

MERJENJE MASE IN GOSTOTE 6.3.1

Avtorica: Eva Menart

Vsebina

1. Osnovni pojmi
2. Merjenje mase
3. Merjenje gostote
4. Praktični primeri
5. Literatura

1. Osnovni pojmi

Pojma masa in teža pogovorno pogosto zamenjujemo, čeprav njun pomen ni popolnoma enak. Masa je lastnost predmeta in odgovor na vprašanje, *koliko snovi predmet vsebuje*, teža pa predstavlja silo, ki jo na predmet izvaja gravitacija. Maso in težo povezuje enačba

$$W = m \cdot g$$

kjer je W sila teže, m masa in g gravitacijski pospešek ($9,8 \text{ Nkg}^{-1}$). Na Zemlji sta torej masa in sila teže povezani s faktorjem približno 10, na drugih planetih z drugačnimi gravitacijskimi pospeški pa masa ostane enaka, sila teže pa se občutno spremeni.

Standardna enota¹ za merjenje mase je kilogram (kg). Maso manjših predmetov sicer najpogosteje podajamo v gramih (g), večjih v kilogramih (kg), pri velikih konstrukcijah (običajno zunanjih) pa lahko tudi v tonah (t. i. metrična tona, t).

Gostota je fizikalna količina, ki izraža razmerje med maso in prostornino telesa, torej nam pove, kakšno maso ima določen volumen nekega materiala. Gostoto označujemo z grško črko ρ [ro], najpogostejši enoti za merjenje

gostote pa sta kgm^{-3} (kg/m^3) in gcm^{-3} (g/cm^3), pri čemer je $1000 \text{ kgm}^{-3} = 1 \text{ gcm}^{-3}$.

Gostoto lahko določimo plinom, kapljevina in trdnim snovem. Gostoto plinov lahko izračunamo iz splošne plinske enačbe², kapljevina pa gostoto določamo s piknometrom (za manjše količine) ali aerometrom (za večje količine). Ker imamo konservatorji-restavradorji običajno opravka s predmeti, se bomo v poglavju osredotočili na trdne snovi.

2. Merjenje mase

Merjenje mase predmeta je pogosto koristno orodje za njegovo identifikacijo, npr. v skupini podobnih predmetov brez značilnih oznak ali drugih karakteristik. Zato na začetku konservatorsko-restavratskega postopka predmetom izmerimo maso, če njihova velikost in oblika to dovoljujeta, in jo zabeležimo v konservatorsko-restavratski dokumentaciji.

Merjenje mase oz. tehtanje predmeta v daljšem obdobju lahko služi tudi kot dokaz o izgubi materiala v procesih propadanja ali nalaganja korozijskih produktov. Ker so te razlike običajno zelo majhne, bi za

¹ Mednarodni sistem enot SI, okrajšava francoskega izraza *Système international (d'unités)*.

² $\rho = (p \cdot M)/(R \cdot T)$, kjer je p tlak, M molska masa plina, R splošna plinska konstanta, enaka $8,314 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$, in T temperatura v kelvinih (K).

njihovo zaznavanje potrebovali zelo precizne tehtnice oz. bi spremembe v masi z običajnimi tehtnicami, ki jih imamo v konservatorsko-restavratorskih laboratorijih, najverjetneje zaznali šele potem, ko bi bile že opazne s prostim očesom.

Za tehtanje³ majhnih predmetov v konservatorsko-restavratorskem postopku uporabljamo laboratorijske tehtnice z natančnostjo vsaj 0,01 g (10 mg). Večji (in težji) ko je predmet, manj decimalnih mest potrebujemo na tehtnici, da lahko določimo maso s sprejemljivo natančnostjo. Načeloma želimo maso določiti na vsaj tri mesta, ne glede na to, kje stoji decimalna vejica. To pomeni, da je meritev mase z rezultatom 3,14 g enako natančna kot meritev z rezultatom 509 g.

Težke predmete nepravilnih oblik lahko tehtamo z različnimi visečimi (žerjavnimi) tehtnicami, vendar le, če predmet lahko na tako tehtnico varno obesimo.

3. Merjenje gostote

Različne kovine in kovinske zlitine imajo zelo različno gostoto. To pomeni, da imajo predmeti identične oblike lahko zelo različno maso glede na to, iz katere kovine so sestavljeni: aluminijast je občutno lažji od medeninastega, ta je lažji od srebrnega itd.

Določanje gostote je lahko zelo zanesljiv, hkrati pa instrumentalno popolnoma nezahteven način za ugotavljanje sestave predmeta, s predpostavko, da je izveden pravilno. Tu predvsem govorimo o (dobro ohranjenih, neporoznih) kovinskih predmetih, ki jim sam postopek določanja gostote, med katerim je treba ves predmet potopiti v vodo ali drugo tekočino,

ne škoduje. Različno gostoto imajo tudi različni tipi lesa, vendar pa določanje gostote (in s tem tipa lesa) s potapljanjem za lesene predmete ni primerno, saj jih lahko poškoduje.

Določanje gostote je lahko zelo koristna komplementarna tehnika določanju sestave predmeta z zapletenimi instrumentalnimi metodami, kot sta rentgenska fluorescenčna spektrometrija (XRF) ali metoda protonsko vzbujenih rentgenskih žarkov (PIXE). Z omenjenima metodama namreč določimo sestavo površine predmeta, v kovinsko jedro pa ne vidimo. Običajno so kovinske prevleke (npr. pozlata, posrebitev ali pokositrenje) tanke, zato med XRF ali PIXE analizo zaznamo tudi osnovno kovino pod prevleko, če je prevleka neobičajno debela, pa osnovne kovine z navedenima površinskima metodama ne moremo zaznati. V tem primeru z določanjem gostote lahko ugotovimo, ali je ves predmet izdelan iz kovine na površini ali pa gre morda za drugo kovino, prevlečeno z debelo kovinsko prevleko.

Gostoto (kovinskega) predmeta določamo s pomočjo Arhimedovega zakona, ki pravi, da je vzgon potopljenega predmeta enak teži izpodrinjene tekočine. V praksi to pomeni, da lahko vzgon določimo s tehtanjem samega predmeta in predmeta pod gladino vode (ali druge tekočine), razlika med količinama pa ustreza teži tekočine, ki jo je potopljeni predmet izpodrinil. Ko poznamo težo oz. maso izpodrinjene tekočine in njeno gostoto (gostota vode je 1 kgdm^{-3} oz. 1000 kgm^{-3}), lahko izračunamo njeno prostornino, ki je enaka prostornini predmeta. Pri

določanju gostote je pomembno poudariti, da metoda deluje le, če je predmet homogen oz. sestavljen iz enega samega materiala. Čim gre za kombinacijo več materialov, so rezultati lahko zavajajoči.

Postopek za določanje gostote je torej tak:

1. Predmet stehtamo (m_{predmeta}).
2. Predmet na vrivici z vzmetno tehtnico stehtamo tako, da je med meritvijo ves potopljen v vodo in se ne dotika sten posode ($m_{\text{predmeta v vodi}}$).
3. Od vrednosti pod točko 1 odštejemo vrednost pod točko 2 (= masa izpodrinjene tekočine).
4. Gostoto predmeta izračunamo po formuli:

$$\rho = \frac{m_{\text{predmeta}}}{V_{\text{predmeta}}} = \frac{m_{\text{predmeta}}}{m_{\text{predmeta}} - m_{\text{predmeta v vodi}}} \cdot \rho_{\text{vode}}$$

Z običajno laboratorijsko tehtnico lahko postopek še nekoliko poenostavimo:

1. Predmet stehtamo (m_{predmeta}).
2. Na laboratorijsko tehtnico postavimo čašo vode (čaša mora biti dovolj velika, da se predmet ves potopi in se pri tem ne dotika sten), tehtnico tariramo (da kaže 0) in v čašo s pomočjo vrvice potopimo predmet. Odčitamo vrednost, ki je enaka masi izpodrinjene vode (m_{vode}).
3. Gostoto predmeta izračunamo po formuli:

$$\rho = \frac{m_{\text{predmeta}}}{V_{\text{predmeta}}} = \frac{m_{\text{predmeta}}}{m_{\text{vode}}} \cdot \rho_{\text{vode}}$$

Izračunano gostoto primerjamo z dostopnimi podatki o gostoti za različne kovine in kovinske zlitine. Gostota pogostih materialov je navedena v tabeli 1.⁴

³ Tehtnica v resnici izmeri silo teže, s katero podpira predmet, ker pa so tehtnice izdelane za uporabo na Zemlji, imajo v skali (ali kalibraciji pri digitalnih tehtnicah) že vključen gravitacijski pospešek in s tem pretvorbo v maso.

⁴ Povzeto po Engineering ToolBox – Resources, Tools and Basic Information for Engineering and Design of Technical Applications! (Dostopno na: https://www.engineeringtoolbox.com/metal-alloys-densities-d_50.html, dostop 27. 8. 2020); Trent et al., 1957, str. 17–35.

Tabela 1: Gostota pogostih materialov

Material	Gostota (kgm ⁻³)
natrij	1000
magnezij	1800
aluminij (in pogoste aluminijeve zlitine)	2600–2900
titan	4500
cink	6900–7200
kositer	7280
lito železo	6800–7800
kovano železo	7750
železo	7850
jeklo	7700–7900
baker	8300–9000
bron	8700–8900
aluminijev bron (3–10 % Al)	7700–8700
medenina	8400–8800
srebro	10400–10600
svinec	11300
živo srebro	13590
zlato	19300
platina	21500

4. Praktični primeri⁵

a) Določanje sestave novca 1

- $m_{\text{predmeta}} = 21,72 \text{ g}$
- $m_{\text{vode}} = 2,54 \text{ g}$
- $\rho = \frac{21,72 \text{ g}}{2,54 \text{ g}} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 8551 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

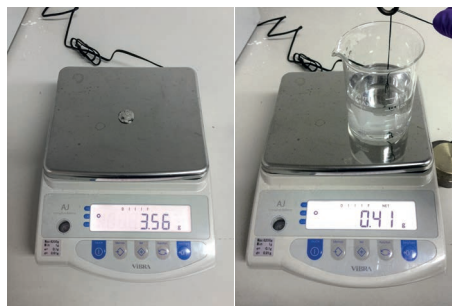


Slika 1: Primer a

Izračunana gostota se ujema s podatki o gostoti bakra ali medenine, torej je novc najverjetneje sestavljen iz enega od teh dveh materialov. XRF analiza je pokazala, da je novc res sestavljen iz bakrove zlitine s svincem, cinkom in kositrom.

b) Določanje sestave novca 2

- $m_{\text{predmeta}} = 3,56 \text{ g}$
- $m_{\text{vode}} = 0,41 \text{ g}$
- $\rho = \frac{3,56 \text{ g}}{0,41 \text{ g}} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 8683 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

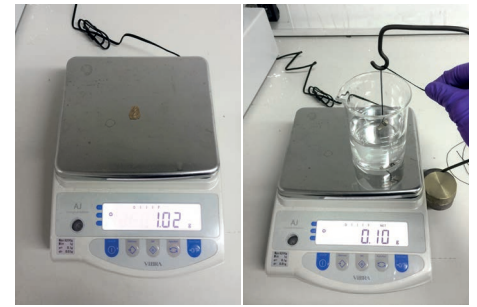


Slika 2: Primer b. Zaradi majhne mase izpodrinjene vode (slika desno) je določitev gostote nekoliko manj natančna (masa je izmerjena le na dve mesti).

Izračunana gostota se tudi pri drugem novcu ujema z gostoto bakra ali bakrovih zlitin. Površina novca je sicer srebrne barve, z določitvijo gostote pa ugotovimo, da gre le za tanko prevleko (posrebnjenje) in ne za srebrn predmet (gostota srebra je namreč občutno večja, nad 10000 kgm⁻³). Rezultat se ujema z XRF analizo, ki je pokazala posrebnitev na novcu iz bakrove zlitine z nizko vsebnostjo kositra in svina.

c) Določanje sestave svetinjice

- $m_{\text{predmeta}} = 1,02 \text{ g}$
- $m_{\text{vode}} = 0,10 \text{ g}$
- $\rho = \frac{1,02 \text{ g}}{0,10 \text{ g}} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 10200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$



Slika 3: Primer c. Tudi v tem primeru je zaradi majhne mase izpodrinjene vode (slika desno) določitev gostote nekoliko manj natančna (masa je izmerjena le na dve mesti).

Določena gostota je najbližje gostoti srebra, le nekoliko manjša. Iz tega lahko sklepamo, da je srebru primešana še kakšna (lažja) kovina, običajno je to baker. Glede na barvo predmeta je ta tudi pozlačen, vendar pa je pozlata najverjetneje tanka, saj ne prispeva občutno k masi predmeta. Rezultat XRF analize se s temi izsledki ujema, saj na površini pokaže visoko vsebnost zlata, prisotna pa sta tudi srebro in nekaj bakra.

d) Določanje sestave žeblja

- $m_{\text{predmeta}} = 15,12 \text{ g}$
- $m_{\text{vode}} = 1,97 \text{ g}$
- $\rho = \frac{15,12 \text{ g}}{1,97 \text{ g}} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 7675 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$



Slika 4: Primer d

Gostota žeblja je najbližje gostoti kovanega železa. Da je žebelj res iz železa, smo potrdili tudi z XRF analizo in nenazadnje s preprostim testom z magnetom.

⁵ Vse predmete, uporabljene za praktične primere, hrani Narodni muzej Slovenije.

e) Določanje sestave izstrelka za pračo (kopija)

1. $m_{\text{predmeta}} = 120,48 \text{ g}$

2. $m_{\text{vode}} = 10,75 \text{ g}$

3. $\rho = \frac{120,48 \text{ g}}{10,75 \text{ g}} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 11207 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$



Slika 5: Primer e

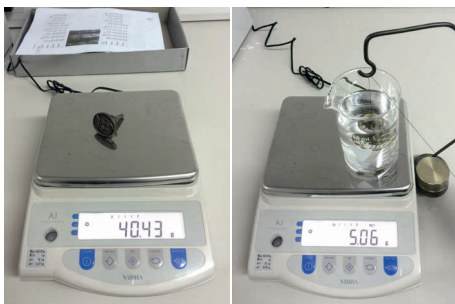
Določena gostota se najbolje ujema z gostoto svinca. Ker je bila kopija izdelana v Oddelku za konserviranje in restavriranje NMS, že vemo, da gre res za svinec, s tem pa se ujema tudi rezultat XRF analize.

f) Določanje sestave pečatnika

1. $m_{\text{predmeta}} = 40,43 \text{ g}$

2. $m_{\text{vode}} = 5,06 \text{ g}$

3. $\rho = \frac{40,43 \text{ g}}{5,06 \text{ g}} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 7990 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$



Slika 6: Primer f

Gostota materiala, iz katerega je narejen pečatnik, je 7990 kgm^{-3} , kar se ujema z aluminijevim bronom (za ostale bakrove zlitine je vrednost prenizka). Z XRF analizo smo ugotovili, da gre za nenavaden primer, saj je pečatnik v resnici

sestavljeno iz različnih materialov, a to s prostim očesom ni opazno. Tako gre v resnici za medenino, na dveh mestih na predmetu pa je poleg medenine prisoten še aluminij, ki maso znatno zmanjša. Ta primer kaže, da je določanje gostote po Arhimedovem zakonu ustrezna metoda le, če gre za homogen predmet, torej za predmet, ki je sestavljen iz samo enega materiala. Če gre za več različnih materialov, kot npr. pri pečatniku, lahko določimo neko povprečno gostoto, po kateri zmotno sklepamo na napačno kovino oz. zlitino.

Zanimiv primer določanja gostote sta tudi fibuli iz zakladne najdbe Drnovo. Z metodo PIXE so ugotovili, da je površina obeh srebrna, prisotnost sivih lis z drugačno sestavo pa je nakazovala na to, da sta fibuli v resnici sestavljeni iz drugega materiala, a posebreni. Meritve gostote so domnevo potrdile, fibuli sta namreč bronasti in debelo posebreni.⁶

Iz praktičnih primerov lahko vidimo, da je določanje gostote lahko zelo koristno orodje za identifikacijo kovin in kovinskih zlitin, a moramo biti pri njeni uporabi vseeno previdni. Za pravilno interpretacijo rezultatov je namreč ključno, da dobro razmislimo, s čim imamo opravka: torej ali je na predmetu kovinska prevleka, je predmet morda sestavljen iz različnih sestavnih delov, ali lahko maso določimo dovolj natančno itd.? Največja uporabna vrednost opisane metode je torej to, da je komplementarna instrumentalnemu določanju sestave površine, npr. z XRF ali PIXE. Pri uporabi določanja gostote kot samostojne metode za identifikacijo kovin ali kovinskih zlitin pa svetujemo previdnost.

5. Literatura

- 1 Šmit, Žiga; Miškec, Alenka, *Merjenje gostote kot analitska metoda. Primer fibul iz zaklada Drnovo*. Argo, vol. 52 (1–2), str. 148–149, 2009.
- 2 Engineering ToolBox – Resources, Tools and Basic Information for Engineering and Design of Technical Applications, https://www.engineeringtoolbox.com/metal-alloys-densities-d_50.html (dostop 27. 8. 2020).
- 3 Trent, H. M.; Stone, D. E; Lindsay, R. Bruce, *Density of solids*. American Institute of Physics Handbook, ur. Dwight E. Gray, str. 17–35, McGraw-Hill Book Company Inc., New York, 1957, <https://web.mit.edu/8.13/8.13c/references-fall/aip/aip-handbook-section2b.pdf> (dostop 27. 8. 2020).

Avtorica fotografij:

Eva Menart

⁶ Šmit in Miškec, 2009, str. 148–149.