

BRONZ – JAK SE POTKÁVÁ CHEMIE S METALURGIÍ, FYZIKOU MATERIÁLŮ A SOCIÁLNÍ ANTROPOLOGIÍ

MIROSLAV RAAB^a, MARTIN HRUBÝ^a
a JOHANNA VRABCOVÁ^b

^a Ústav makromolekulární chemie Akademie věd České republiky, v.v.i., Heyrovského náměstí 2, 162 06 Praha 6,

^b Filozofická fakulta Univerzity Karlovy, nám. Jana Palacha 1/2, 116 38 Praha 1
raab@imc.cas.cz

Kdyby se konala mezinárodní vědecká konference na téma bronz, mohla by se sejít velice početná, různorodá a zajímavá společnost: metalurgové, chemici, fyzikové, historici, lingvisté, ale také umělci a sociální antropologové. Předšálí a samotné téma *bronz* by využila jedna přední kosmetická firma a představila své produkty: bronzující pudr ve třech odstínech a bronzující balzám k použití na celé nahé tělo, *Bronze to Paradise*. My jsme teď na téma bronz a pro sepsání populárně vědecké studie sestavili tým jen tříčlenný. Ale i tři lidé už přece tvoří společnost. (*Tres faciunt collegium*.) Náš tým je ovšem mezioborový, ale navíc také mezigenerační. Tvoří ho emeritní fyzik, aktivní chemik a posluchačka sociologie. Každý člen našeho týmu k tématu bronz přispěje svým dílem ze svého hlediska.

Lingvistika

Slovo *bronz* je prastaré. To je zřejmé už z toho, že se píše a vyslovuje velmi podobně ve většině evropských jazyků. Angličtina zná slovo *bronze* nejméně od konce sedmnáctého století. Zřejmě si ho vypůjčila ze středověké francouzštiny, která ho zase převzala z italského slova *bronz*, což ve třináctém století znamenalo zvonovinu. Vlastně se jednalo o přepis ze středověké latiny, *bronzium*. Slovo bronz je slyšet z názvu města Brindisi, latinsky *Brundisium*. To město proslulo výrobou bronzových zrcadel. A můžeme jít i hlouběji do minulosti, do byzantské řečtiny, *brontésion*, anebo až do staré perštiny, *birinji*. České slovo *bronz* se zřejmě inspirovalo němčinou, která má pro bronz slovo ženského rodu *die Bronze* a převzala ho nepochybně z italštiny. Jak se poznatky o metalurgii bronzů šířily ze středního východu na západ, přesouvalo se i jméno tohoto důležitého materiálu.

Metalurgie

Bronz v běžném a původním významu je v podstatě slitina jen dvou kovů, mědi a cínu^{2,7}. (Dnes se ovšem mezi bronzů počítají i mnohem složitější slitiny, které obsahují také hliník, olovo, zinek nebo beryllium.) Oproti samotné mědi má bronz celou řadu výhodných vlastností. Vyšší tvrdost a houževnatost, snadnější zpracovatelnost a nižší

bod tání. Ten se ostatně může podle obsahu cínu plynule nastavit. Vlastnosti bronzových odlitků, třeba nožů a mečů, lze dále výrazně zlepšit kovářským zpracováním.

Výhodné materiálové vlastnosti udržely bronz mezi důležitými materiály do současnosti. Kromě zvonů a soch se z něj vyrábějí také lodní šrouby, samomazná ložiska, speciální pružiny, pevné šrouby, páčidla, která při nárazu na jiný kov nejiskří, a mnoho dalších výrobků.

Chemie

Bronz velmi zajímá chemiky, a to hned z několika hledisek. Především bronz ve své mikrokrystalické struktuře obsahuje nejen samotné kovy měď a cín, ale také tuhý roztok cínu v mědi (fáze alfa) a intermetalické sloučeniny těchto prvků, například $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ (fáze delta).

Zajímavou a samostatnou kapitolou je povrchová chemie, jak samotné mědi, tak její slitiny, tedy bronzu. Povětrnostními vlivy se na povrchu mědi vytváří měděnka³, zelený povlak, který dodává kopulím a věžím charakteristický vzhled. Co by byla bez měděnky kopule malostranského chrámu svatého Mikuláše, pardubická Zelená brána nebo znojemská radniční věž s devíti zelenými věžemi. (Ta bývala i symbolem znojemských okurek.) Z chemického hlediska má měděnka proměnlivé složení podle okolního prostředí. Když je měděný povrch vystaven přímo dešti, pak měděnku tvoří hlavně hydroxid měďnatý, když je povrch pod střechem v čistém prostředí, převažuje bazický uhličitán měďnatý. V městském prostředí, kde je ovzduší znečištěno sloučeninami síry, se tvoří zásaditý síran měďnatý a u moře, kde jsou ve vzduchu aerosoly mořské soli, vzniká zásaditý chlorid měďnatý.

Zvláštní složení má měděnka na povrchu destilačního zařízení v palírnách. Obsahuje bazický octan měďnatý. Tuto měděnku připravovali záměrně staří mistři jako barevný pigment do malířských barev. Měděnka chrání povrch mědi před další korozi, podobně jako vrstvička oxidu hlinitého chrání hliník a vrstvička oxidu titaničitého titan. Vlivem prostředí se tvoří korozní vrstva také na povrchu bronzu, i když podstatně pomaleji než u mědi. Ta ale bronz na rozdíl od mědi nechrání, ale naopak katalyzuje další korozi, často až do úplné destrukce daného předmětu. Přítomnost chloridů korozi urychluje. Takto trpí bronzové předměty pravidelně vystavené slanámu lidskému potu. Středověká bronzová socha svatého Petra ve vatikánské bazilice má nápadně ztenčený nárt a chybí jí prsty na pravé noze. Za uplynulých sedm století tady silnou vrstvu bronzu doslova slíbaly rty zbožných poutníků. Naštěstí bronz v tak malém množství není toxický a měď ve stopové koncentraci je pro člověka dokonce prospěšná.

Lingvisticky i chemicky je zajímavé, že pro korozi bronzu má angličtina výraz „bronze disease“, a lidská nemoc hemochromatóza, při které je typickým příznakem

bronzový nádech barvy kůže, je často anglicky označena jako „bronze diabetes“. Aby to bylo složitější, v češtině se „bronzová nemoc“ říká úplně jinému onemocnění, a to Addisonově chorobě. Jde o poruchu funkce nadledvin, která je rovněž doprovázena „bronzovou“ pigmentací kůže. A když už jsme u nemocí, bronzu a jeho složkách, známý je cínový mor⁷, metla sbírek historického cínového nádobí. Když jsou cínové předměty dlouhodobě vystaveny teplotě pod 13,2 °C, přechází bílý kovový cín na šedivou „diamantovou modifikaci“. Historické předměty se pak rozpadnou na šedý prach. Tato rekrystalizace je autokatalytická, a je tedy svým způsobem „přenositelná“, nebo chcete-li „infekční“ z předmětu na předmět, jakmile se na některém místě vyskytne.

Historie

Bronz je velké téma pro archeology a historiky. V tom jediném materiálu se střetává lidský důvtip a práce, lov a válčení, dálkový obchod, kultura, magie, umění a krása. A to platí už nejméně sedm tisíc let. Význam bronzu v historii lidstva vyzdvihl Christian Jürgensen Thomsen, kurátor archeologických sbírek Dánského národního muzea v Kodani. V roce 1836 navrhl utřídit archeologické nálezy podle materiálu nástrojů a zbraní, typického pro určité období. Prehistorii lidstva pak rozdělil podle materiálů na doby kamennou, bronzovou a železnou. Podle tohoto rozdělení se civilizace vyvíjela zhruba exponenciálně. Nejprve velice pomalu, ale postupně se vývoj zrychloval. Historikové a sociologové mohou materiálůvé hledisko doplnit představami o duchovním světě tehdejších lidí, o dávných rituálech, které lze z archeologických nálezů odvodit. A ještě další pohled přidávají ekonomové. Ty zajímá minulost, rozvoj a problémy mezinárodního obchodu. Právě bronz je z tohoto hlediska velice zajímavý.

Civilizace doby bronzové

Vývoj metalurgie bronzu je bezprostředně spojen s rozkvětem rozvinutých civilizací na Blízkém a Středním východě a těsně souvisel s dálkovým obchodem^{4,8}. Pro vládce těch mocných říší byl bronz doslova strategickým materiálem. Jelikož výroba bronzu potřebuje jak měď, tak cín, je životně závislá na výměně zboží. Mědi měli na Blízkém východě dostatek z bohatých nalezišť na ostrově Kypr. (Z latinského jména tohoto ostrova *Cyprum* se vyvinulo slovo *cuprum*, z něhož je odvozena i chemická značka mědi Cu a také anglické slovo copper.) Ale cín se dovážel z daleka. Z francouzského pobřeží a také až z Británie. Našly se rozsáhlé sklady cínových ingotů ve starověkých francouzských přístavech, dokonce i s průvodními keramickými tabulkami. Ty svědčí o tom, že už v době bronzové existovalo účetnictví. Ale pak se něco přihodilo a nastal úpadek. Jak civilizací, tak i metalurgie. Profesor Eric H. Cline, historik a úspěšný spisovatel, uvádí zlomový bod tehdejších civilizací dokonce přesným letopočtem, totiž rokem 1177 př. Kr. Podle autora tento kritický letopočet odpovídá geologickým katastrofám, řadě zemětřesení a sopečných výbuchů v oblasti blíz-

kého východu a současně také invazi jakýchsi mořských národů, které napadaly bohaté a rozvinuté říše. Ten magický letopočet našel Cline přímo vytesaný na kamenném památníku a v roce 2014 o tom vydal knihu⁴. Nedávno byla přeložena i do češtiny pod názvem „1177 př. Kr. Zhroutení civilizace a invaze mořských národů“. Kolem tohoto roku skutečně zanikaly jedna po druhé starověké říše jako řádka dominových kostek. Babylonská, Egyptská, Chetitská, Minojská a Mykénská. Přelom druhého a prvního tisíciletí př. Kr., který po takovém rozsáhlém kolapsu následoval, pak představuje temné období, černou díru v dějinách. Ale už od roku 800 př. Kr. se datuje vznik a rozvoj doby železné, který v Evropě symbolizuje naleziště Halštát. Jistě, železo a jeho slitina, tedy ocel, má proti bronzu řadu výhodných vlastností, až na to, že silně podléhá korozi. Ale navíc, železo, vlastně jeho rudy, jsou na zemském povrchu velmi rozšířené. Oproti cínu nevyžaduje tak rozsáhlé mezinárodní transporty. Archeologové se vcelku shodují, že konec doby bronzové byl na Blízkém východě náhlý a drastický. Nástup doby železné pak nastal až po delší prodlevě. Ve střední Evropě byla taková změna časově zřetelně posunutá a zdá se, že proběhla poměrně plynule. Ostatně v českých pohraničních horách se rudy s obsahem mědi a cínu běžně vyskytují společně. Archeologické nálezy dokládají, že bronzové odličky, hřivny, se používaly jako platidlo i jako peněžní investice. A také mohly být darovány jako pohřební výbava nebo obětovány nějakému božstvu zakopáním do země. Podivuhodným dokladem o myšlení a představách doby bronzové ve střední Evropě je sluneční disk nalezený roku 1999 poblíž východoněmeckého města Nebr¹. Nyní je vystavený v působivé expozici Muzea pro pravěké dějiny ve městě Halle nad Sálou. Na bronzovém disku o průměru asi 32 cm jsou zlatým povlakem znázorněny nebeské jevy, slunce, měsíc a plejády. A také dlouhá loď, zřejmě sluneční bárka, která dopravuje slunce podsvětím od západu k východu. Někdy kolem roku 2000 př. Kr. ale tehdejší kouzelníci nebo šamani ten nádherný bronzový disk pohřbili hluboko do země, společně s pokladem bronzových předmětů. Vůbec je zajímavé, že pohřby významných osob bronzové doby jsou mnohdy doprovázeny překvapivě nadbytečným množstvím bronzových předmětů a zbraní, které daleko převyšují potřeby jediného, byť i velmi významného náčelníka. Je zřejmé, že konec doby bronzové nebyl jen revolucí v materiálůvé technologii, ale současně i předělem lidského myšlení, vlastně změnou ideologie, spirituality a zřejmě také mytologie. O tom svědčí také výrazná změna písma⁸. Místo egyptských hieroglyfů a mezopotámského klínopisu se objevilo hláskové písmo založené na zvuku řeči. Nejstarší fénické písmo si podstatně upravili Řekové a doplnili znaky pro samohlásky. Ve vývoji abecedního písma pokračovali Etruskové a posléze Římané. Praktickou latinku používáme i nyní.

Téměř současně se zánikem starověkých říší na Blízkém a Středním východě zanikla jedna civilizace založená na metalurgii bronzu také ve střední Evropě. Její centrum bylo jenom kousek od Prahy, poblíž Únětic. Takzvaná Únětická kultura⁶ zažívala rozkvět v letech 2300–1600 př. Kr. a pak v poměrně krátkém období zanikla. Archeologic-

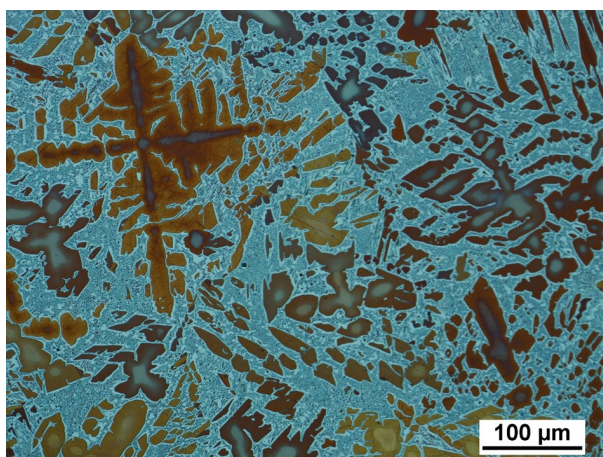
ké nálezy z dané oblasti, které odpovídají pozdější době, už žádné bronzové předměty neobsahují. To zaujalo archeology až z Francie a Austrálie. Publikovali studii v mezinárodním časopise pro sociologii a antropologii. A ukázali, že výroba a zpracování bronzu je závislá nejen na surovinách, tedy mědi a cínu (ty byly v českých horách poměrně dostupné), ale také na tepelné energii. Zpracování bronzu vyžaduje dlouhodobé udržování vysoké teploty. Teplota tavení bronzu je sice znatelně nižší než u samotné mědi, ale stejně museli tehdejší hutníci trvale udržovat pec při teplotě kolem 1000 °C. Vysokou teplotu mohli dosáhnout komínovým účinkem šachtové pece a také intenzivním dmýcháním do ohniště s hořícím dřevěným uhlím. (Současně ale museli v peci udržet redukční prostředí.) A tehdy, v zájmu bronzové metalurgie, vykáceli všechny stromy v širokém okolí. Dostihly je zákony ekologie⁶. Ostatně krajina kolem středočeských Únětic je bezlesá i nyní. Pro výrobu bronzu tedy platí následující vztah:

$$\text{bronz} = \text{měď} + \text{cín} + \text{energie}$$

Ještě zbývá poznamenat, že doba bronzová proběhla také v Číně. Sice zřetelně později než na Blízkém a Středním východě a v Evropě, ale zato nezávisle. Ale to by byl úplně jiný příběh, který vyžaduje samostatnou studii.

Umění a krása

Sochaři odedávna bronz milují pro jeho trvanlivost a krásu. Navíc je pro ně výhodné, že bronz při tuhnutí z taveniny poněkud zvětšuje objem, takže dokonale vyplní všechny detaily formy. Už ve starověku dovedli sochaři spolu s metalurgy odlévat rozměrné sochy do kamenných forem nebo využívat techniku ztraceného vosku pro menší odlitky. Staří Římané dováželi cín na monumentální bronzové sochy císařů až z Británie. Dodneška se ale zachovala



Obr. 1. Mikrostruktura zvonoviny zobrazená metalografickým mikroskopem. Na snímku je patrný křížový dendrit fáze alfa, tuhého roztoku cínu v mědi. (Dendrity jsou obecně krystalické útvary, které tvarem připomínají list kapradiny nebo strom, řecky dendron.) Zbylou plochu snímku zaujímá eutektoid tvořený krystalky fáze alfa + delta. Ústav fyziky materiálů AV ČR, Brno, Ing. Jiří Man, Ph.D. (Barevná verze obrázku je dostupná na webových stránkách časopisu Chemické listy)

jen jediná původní starořímská bronzová plastika, jezdecká socha císaře Marca Aurelia, asi z roku 176 našeho letopočtu. Před zničením a roztavením ji zachránila domněnka, že jde o prvního křesťanského císaře Konstantina I.

Také pozdější bronzové plastiky a sousoší vešly do dějin i do literatury. Umělecky i konstrukčně pozoruhodná jezdecká socha Petra Velikého na petrohradském Senátním náměstí, kterou v roce 1782 pro Kateřinu Velikou vytvořil Francouz Étienne Maurice Falconet, se stala o půl století později tématem Puškinovy poémy *Měděný jezdec* (jedná se ovšem o sochu bronzovou). Bronz jako sochařský materiál symbolizuje vítězství, moc, slávu, odvahu a vznešenost, třeba v podobě svatého Václava na pražském Václavském náměstí. (Josef Václav Myslbek to monumentální sousoší dokončil právě před sto deseti lety.) Odvahu vyjadřuje také o hodně mladší jezdecká socha markraběte Jošta v Brně. Toto nepřehlédnutelné dílo Jaroslava Róny stojí od 24. října roku 2015 před kostelem svatého Tomáše, naproti Nejvyššímu správnímu soudu. A na olympijských hrách se sportovcům udělují bronzové medaile. Ty ovšem bývají vyrobeny z červené mosazi, tedy slitiny mědi a zinku.

Hlas bronzu

Fyzikální metalurgové si dovedou užívat krásu bronzu také zevnitř a zkoumat jeho různorodou mikrostrukturu na výbrusech z metalografického mikroskopu. Příklad takové mikrostruktury je na obr. 1.

Detailní uspořádání jednotlivých fází závisí na složení, ale také na podmínkách chlazení. Složitá struktura bronzu je zřejmá z fázového diagramu. Metalurgové nyní zkoumají strukturu a podíl složek zvonů v historickém vývoji a sledují, jak složení bronzu a jeho fázová struktura souvisí s výsledným tónem, tedy hlasem zvonu. Středověké a renesanční zvony obsahují mnohem méně cínu (7–12 %) než materiál současných zvonů (15–25 %)².

Když dostane bronz tvar zvonu, projeví se kromě jeho mechanických a chemických vlastností také jeho magická, možná dokonce posvátná dimenze. Kdo někdy zažil v pravé poledne souzvuk všech zvonů v historickém středu Florencie na Piazza della Signoria, nevyhnutelně podlehl kouzlu té chvíle. Ale o posvátnosti zvonů je přece také vánoční báseň Jaroslava Vrchlického: „Hlas zvonů táhne nad závějí...“ Do Florencie je z Prahy daleko a do Vánoc zbývá ještě dlouhá doba, tak jsme si dopřáli sluchový zážitek bronzu jedno nedělní poledne na třetím nádvoří Pražského hradu.

Na jižní věži Svatovítské katedrály je zavěšeno ve dvou patrech sedm zvonů. Největší Zikmund, o hmotnosti asi 13,5 tuny, se ozve jenom při slavnostních příležitostech, například na Velikonoce při svátku Vzkříšení, ale všechny ostatní zvoní každou neděli, čtyři z nich v pravé poledne. Pak je možné zažít, jak postupně nastupují do sboru. Minutu před dvanáctou začne zvonit Josef s nárazovým tónem H, pravidelnými rytmickými údery, ve dvanáct hodin se ozvou cimbály věžních hodin a vzápětí zvon Dominik s frekvencí G, Jan Křtitel přidá Dis a Václav C. A třináct minut po dvanácté zvony postupně umlkají. Nejprve Dominik a Jan Křtitel a poslední tóny obstará Václav.

Po jasném nárazovém tónu C jsme ještě zřetelně vnímali bzučivý dozvuk o jednu oktávu níž. Tu neděli jsme naplno zažili *zvuk bronzu*. Právě tak nazval svůj článek tým portugalských fyziků⁵. Podařilo se jim pomocí metody konečných prvků nejprve rekonstruovat tvar a na základě materiálových charakteristik pak vzkřísit i hlas rozlomeného středověkého zvonu, jehož trosky objevili archeologové ve sklepení kostela svatého Petra ve městě Coruche nedaleko Lisabonu.

LITERATURA

1. Meller H.: *Der geschmiedete Himmel, Landesmuseum für Vorgeschichte*, Halle (Saale), 2006.
 2. Dušek O.: *Výroba zvonů. Bakalářská práce*, VUT Brno, Brno 2012.
 3. Hradil D., Švarcová S.: *Vesmír 90*, 586 (2011).
 4. Cline E. H.: *1177 př. Kr. Zhroucení civilizace a invaze mořských národů*. Vyšehrad, Praha 2014.
 5. Debut V., Carbalho M., Figueiredo E., Antunes J., Silva R.: *J. Cult. Herit.* 19, 544 (2015).
 6. Svizzero S., Tisdell C. A.: *Int. J. Res. Sociol. Anthropol.* 4 (3), 1 (2018).
 7. Raab M.: *Materiály a člověk. Netradiční úvod do současné materiálové vědy*. UTB Zlín, Zlín 2020.
 8. Matyszak P.: *Zapomenuté národy starověkého světa*. Lingea, Brno 2021.
- Raab M., Hrubý M., Vrabcová J.: *Chem. Listy 116*, 262–265 (2022).
 - <https://doi.org/10.54779/ch120220262>