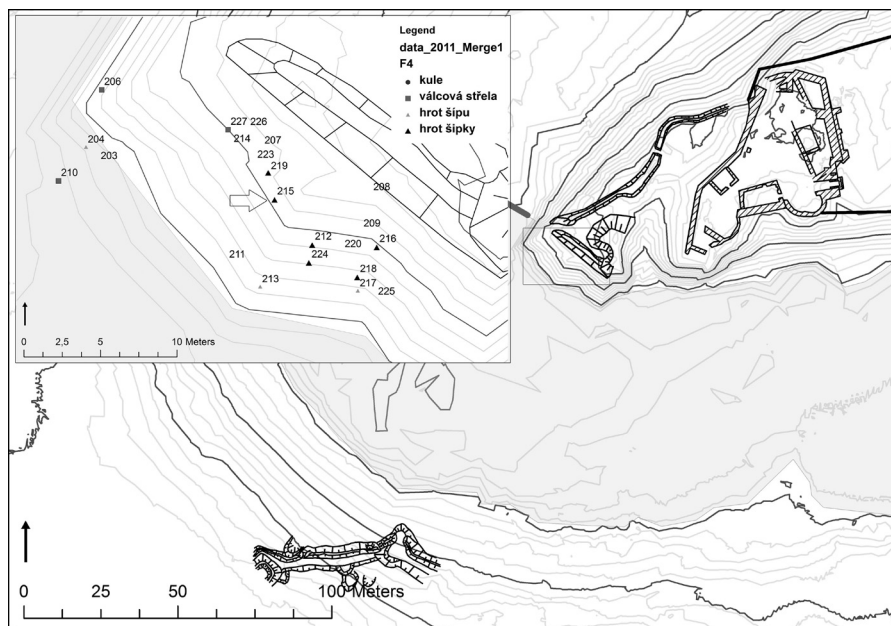


Obrázek 11. Zkoumaná ocelová šipka.

VÝSLEDKY RENTGENOVÉ FLUORESCENČNÍ ANALÝZY

Analýza chemického složení byla provedena na vlnově disperzním fluorescenčním spektrometru Bruker AXS S4 Explorer. Analyzovat je možné celou řadu materiálů v podobě pevných i práškových vzorků nebo tavených perel. V materiálech je možné identifikovat prvky od beryllia do uranu. Typický detekční limit je zde zhruba 1–10 ppm. Vzorkové držáky jsou schopné pojmout vzorky o průměru minimálně 35 mm a maximálně 50 mm s tloušťkou do 50 mm.

Analyzované střepy jsou značeny identifikačním číslem podle lokality nálezu A26xxx nebo A27xxx. Výsledky uvedené v Tab. 1 ukazují, že ve všech případech je většina materiálu tvořena kyslíkem a křemíkem, respektive oxidem křemičitým SiO₂, což bylo následně potvrzeno RTG difrakcí. Dále je ve všech střepech zastoupen hliník, jehož množství kolísá od 9,5 at. % do



Obrázek 10. Pozice nálezů v okolí hradu Sion.

Tabulka 1. Chemické složení zkoumaných vzorků keramických střepů, obsah prvků v at. %

	A27381	A26782	A26783	A26778	A26784	A27378	A27374	A27375	A27388	A27394
O	53	52	52	49	50	49	50	51	52	51
Si	21,8	17,7	21,6	16,8	24,8	24,2	18,3	18	19,5	19,8
Al	10,7	11,5	11,1	11,1	9,5	11,9	14,3	11,4	12,2	11,3
C	2,7	3,3	2,5	3,2	2,4	2	2,8	3,8	2,9	3
Fe	5,15	5,94	4,39	8,38	4,98	5,71	6,91	5,66	5,38	5,96
K	2,6	3,02	2,72	4,6	3,39	2,5	2,22	2,99	2,34	2,78
Ti	0,65	0,94	0,55	0,68	0,65	0,79	0,63	0,9	0,51	0,97
P	0,76	2	0,36	0,26	0,68	0,14	0,16	1,9	1,1	1,4
Ca	0,41	1	0,72	0,62	0,51	0,58	0,62	0,95	0,65	1
Cr	0,41	0,33	0,3	0,34	0,25	0,24	0,27	0,32	0,17	0,22
F	0,8	-	1,6	1,1	-	0,88	0,91	0,92	0,96	0,66
Mg	0,62	0,83	1,3	3,1	1,5	1,6	1,9	0,87	1,2	0,91
Na	0,29	0,21	0,42	0,35	0,46	0,46	0,31	0,22	0,26	0,18

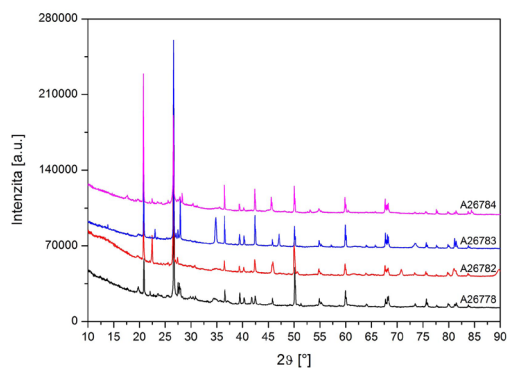
14,3 at. %, železo 3,38 at. % – 8,38 at. % a draslík 2,34 at. % – 4,6 at. %. Tyto prvky se projeví ve fázích, identifikovaných ve struktuře pomocí RTG difrakce. Ostatní prvky jsou rozpuštěny ve formě tuhého roztoku a vlastní fáze nevytvářejí (Tab. 1). U ocelové šipky prvkové složení stanovováno nebylo, vzhledem k tomu, že doprovodné prvky velmi často v materiálu nevytvářejí samostatné fáze, což potvrdila i RTG difrakce.

VÝSLEDKY DIFRAKČNÍ FÁZOVÉ ANALÝZY

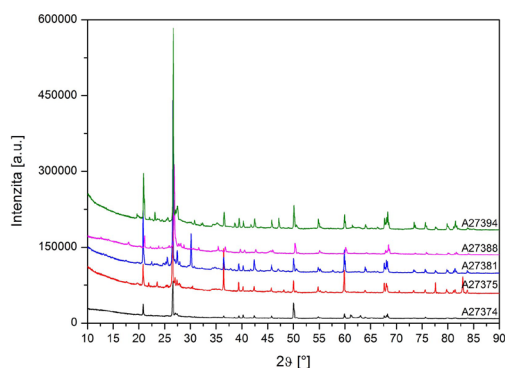
Analýza keramických střepů byla provedena na automatickém práškovém difraktometru Panalytical X'Pert Pro. Přístroj je vybaven měděnou RTG lampou a ultrarychlým polovodičovým detektorem PIXcel s vysokou rozlišovací schopností. Díky tomu je možné od sebe odlišit i fáze, které mají difrakční linie velmi blízko sebe. Pro měření byla použita symetrická Bragg-Brentanova (θ-θ) geometrie. Na přístroji je možné analyzovat vzorky ve formě pevné (objemové, tenké vrstvy) nebo práškové. Maximální plocha vzorku je přibližně 200 × 200 mm, tloušťka do 100 mm a hmotnost do 1 kg.

Naměřené výsledky ukazují, že materiál střepů je tvořen směsí několika fází. Tyto fáze se z větší části neliší chemicky, většinou se jedná o SiO_2 , ale strukturně. Mění se tedy typ nebo rozměry krystalové mřížky. Většinu objemu vzorku tvoří křemen, tedy SiO_2 s hexagonální krystalovou mřížkou, který se zde navíc vyskytuje v několika modifikacích, lišících se již pou-

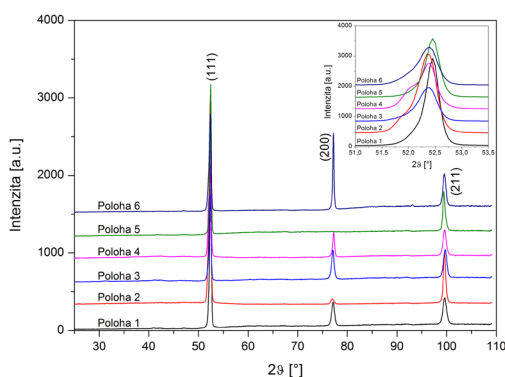
ze rozměry krystalové mřížky. U série A_26xxx tvoří další fáze, přítomné ve struktuře již pouze v relativně malých množstvích, hlavně materiály na bázi K, Al, Si a O jako ortoklas KSi_3AlO_8 (draselný živec, monoklinická krystalová mřížka), kyanit Al_2SiO_5 (triklinická k.m.), sillimanit Al_2SiO_5 (triklinická k.m.), mikroklin KSi_3AlO_8 (draselný živec, triklinická k.m.) – (obr. 12). U série A_27xxx je z minoritních fází zastoupen nejčastěji mikroklin KSi_3AlO_8 , v některých případech také andalusit $\text{Al}_2(\text{SiO}_4)\text{O}$ (nesosilikát hliníku), muskovit KSi_3AlO_8 (světlá slída, monoklinická k.m.). Z naměřených difraktogramů je zároveň zřejmé, že se množství jednotlivých strukturních fází ve vzorcích mění. Bohužel kvantitativní analýza nemohla být provedena kvůli nízké intenzitě difrakčních linií. Dochází tak k velkým chybám při určení podílu těchto fází ve struktuře.



Obrázek 12. Difraktogramy vzorků střepů A26xxx.



Obrázek 13. Difraktogramy vzorků střepů A27xxx.



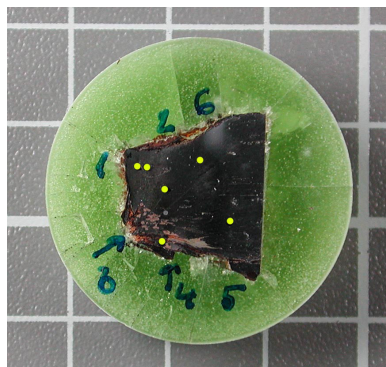
Obrázek 14. Difraktogramy zkoumané šipky.

Dále výsledky ukazují, že struktura vzorků je ve všech případech částečně tvořena amorfni fází, která se v difraktogramech projevuje jako „hrb“ s velkou šířkou, který je velmi dobře viditelný v difraktogramu vzorku A_26782. Struktura v tomto případě nemá atomy v prostoru pravidelně uspořádány, a tudíž nemůže dojít k vytvoření ostrého difrakčního maxima jako u krystalické struktury. V případě této amorfni struktury pak mluvíme o jejím uspořádání na krátkou vzdálenost, na rozdíl od uspořádání na dlouhou vzdálenost u látek krystalických (obr. 13).

Ocelová šipka byla analyzována na automatickém práškovém difraktometru AXS Bruker D8 Discover. Přístroj používá kobaltovou RTG lampu a plošný, pozičně citlivý detektor HISTAR. Pro měření lze použít pouze nesymetrickou (Ω - 2θ) geometrii. Integraci plošného difrakčního záznamu v radiálním směru pak lze získat stejné difraktogramy jako u geometrie Bragg-Brentanovy. Na přístroji je možné analyzovat vzorky ve formě pevné (objemové, tenké vrstvy) nebo práškové. Maximální plocha vzor-

ku je i zde přibližně 200×200 mm, tloušťka do 50 mm a hmotnost do 1 kg.

Měření ocelové šipky byla provedena na šesti místech, vzhledem ke značné nehomogenitě materiálu, obr. 15. Výsledky ukázaly, že struktura je ve všech sledovaných bodech tvořena pouze jedinou fází – nízkoteplotní modifikací železa, tzv. α -fází s kubickou, prostorově centrovanou mřížkou. Nehomogenní struktura materiálu vniklá během výroby šipky, se projevila hlavně měnící se přednostní orientací materiálu a také posuny difrakčních linií vlivem intenzivní tlakové deformace. Měření v poloze 5 ukazuje, že v tomto místě difrakční linie (200) prakticky úplně chybí. Všechny tyto znaky ukazují na velmi nízkou kvalitu materiálu, kterou je však u takového předmětu možné očekávat, obr. 14. Šipka navíc mohla být metodou kovářského svařování vyrobena z několika kusů oceli s různými vlastnostmi.



Obrázek 15. Šipka Sion – polohy měření XRD.

ZÁVĚR

Na základě provedené difrakční analýzy byly zjištěny pouze malé rozdíly v několika analyzovaných souborech keramiky. Ty nejsou výrazně zřetelné ani mezi rozdílnými makroskopicky zjištěnými keramickými třídami, různými objekty na sídlišti nebo odlišnými lokalitami. Data a zjištěné rozdíly mezi difraktogramy jsou v současné době analyzovány, přičemž bude zapotřebí získat data z více obdobně starých lokalit v rámci jihočeského regionu a jejich srovnání s potenciálními bližšími, případně vzdálenějšími zdroji suroviny na výrobu keramiky. Cílem výzkumu je zjistit potenciál výše popsaných analytických metod a jejich využití v časovém horizontu od pravěku po současnost

např. v oblasti možné identifikace keramických tříd jednoho nálezového celku, případně datace objektů jedné lokality nebo časově shodných sídlišť z pohledu datování pomocí archeologie. Teoretickou možností je také studium výrobních okruhů pravěké keramiky, případně zda docházelo pouze k její místní výrobě v bezprostředním okolí sídliště, nebo mohly být keramické nádoby transportovány v rámci širšího okolí.

Podobný přístup byl v nedávné době aplikován na několika keramických střepích z vrcholného a pozdního středověku z Českých Budějovic. Vybrané keramické třídy byly studovány pomocí rentgenové fluorescenční a rentgenové difrakční analýzy. Výsledky rentgenové fluorescenční analýzy ukázaly na rozdíly v chemickém a mineralogickém složení grafitové a ne-grafitové keramiky, což může ukazovat na původ suroviny sloužící k její výrobě. Rentgenová difrakční analýza identifikovala modifikace křemene způsobené vyššími teplotami výpalu (Čapek – Čekalová – Říha 2013).

V případě ocelové šipky byla analyzována její vnitřní struktura, na jejímž základě je možné například uvažovat, jakým způsobem byl předmět vyroben, zda byl ukován z jednoho kusu kovu, případně byl recyklován starší materiál z několika již nepoužívaných artefaktů. Data jsou v současnosti analyzována.

Popisovaná RTG difrakce a RTG fluorescenční metody jsou nejčastěji používané metody v oblasti určování prvkového složení a analýzy struktury, tedy vnitřního uspořádání materiálů. Na rozdíl od většiny ostatních analytických metod analyzují obě tyto metody poměrně velké objemy zkoumaného materiálu, řádově mm³, což je velmi výhodné z hlediska statistiky získaných výsledků. Pomocí RTG fluorescence je možné poměrně rychle a přesně určit dosti široké spektrum prvků obsažených v materiálu. Problém představují pouze nejlépejší prvky H ÷ Be. Analyzovat lze materiály ve formě pevné, práškové i kapalné. Tyto výsledky pak mohou výrazně ulehčit a zrychlit následnou strukturní analýzu prováděnou pomocí RTG difrakce. Tato metoda pak umožňuje na základě jediného měření jednoznačně identifikovat strukturní fáze (např. minerály), z nichž se zkoumaný materiál skládá, a určit jejich množství. Další analýzou naměřeného profilu je pak možné určit velikost částic, zbytková napětí nebo přednostní orientaci struktury, což může vypovědět mnohé o mechanických vlastnos-

tech a kvalitě materiálu. Zejména u kovových předmětů pak lze případně i usuzovat, jakým způsobem byly vyráběny. U keramiky lze na základě identifikace přítomných prvků a minerálů usuzovat na místa jejího vzniku. Analyzovat lze krystalické vzorky ve formě pevné nebo práškové. U obou zmínovaných metod je největší výhodou objem analyzovaného materiálu, který poskytuje statisticky velmi kvalitní výsledky. I když samy o sobě jsou obě popisované metody nedestruktivní, nevýhodou je nutnost přípravy vzorků s často poměrně velkou plochou s malou drsností povrchu.

Tento příspěvek se snaží o představení metod na bázi RTG záření a jejich možného využití v oboru archeologie, lze je však uplatnit i v dalších humanitních nebo přírodovědných oborech. Ačkoliv jsou analytické metody na bázi rentgenového záření používány v antropologii většinou ve formě rentgenové tomografie nebo defektoskopie, uplatnění v tomto oboru mohou najít i výše popsané metody. Rentgenovou difrakci je vzhledem k jejím principům možné uplatnit zejména u tvrdých tkání s krystalickou strukturou, tedy u kostí a zubů. Díky tomu je pak možné sledovat strukturu v různých místech kostí nebo zubů, případně hodnotit jejich mineralogické složení. Pomocí rentgenové difrakce byl například již v 60. letech 20. století identifikován vivianit i na kosterních pozůstatcích vyvednutých z vraku *Wasa* nedaleko Stockholmu. Bylo zjištěno, že všechny kosti a zuby obsahující vivianit ležely v blízkosti železných předmětů (šrouby, děla); (McGowan – Prangnell 2006). Rentgenová difrakce byla použita také při stanovení teploty kremace na starověkých pohřebištích. Pomohla tak k objasnění nezvyklých aspektů pohřebních praktik. Podobně je tomu u rentgenové fluorescenční spektrometrie, kde lze u tvrdých tkání sledovat jejich prvkové složení, a tak identifikovat například i případné stopy těžkých kovů.

ZDROJE PODPORY

Tento příspěvek vznikl v rámci projektu CENTEM, reg. č. CZ.1.05/2.1.00/03.0088, který je spolufinancován z ERDF v rámci programu MŠMT OP VaVpI a projektu SGS-2012-075 Interdisciplinární výzkum archeologických artefaktů pomocí moderních technologií.

POUŽITÁ LITERATURA

ČAPEK, L.; ČEKALOVÁ, M. a ŘÍHA, J. 2013. *Středověká keramika z Českých Budějovic a možnosti jejího archeometrického studia*. *Archeologia historica* 38/2, 525–542.

KRAJÍČ, R. 2003. *Sezimovo Ústí. Archeologie středověkého poddanského města III. Kovárna v Sezimově Ústí a analýza výrobků ze železa 1–2*. Archeologický ústav v Praze – Husitské muzeum v Táboře: Praha – Sezimovo Ústí – Tábor.

KRAUS, I. 1985. *Úvod do strukturní rentgenografie*. Praha: Academia.

CHVOJKA, O. 2007. Žlabovité objekty na sídlišťích mladší a pozdní doby bronzové v jižních Čechách. In Salaš, M. – Šabatová, K. (ed.): *Doba popelnicových polí a doba halštatská*. Brno: Masarykova univerzita v Brně: 111–126.

CHVOJKA, O. – ŠÁLKOVÁ, T. 2011. *Březnice u Bechyně. K interpretaci sídelního areálu z mladší doby bronzové se žlabovitými objekty*. In *Podbrdsko – Miscelanea 2. Doba popelnicových polí a doba halštatská*. Příspěvky z XI. konference Příbram 7.–10. 9. 2010. Příbram: Hornické muzeum v Příbrami: 103–127.

MCGOVAN, G. - PRANGNELL, J. 2006: *The Significance of Vivianite in Archeological Settings*. *Geoarcheology* 21, 93–111.

PRIHODA, R. 1932. *Zur Typologie und Chronologie mittelalterlicher Pfeilspitzen und Armbrustbolzeneisen, Sudeta*, VIII/3, 43–67.

VALVODA, V.; POLCAROVÁ, M. a LUKÁČ, P., 1992. *Základy strukturní analýzy*. Praha: Univerzita Karlova.

X-ray tube. Přístupné na: http://www.siint.com/en/products/xrf/tec_descriptions/descriptions_e.html, stáhnuto: 14. 2. 2013.

Compoments of an X-ray unit. Přístupné na: <http://labspace.open.ac.uk/mod/resource/view.php?id=417927>, stáhnuto: 14. 2. 2013.

Rentgenová spektroskopie a difrakce. Přístupné na: http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/txt_421.pdf, staženo. 1. 12. 2012.