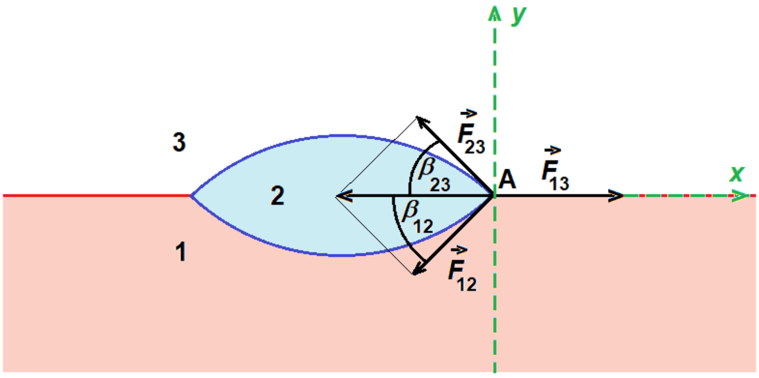
Jevy na rozhraní tří prostředí

Povrchové napětí, se kterým jsme se již seznámili, je zodpovědné také za to, jak vypadá rozhraní, v němž se stýká několik prostředí. Naznačili jsme si již, jak je tomu na rozhraní hladiny kapaliny a stěny nádoby. Podíváme se ještě na dva důležité případy: kapku plovoucí na hladině jiné kapaliny (tedy na rozhraní kapalina-kapalina-plyn) a na kapku na podložce z pevné látky (rozhraní pevná látka-kapalina-plyn).

a) kapalina-kapalina-plyn

Všimneme si případu, který je naznačen na obrázku 1. Na hladinu kapaliny (1), nad kterou je plynné prostředí (3) dopadne kapka jiné kapaliny (2). Může se jednat např. o kapku oleje plovoucí na vodě.



Obr. 1. Kapka čočkovitého tvaru plovoucí v kapalině jiného druhu.

Všechna tři prostředí z obrázku 1 se spolu dotýkají podél obvodu kapky. Toto společné rozhraní si představíme rozdělené na malé úseky Δl. Na každý takový úsek působí tři síly povrchového napětí $\boldsymbol{F}_{12}$, $\boldsymbol{F}_{23}$ a $\boldsymbol{F}_{13}$. Každá z těchto sil má směr tečny k příslušné stykové ploše. Síly $\boldsymbol{F}_{12}$ a $\boldsymbol{F}_{23}$ se snaží kapku „smrštit“, síla $\boldsymbol{F}_{13}$ má naopak snahu kapku roztáhnout. Pro stav rovnováhy, kdy je kapka v klidu, platí

$$\overrightarrow{F_{12}} + \overrightarrow{F_{23}} + \overrightarrow{F_{13}} = 0. \tag{1}$$

S každou silou je spojeno příslušné povrchové napětí:

$$F_{12} = \sigma_{12}\Delta l, \tag{2a}$$

$$F_{23} = \sigma_{23}\Delta l, \tag{2b}$$

$$F_{13} = \sigma_{13}\Delta l. \tag{2c}$$

Rovnici (1) přepíšeme do složek daných souřadnicovými osami x, y (obr. 1), zároveň provedeme malé úpravy:

x: $F_{12}\cos\beta_{12} + F_{23}\cos\beta_{23} = F_{13}$,

y: $F_{12}\sin\beta_{12} = F_{23}\sin\beta_{23}$.

Obě rovnice umocníme, sečteme a po úpravách (vyzkoušejte si je) dostaneme vztahy pro úhly β_{12} a β_{23}:

$$\cos\beta_{12} = \frac{F_{12}^2 + F_{13}^2 - F_{23}^2}{2F_{12}F_{13}} \ ,$$

$$\cos\beta_{23} = \frac{F_{13}^2 + F_{23}^2 - F_{12}^2}{2F_{13}F_{23}} \ .$$

Po dosazení ze vztahů (2) získáme pro úhly β_{12} a β_{23} výrazy v nichž vystupují příslušná povrchová napětí:

$$\cos\beta_{12} = \frac{\sigma_{12}^2+\sigma_{13}^2-\sigma_{23}^2}{2\sigma_{12}\sigma_{13}} \ , \tag{3a}$$

$$\cos\beta_{23} = \frac{\sigma_{13}^2+\sigma_{23}^2-\sigma_{12}^2}{2\sigma_{13}\sigma_{23}} \ . \tag{3b}$$

Pokud má kapka zůstat pohromadě a udržet si čočkovitý tvar, musí být splněno:

$$0 < \cos\beta_{12} < 1 \text{ a zároveň } 0 < \cos\beta_{23} < 1.$$

Pro povrchová napětí musí v tomto případě platit:

$$\sigma_{13} < \sigma_{12} + \sigma_{23}.$$

Příkladem takové situace je parafínový olej kápnutý na hladinu vody (v atmosféře tvořené vzduchem). Povrchové napětí voda-parafínový olej $\sigma_{12} \doteq 38$ mN·m^{-1}, olej-vzduch $\sigma_{23} \doteq 40$ mN·m^{-1} a voda-vzduch $\sigma_{13} \doteq 74$ mN·m^{-1}. Parafínový olej tedy na hladině vody vytváří soudržnou kapku.

Pokud se má kapalina roztéct po hladině druhé kapaliny, musí pro povrchová napětí platit:

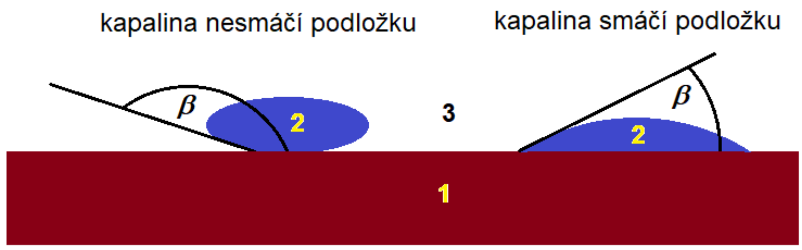
$$\sigma_{13} > \sigma_{12} + \sigma_{23}.$$

Toto je splněno např. pro olivový olej na hladině vody, kde jsou povrchová napětí: olej-voda $\sigma_{12} \doteq 12$ mN·m^{-1}, olej-vzduch $\sigma_{23} \doteq 33$ mN·m^{-1} a voda-vzduch $\sigma_{13} \doteq 74$ mN·m^{-1}. Olivový olej se tedy rozteče po hladině vody.

Známý případ, se kterým jste se pravděpodobně setkali, je kyselina olejová ($C_{17}H_{33}COOH$) kápnutá na hladinu vody. Pokud je hladina dostatečně velká, vytvoří na ní kyselina olejová vrstvičku o tloušťce jedné molekuly. Změřením plochy olejové skvrny na vodě potom můžeme zjistit, jaký je charakteristický rozměr molekuly kyseliny olejové. Aby se tento pokus dal udělat v nádobě rozumné velikosti (např. v lavoru) používá se roztok kyseliny olejové v petroleji (vhodná koncentrace je např. 1:2000). Po kápnutí kapky tohoto roztoku na hladinu vody se petrolej rychle odpaří a zbyde pouze vrstvička kyseliny olejové. Hladinu vody je dobré předem posypat např. pudrem, korkovým práškem apod., aby byla skvrna kyseliny dobře vidět. Je samozřejmě důležité změřit dostatečně přesně objem kapky, kterou na hladinu kápneme.

b) pevná látka-kapalina-plyn

Když dopadne kapka kapaliny na rovnou podložku tvořenou nějakou pevnou látkou, mohou nastat dva případy. Kapka může zůstat soudržná a snaží se minimalizovat stykovou plochu s podložkou, nebo se po podložce roztéká a vytvoří tvar připomínající „ploskovypuklou spojnou čočku“ (čočku, která má jeden povrch rovinný a druhý konvexní). Oba zmíněné případy jsou načrtnuty na obrázku 2 (1-pevná látka, 2-kapalina, 3-plyn).



Obr. 2. Kapka na podložce.

Zachováme-li značení zavedené v obrázku 1, bude $\beta_{12} = 0$ a pro jednoduchost označíme β_{23} jako β. Rovnice (3a), (3b) potom můžeme napsat ve tvaru:

$$1 = \frac{\sigma_{12}^2+\sigma_{13}^2-\sigma_{23}^2}{2\sigma_{12}\sigma_{13}} \tag{4a}$$

$$\cos\beta = \frac{\sigma_{13}^2+\sigma_{23}^2-\sigma_{12}^2}{2\sigma_{13}\sigma_{23}} \tag{4b}$$

Upravíme rovnici (4a):

$$2\sigma_{12}\sigma_{13} = \sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 - \sigma_{23}^2 \Longrightarrow \sigma_{23}^2 - \sigma_{12}^2 = \sigma_{13}^2 - 2\sigma_{12}\sigma_{13}$$

a dosadíme do rovnice (4b):

$$\cos\beta = \frac{\sigma_{13}^2 + \sigma_{13}^2 - 2\sigma_{12}\sigma_{13}}{2\sigma_{13}\sigma_{23}} = \frac{2\sigma_{13}^2 - 2\sigma_{12}\sigma_{13}}{2\sigma_{13}\sigma_{23}}$$

$$\cos\beta = \frac{2\sigma_{13}(\sigma_{13} - \sigma_{12})}{2\sigma_{13}\sigma_{23}} = \frac{\sigma_{13} - \sigma_{12}}{\sigma_{23}}$$

$$\sigma_{13} = \sigma_{12} + \sigma_{23}\cos\beta$$

$$\cos\beta = \frac{\sigma_{13}-\sigma_{12}}{\sigma_{23}}\,. \tag{5}$$

Platí-li pro povrchová napětí $\sigma_{13} > \sigma_{12}$ a zároveň $\sigma_{23} > \sigma_{13} - \sigma_{12}$ je úhel β ostrý a kapka má tvar jako na obrázku 2 vpravo (ploskovypuklá čočka). V takovém případě říkáme, že kapalina smáčí podložku. Dochází k tomu např., když kápneme čistou vodu na čisté sklo, nebo kapku rtuti na zlatou cihlu (jak dobře víme z každodenní zkušenosti).

Pokud pro povrchová napětí platí $\sigma_{13} < \sigma_{12}$ a zároveň $\sigma_{23} > \sigma_{12} - \sigma_{13}$ je úhel β tupý a kapka má tvar jako na obrázku 2 vlevo (kapalina nesmáčí podložku).
V případě, kdy $\sigma_{23} = \sigma_{12} - \sigma_{13}$, je $\beta = \pi$ a dochází k dokonalému nesmáčení podložky. Příkladem dokonalého nesmáčení je kapka rtuti na skle, nebo kapka vody na destičce z parafínu. Nutné přitom je, aby jak kapalina, tak podložka byly dokonale čisté.