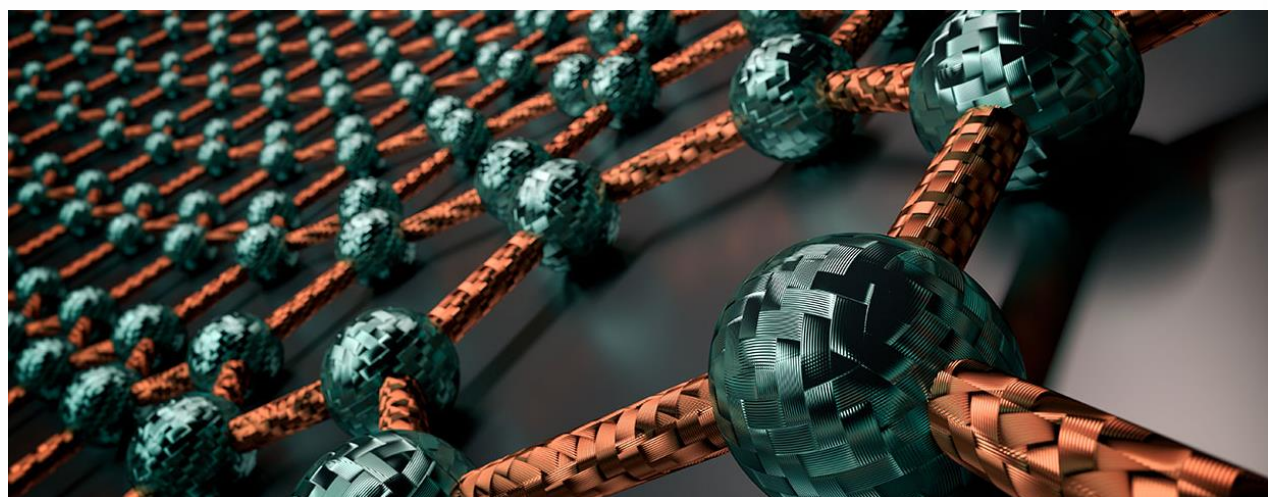


13

Perspektivní materiály pro elektrotechniku

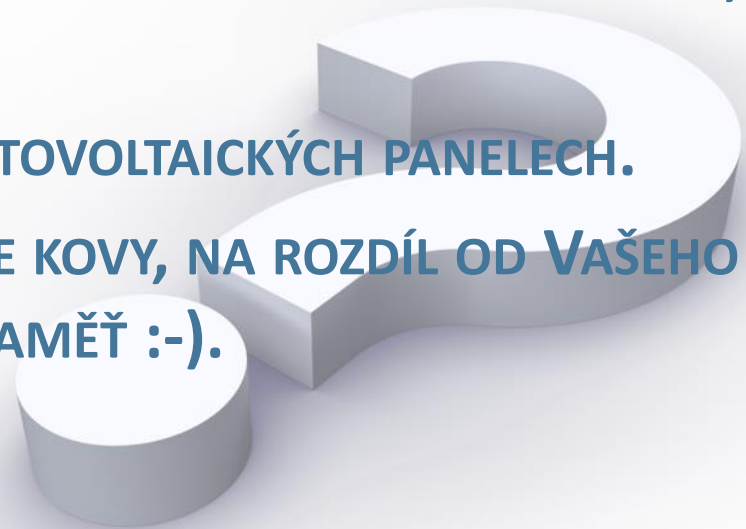


EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Co se v přednášce dozvíte?

- PŘEDSTAVÍME SI VYBRANÉ MATERIÁLOVÉ SKUPINY, KTERÉ MAJÍ POTENCIÁL ZMĚNIT OBLAST MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ.
- OPĚT SE PŘESVĚDČÍME, ŽE KDYBY ČLOVĚK „NEOPISOVAL“ OD PŘÍRODY, NIC NOVÉHO BY NEVYMYSLEL :-).
- UKÁŽEME SI, ŽE I „MĚKKÝŠ“ MŮŽE MÍT SUPERPEVNÝ PANCÍŘ :-).
- VYSVĚTLÍME SI, JAK SE MOHOU POLYMERY SAMI UZDRAVOVAT.
- SEZNÁMÍME SE S KOVY, KTERÉ MAJÍ AMORFNÍ STRUKTURU A UKÁŽEME SI, K ČEMU JE TATO „DROBNOST“ DOBRÁ.
- UTŘÍDÍME SI INFORMACE A NOVINKY O FOTOVOLTAICKÝCH PANELECH.
- V ZÁVĚRU PŘEDNÁŠKY SE PŘESVĚDČÍME, ŽE KOVY, NA ROZDÍL OD VAŠEHO PŘEDNÁŠEJÍCÍHO, MOHOU MÍT GENIÁLNÍ PAMĚŤ :-).



13.1 Nanomateriály a nanotechnologie

13.1.1 Co jsou to nanomateriály a nanotechnologie?

V současné době **neexistuje** **všeobecně uznávaná a jednotná definice pojmu nanotechnologie**. Nicméně, jedná se o oblast soustřeďující klasické vědecké obory jako jsou *fyzika, kvantová mechanika, chemie, biochemie, elektronika* atd. při **vývoji materiálů, zařízení a funkčních systémů s výjimečnými vlastnostmi**, vyplývajícími z kvantové podstaty a schopnosti samo-organizace hmoty v rozměru **nanometrů**.

1) Definice používaná v americkém programu „National Nanotechnology Initiative, NNI“
(volný překlad):



„Nanotechnologie je porozumění a řízení hmoty v nanoměřítku, v rozměrech přibližně 1 až 100 nanometrů, kde jedinečné jevy umožňují nové aplikace. Nanotechnologie zahrnuje vědu, inženýrství a technologii v nanoměřítku. Jedná se o zobrazování, měření, modelování a manipulaci s hmotou v tomto měřítku délky.“



2) Úřední věstník Evropské unie – doporučení Komise ze dne 18. října 2011 o definici nanomateriálu:

*„Nanomateriálem“ se rozumí přírodní materiál, materiál vzniklý jako vedlejší produkt nebo materiál vyrobený obsahující částice v nesloučeném stavu nebo jako agregát či aglomerát, ve kterém je u **50 % nebo více částic** ve velikostním rozdělení jeden nebo více vnějších rozměrů v rozmezí velikosti **1 nm – 100 nm.**“*



3) Definice dle britské The Royal Society (2003):

*„Nanověda je studium hmoty na atomové a molekulární úrovni (obvykle **od 0,1 do 100 nm**), kde se vlastnosti výrazně liší od vlastností při větších rozměrech. **Nanotechnologie** je aplikací těchto znalostí při vytváření užitečných materiálů, struktur a zařízení. “*



13.1.2 Velmi stručná historie nanotechnologií

První polovina 20. století – převládala **Schrödingerova představa**, že **atomy nelze přesně v prostoru lokalizovat**, protože „atomy nelze pokládat za individuality, které lze identifikovat“ => ještě nebylo zřejmé, že bychom někdy byli schopni ovládat hmotu na atomární či molekulární úrovni.

Konec padesátých let 20. století – někteří jednotlivci předpověděli možnost konstrukce zařízení o **molekulárních rozměrech**, tak jak to od pradávna dělá příroda.



Arthur von Hippel elektroinženýr z *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) zavedl pojem „**molekulární inženýrství**“ (1956).

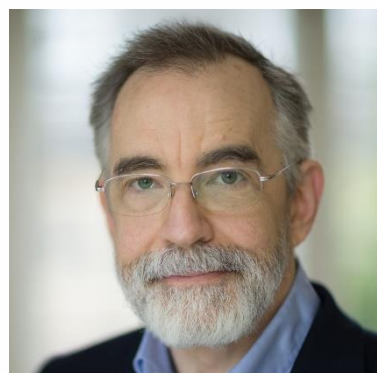


Richard Feynman, nositel Nobelovy ceny za fyziku, přednesl v roce 1959 svojí přednáškou „*There`s Plenty Room at the Bottom*“ a upozornil na možnost **manipulace s objekty o nepatrných rozměrech**.

Druhá polovina 20. století – intenzivní výzkumné práce zaměřené na poznání vlastností základních stavebních prvků hmoty prokázaly, že **atomy jsou dostatečně robustní** => můžeme je **izolovat, počítat, pozorovat a manipulovat s nimi**.



Norio Taniguchi (*Tokyo University of Science*) zavedl v roce 1974 **pojem „nanotechnologie“** k popisu procesů zpracování polovodičových materiálů (např. nanášení tenkých vrstev).



Eric Drexler (*MIT*) představil v roce 1986 **koncept „molekulární nanotechnologie“**. Vizi molekulárních nanostrojů replikujících sami sebe a opravujících každou strukturu materiálního světa (živou i neživou).

Průlomovým bylo vynalezení **rastrovacího tunelového mikroskopu** (IBM, 1981; Nobelova cena 1986) a **mikroskopu atomových sil** (1986).

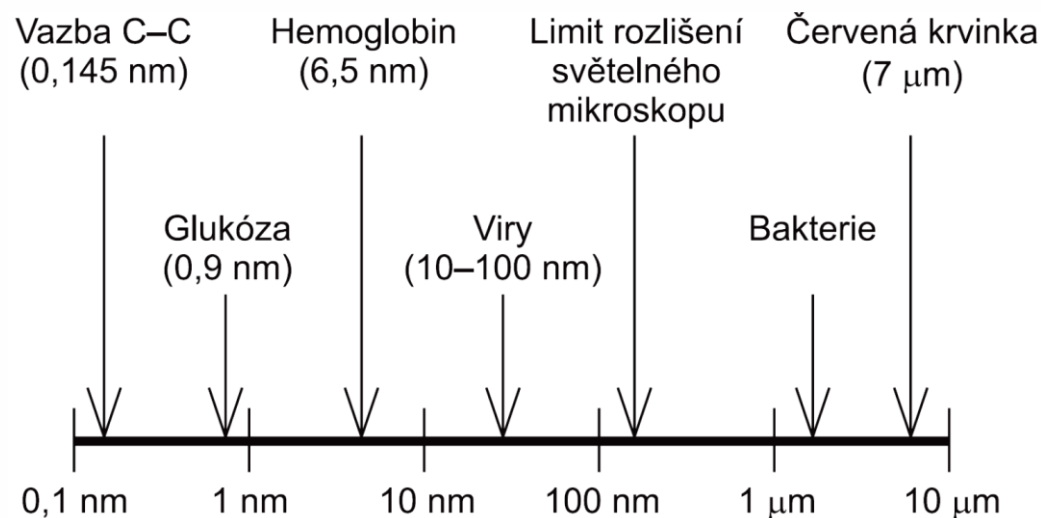
Zrodil se nový interdisciplinární obor **„nanotechnologie“**, který má potenciál způsobit novou průmyslovou i sociální revoluci.

13.1.3 Příklady nanotechnologií v přírodě

Mnoho biologických materiálů lze klasifikovat jako **nanočástice**.

Bakterie, jejichž velikost se pohybuje v rozmezí **1 až 10 μm** , patří do **mezoskopické oblasti** rozměrové škály, zatímco **viry** s rozměry **od 10 do 200 nm** patří do **horní části velikosti nanočástic**.

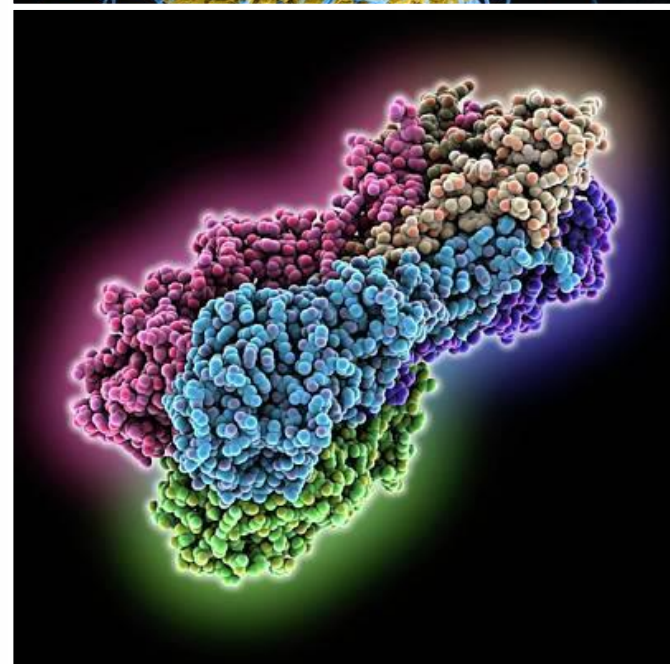
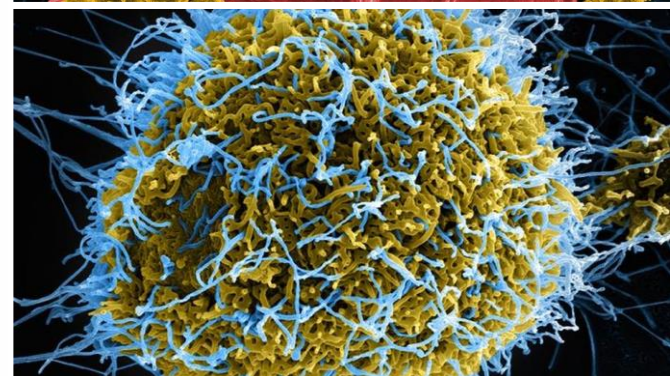
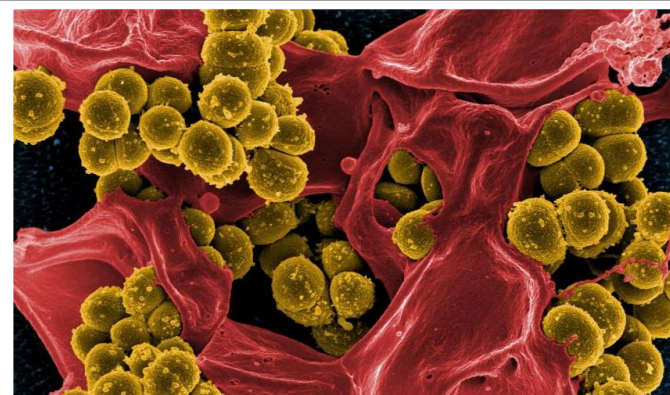
Bílkoviny (proteiny), které se obvykle vyskytují v rozměrech mezi **4 až 50 nm**, patří do **spodní části nanometrické škály**.



Bakterie *zlatého stafylokoka* ↑↑

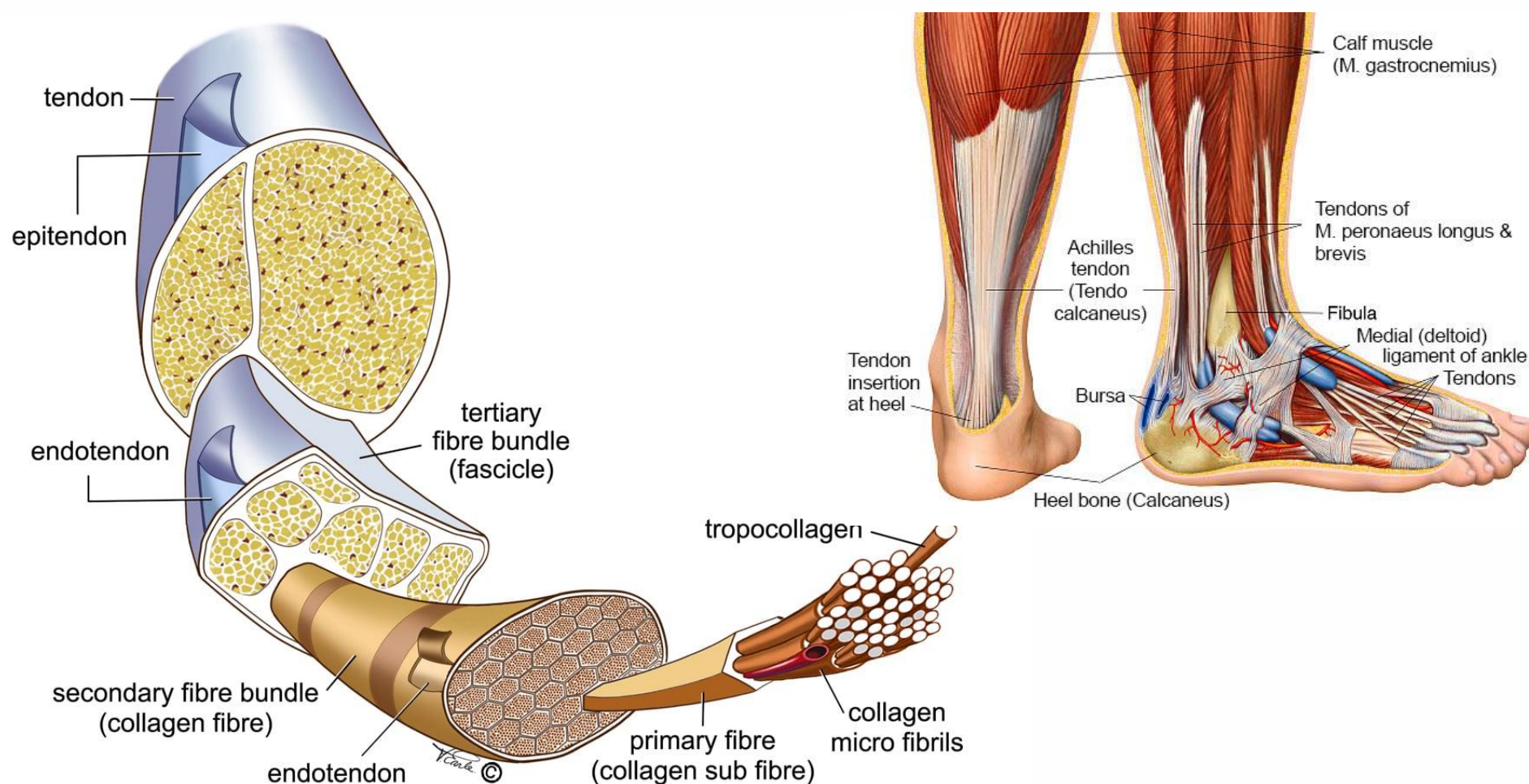
Virus *ebola* ↑

Membránový protein *hemagglutinin* →

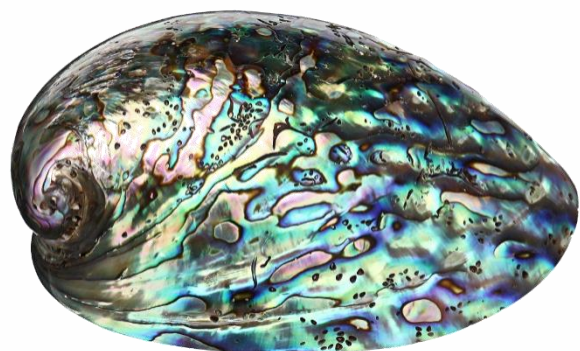


Lidská šlacha

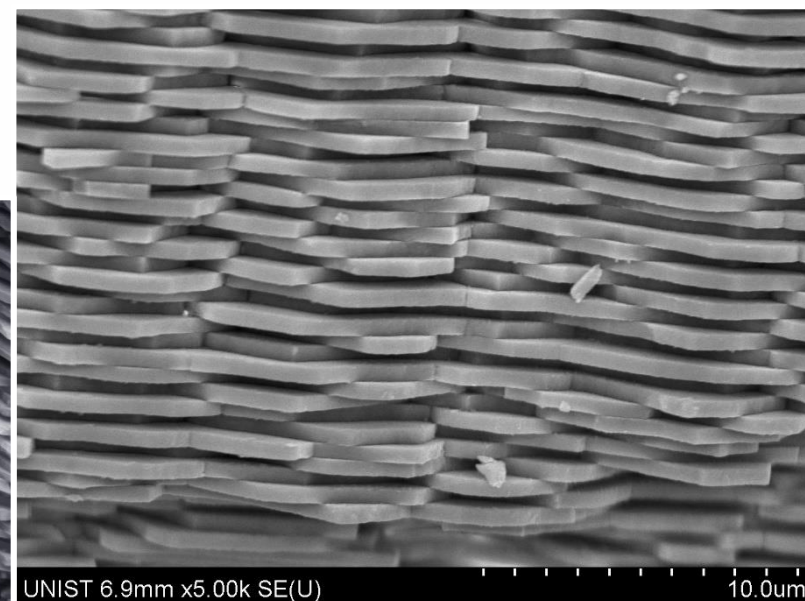
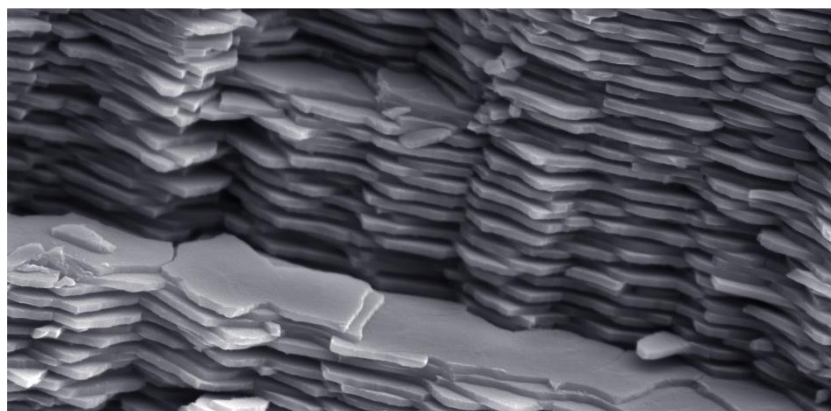
Skládá se postupně ze: seskupení **aminokyselin** (0,6 nm) → **kolagen** (1 nm) → **trojitá šroubovice kolagenu** (2 nm) → **mikrofibrila** = trojitá šroubovice nanostrukturálních „vláken“ (3,5 nm) → **subfibrila** (10 – 20 nm) → **fibrila** (50 – 500 nm) → **fascikulus** = svazek vláken (50 – 300 nm) → **šlacha**.



Skořápka měkkýše Abalon – **superpevná skořápka** s krásným, duhově zbarveným vnitřním povrchem. Měkkýš uspořádává **uhličitan vápenatý** (křídou) do pevných **nanostrukturních bloků**. Jako pojivo používá pružný sliz tvořený směsí **proteinů** a **uhlohydrátů**.



Struktura skořápky ztěžuje **pronikání trhlin**, jejich dráhy jsou při překonávání jemných nanostrukturních bloků **klikaté** a dochází tak k **rozptýlení energie** potřebné k lomu.



UNIST 6.9mm x5.00k SE(U)

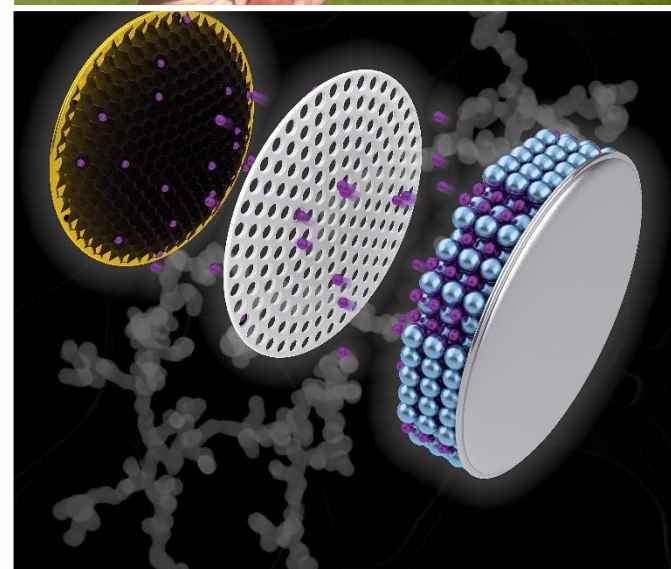
10.0um

13.1.4 Některé možnosti využití nanomateriálů a nanotechnologií

Medicína – cílený transport léčiv přímo k postiženým buňkám pomocí upravených nanočástic o velikosti molekul. Lze tak výrazně snížit vedlejší účinky léčby, jako např. v případě chemoterapie, při které dochází i k poškození zdravých buněk pacienta.

Solární články – solární články založené na nanotechnologiích, jejichž výroba vyjde **podstatně levněji**, než je tomu u běžných solárních článků.

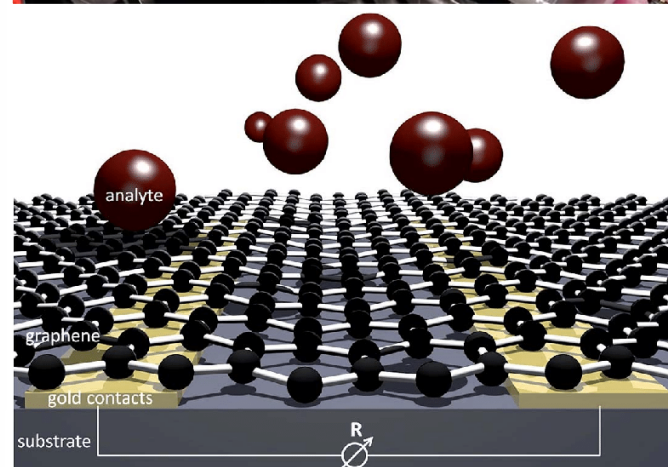
Baterie – použití nanomateriálů může výrazně **zpomalit proces stárnutí** (postupné ztrácení výkonu) současných baterií, **zvyšovat jejich výkon**, **zrychlit proces nabíjení** nebo vyrábět **flexibilní baterie**.



Palivové články – snížení cen katalyzátorů palivových článků a **zvýšení účinnosti membrán**, které se používají v palivových článcích pro oddělení vodíkových iontů od plynů, jako je *kyslík*.

Chemické senzory – v senzorech založených na nanotechnologiích mohou být použity rozmanité typy detekčních prvků, jako jsou např. **uhlíkové nanotrubičky**, **nanodráty z oxidů zinku** nebo **palladiové nanočástice**. Díky jejich malým velikostem postačuje ke změně el. vlastností detekčních prvků již pouhých několik molekul plynu => **snižuje se detekční limit senzoru**.

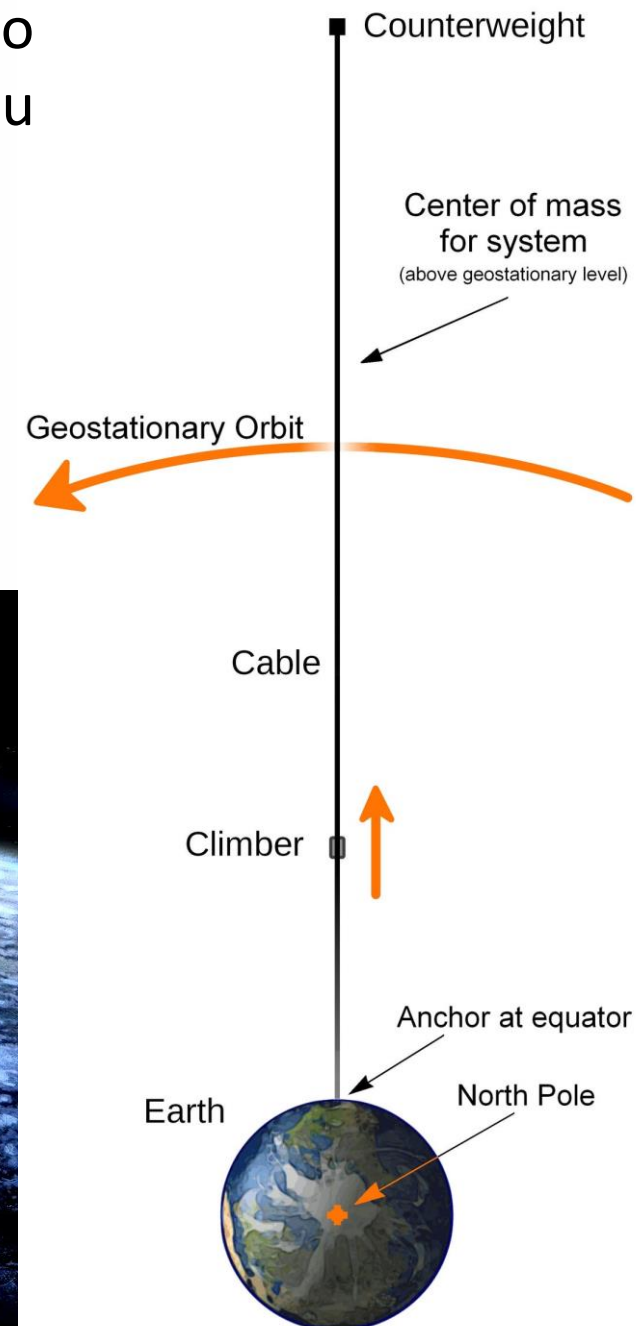
Lepší kvalita vzduchu – zvýšení **výkonnosti** (efektivní plochy) **katalyzátorů** používaných k **transformaci zplodin**, které unikají z aut nebo průmyslových závodů, **na zdravotně nezávadné plyny**.



Čistější voda – pomoc při **odstraňování průmyslových odpadních látek** z podzemních vod. Při vstupu do chemické reakce mohou nanočástice způsobit přeměnu kontaminující látky na zdravotně nezávadnou.

Vesmírný program – pokroky v nanomateriálech by měly umožnit **konstrukci lehkých raket**, příp. **kabelu pro vesmírný výtah** (= snížení nákladů na dosažení oběžné dráhy a cestování ve vesmíru).

Space Elevator



13.2 Samouzdravující polymery

13.2.1 Co je to samo-uzdravování (léčení)?

V materiálovém inženýrství se v principu jedná o využívání poznatků, získaných při léčení živých pacientů, pro účely „uzdravování“ **materiálů** používaných v průmyslové praxi.

Samouzdravování (*Self-Healing*) obecně popisuje jakýkoliv **materiál**, **zařízení** nebo **systém**, které jsou schopny se **uzdravit** (zotavit/opravit) **automaticky** a **autonomně**. To znamená, že **bez zásahu člověka** provedou nezbytné úpravy tak, aby se obnovily do původního (funkčního) stavu.

Aplikace některých „léčebných postupů“ je však stále ještě podmíněna vnějším zásahem člověka, proto se můžeme setkat se samouzdravujícími systémy *autonomními* i *neautonomními*.

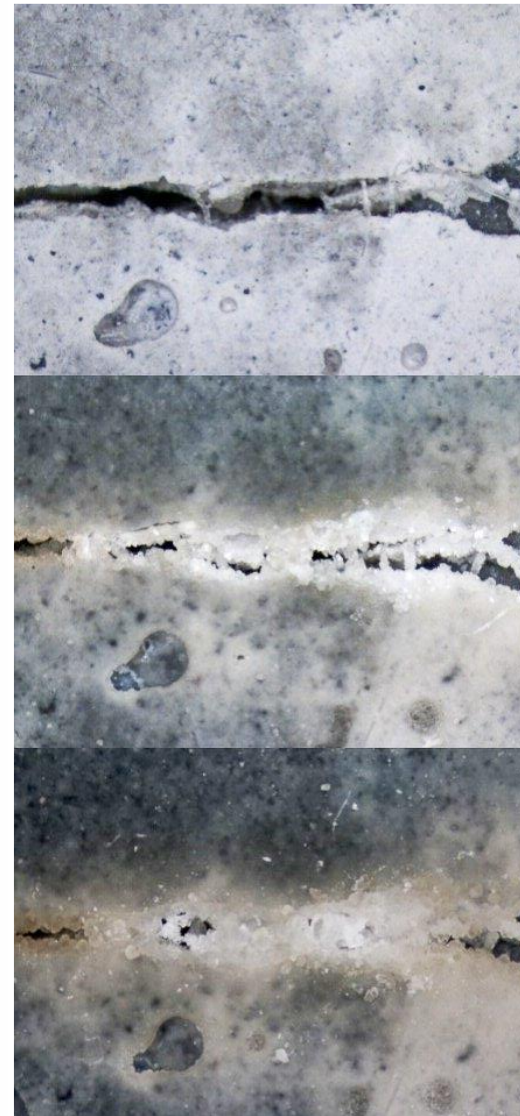


Autonomní systémy – iniciují proces samouzdravení **bez zásahu člověka**.

Neautonomní systémy – proces samouzdravení vyžaduje **vnější spuštění** nebo **zásah člověka**, nicméně, proces následného samouzdravení probíhá již zcela **automaticky**.

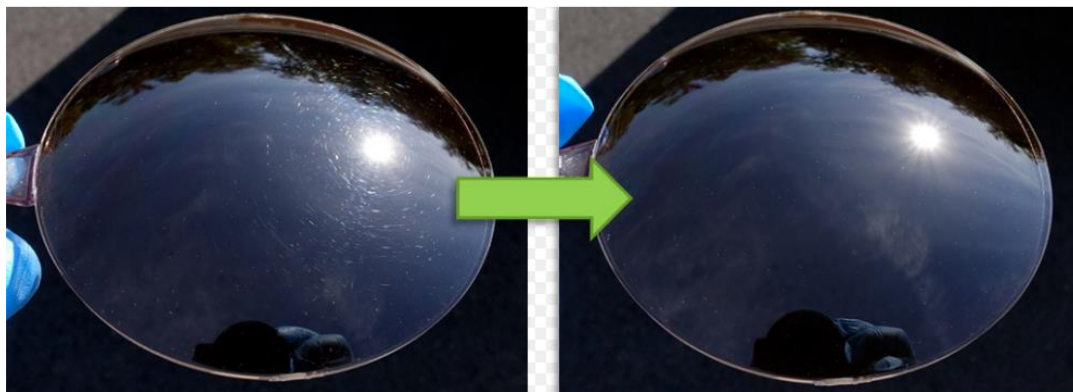
Hlavní úsilí je věnováno **zastavování růstu** či **zacelování trhlin**, jejichž přítomnost **negativně ovlivňuje bezpečnost a životnost konstrukcí** (kritické části staveb – *budovy, mosty, části letadel* apod.).

Analogické „uzdravovací“ postupy se používají i při nápravě **povrchových vad**, např. při obnově **antikoročních vrstev**, opravě drobných závad **na laku karoserie automobilů** apod.



Beton se schopností
samouzdravení →

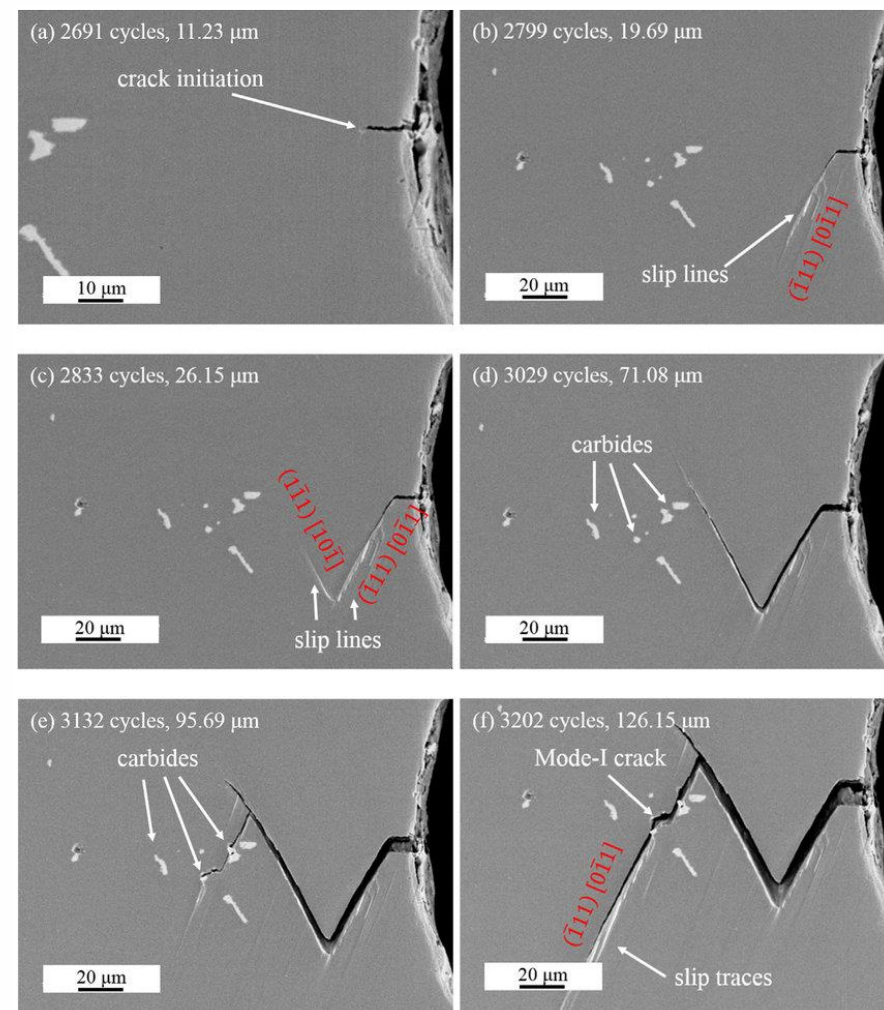
← Samouzdravující
se lak karoserie.



Polymery mají mezi materiály se samouzdravovacími schopnostmi **nejvýznamnější postavení**. Jejich použití by mělo přispět ke **zvýšení spolehlivosti** a **prodloužení životnosti** komponent vyrobených z kompozitních materiálů a vystavených za provozu časově proměnnému zatěžování a tedy **degradačním účinkům únavy materiálů**.

Praktická aplikace se předpokládá např. u **kompozitních částí konstrukcí** či **motorů letadel**. Takzvané „**únavové trhliny**“ často vznikají v místech, ve kterých je **obtížně realizovatelná** jak defektoskopická **kontrola**, tak i případná **oprava**.

To se může týkat například **kosmických sond**, **lékařských přístrojů** implantovaných v lidském těle, ale i některých **těžko opravitelných konstrukčních částí el. strojů** (např. *statorové tyče*) apod.

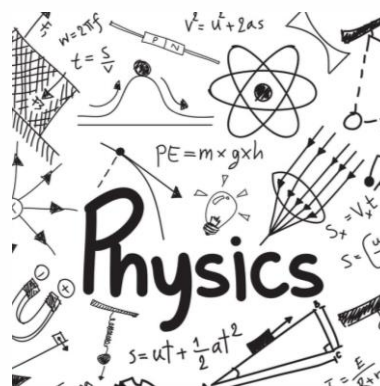


13.2.2 Strategie používané pro samouzdravování

Principů **samouzdravování** existuje v současné době poměrně velké množství.

Základním způsobem je lze dělit na:

- fyzikální,
- chemické.



V případě **polymerů** dále hovoříme o:

- **polymerech s vnitřním samouzdravováním** – využívají **vlastní materiální schopnosti** k samoléčení; obvykle je využito **reversibilního charakteru chemických vazeb** mezi složkami vlastní matrice, tj. inherentních (předem daných, neoddělitelných) vlastností struktury materiálu;
- **polymerech s vnějším samouzdravováním** – v tomto případě musejí být **léčebná činidla předem zabudována** do polymerní matrice (např. ve formě *mikrokapslí*) nebo je základní matrice protkána různými *systémy kanálků* (*≈cévy*), které jsou naplněny *léčivem a katalytickou složkou*.

13.2.3 Příklady samouzdravování polymerů

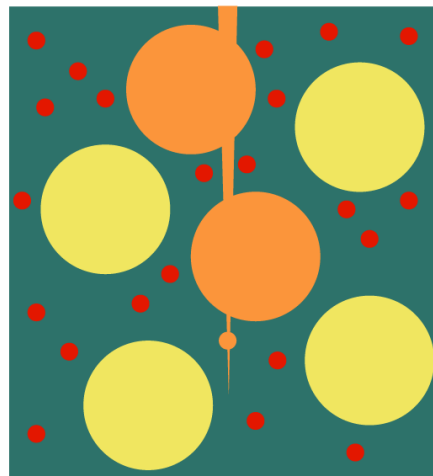
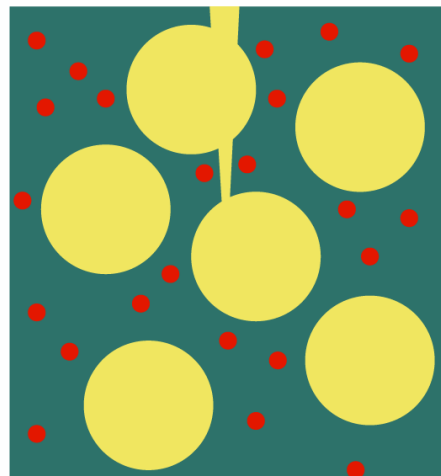
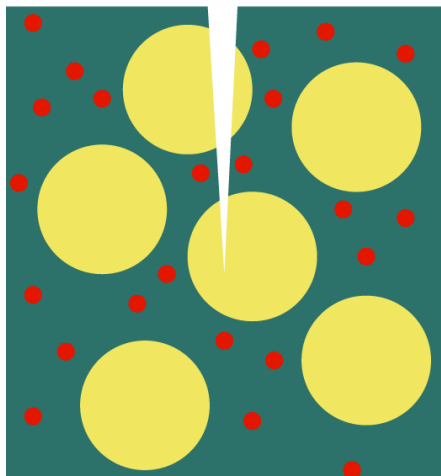
a) Systém kapslí s léčebnou a katalytickou složkou (Capsule based Self-Healing)

Trhlina šířící se polymerní matricí naruší obal **mikrokapslí** obsahujících tekuté léčebné chemické činidlo (např. *dicyclopentadien*). To zaplňuje prostor mezi lícemi trhliny, kde díky působení katalyzátoru polymerizuje a trhlinu zacelí.

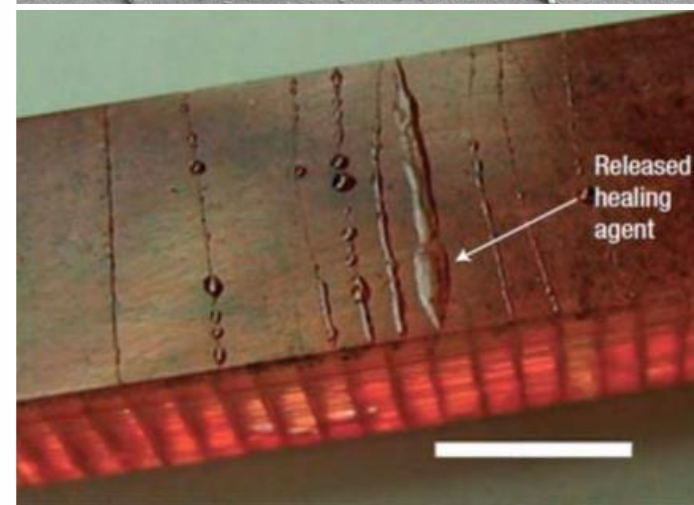
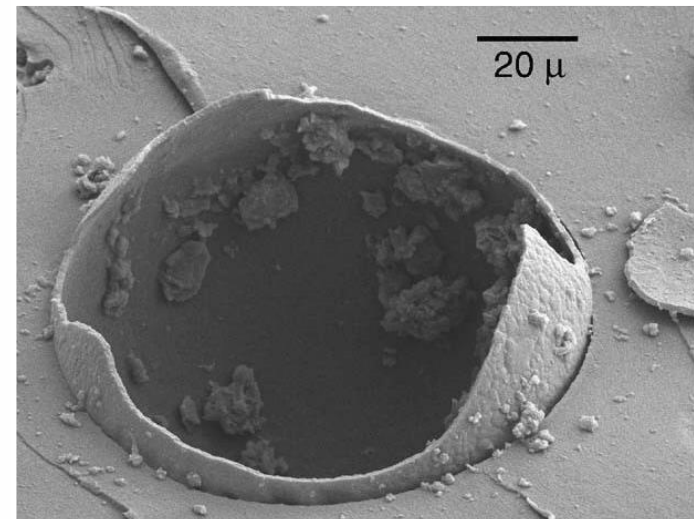
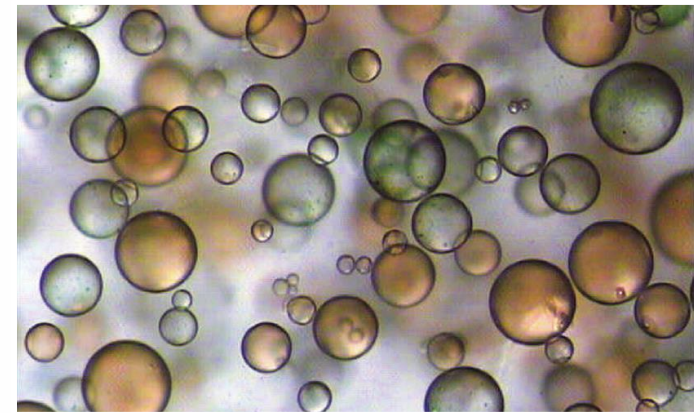
Crack forms in material

Crack fills bursts microcapsule, releasing healing agent

Contact with catalyst causes polymerization

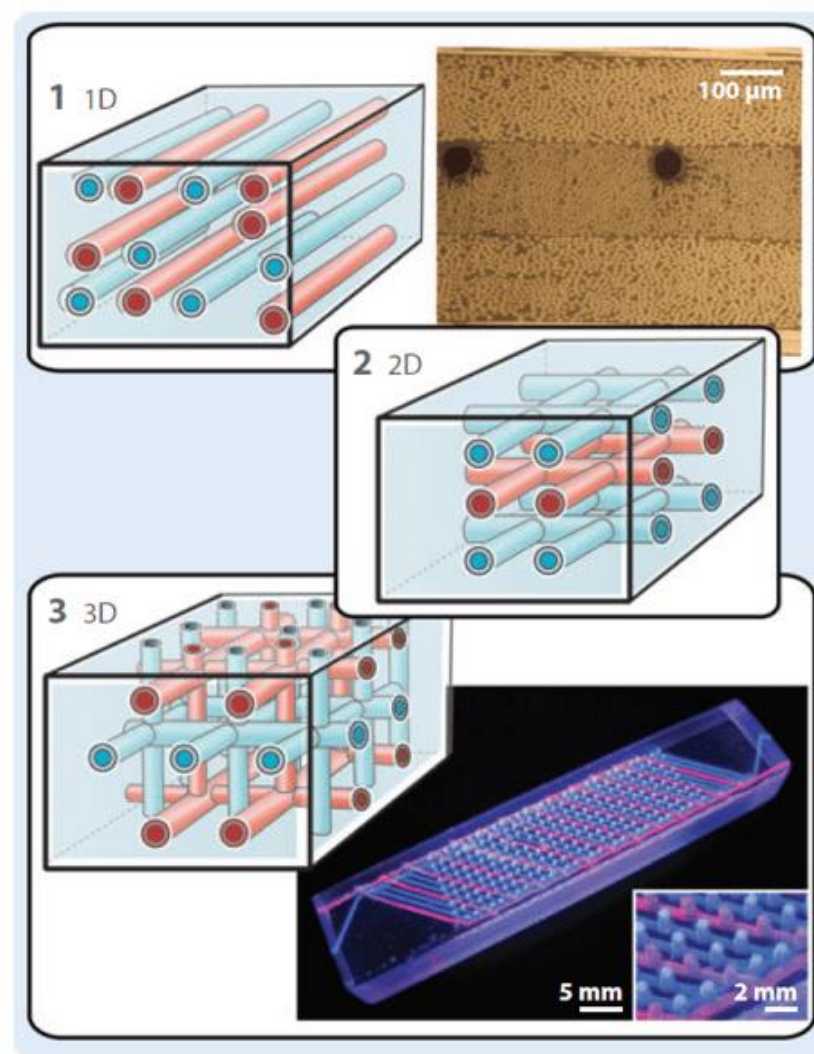
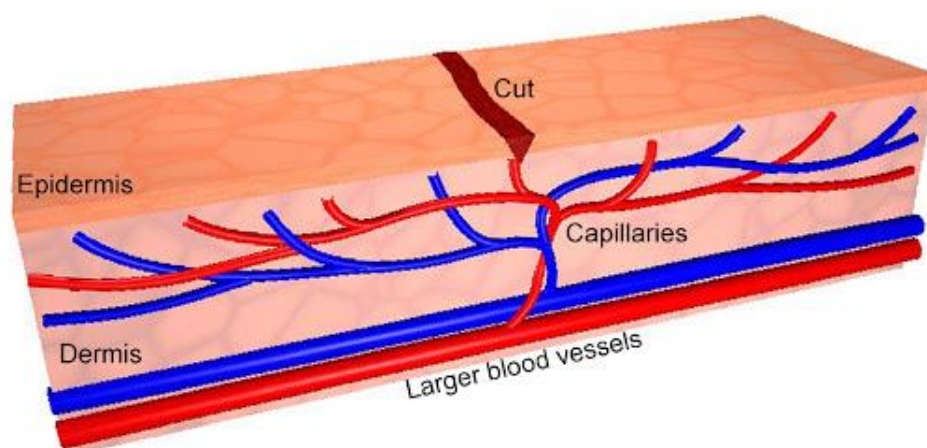
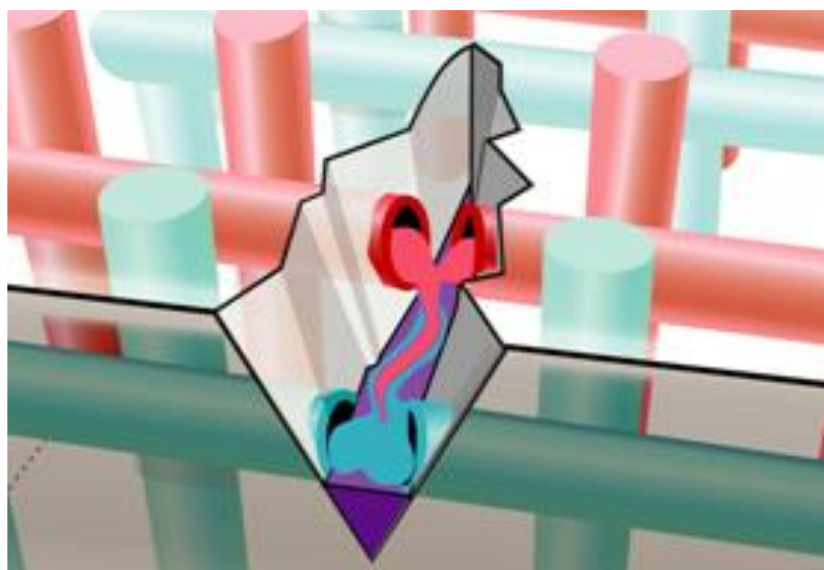


● Healing Agent
● Catalyst



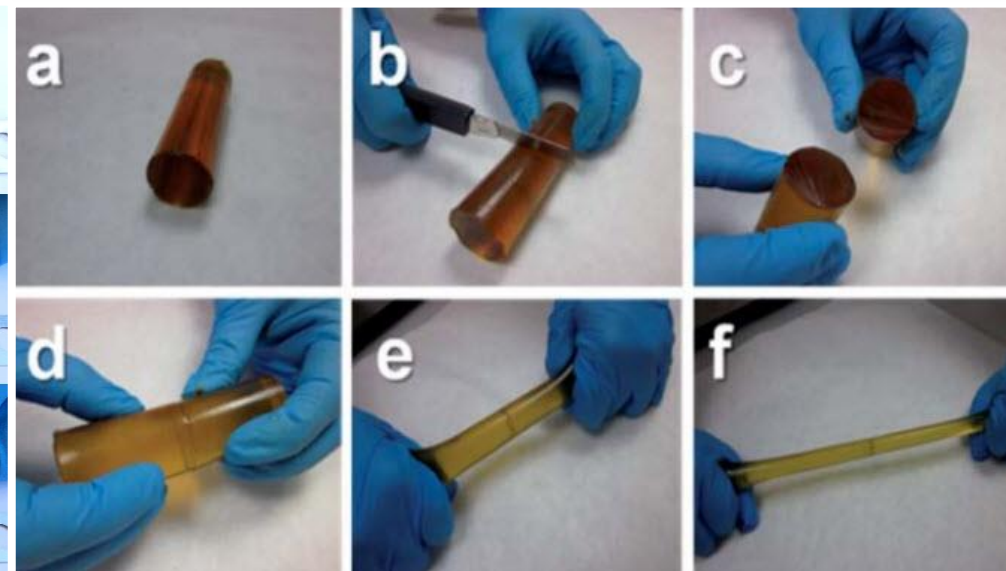
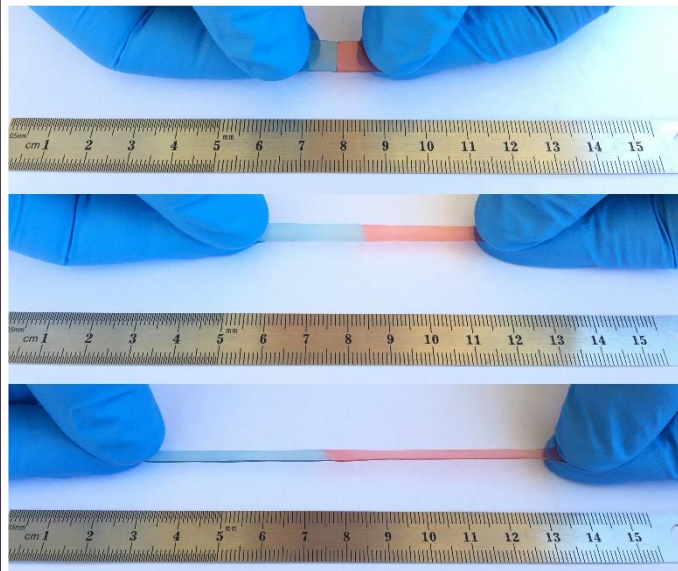
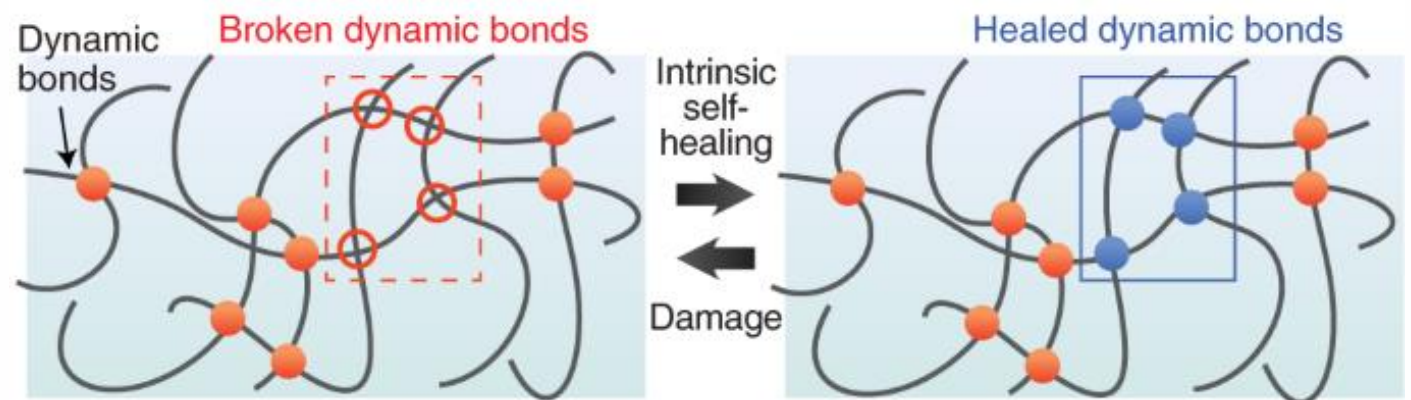
b) Cévní systém rozvodu léčebné a katalytické složky (Vascular Self-Healing)

Kanálky zprostředkovávají **dopravu léčiva a katalyzátoru** mezi líce trhliny. Tyto kanálky mohou být v matrici dle potřeby uspořádány buď v jednom směru, nebo ve více směrech.



c) Systém využívající inherentní vlastnosti materiálu (*Intrinsic Self-Healing*)

Tento systém využívá **reverzibilního charakteru** určitých **chemických vazeb** mezi dvěma prvky, které jsou integrální součástí základního materiálu. **Nevyžaduje dodání speciálních léčivých činidel** do jeho vnitřní struktury; nicméně, samotné léčení je často nutné iniciovat např. **zvýšením teploty** (i opakovaně).



13.3 Magnetická kovová skla

Magnetická kovová skla tvoří **nejmladší skupinu magneticky měkkých materiálů**. Tímto názvem se označují **amorfní magnetické materiály**.

Kovová skla (*amorfní kovy* nebo také *amorfní kovové slitiny*), **nejsou krystalická** jako běžné kovové materiály, zachovávají si však **vzhled kovů** a jejich *fyzikální, mechanické a chemické vlastnosti předčí kovové krystalické materiály podobného složení*.



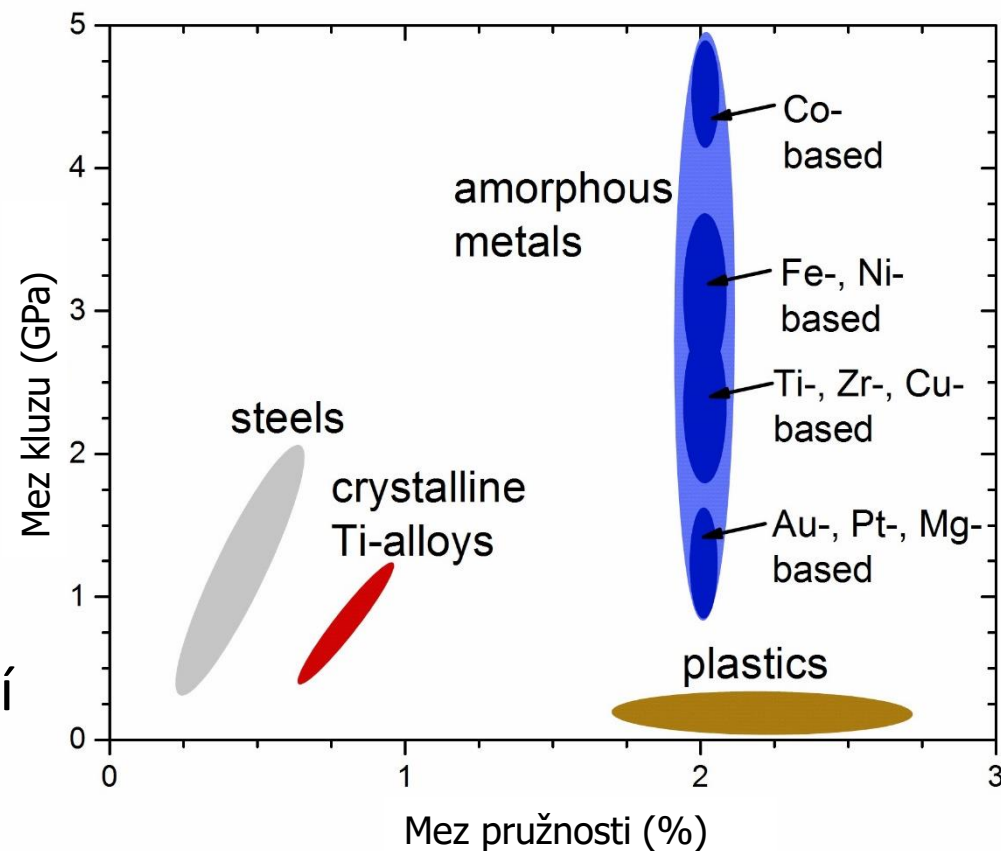
Tyto látky jsou **velmi homogenní**, pohyb **Blochových stěn je snadný**, a proto jsou ve srovnání s obdobným materiálem v krystalickém stavu **magneticky výrazně měkčí**.



13.3.1 Přednosti a typické vlastnosti kovových skel

Ve srovnání s **krystalickými kovovými materiály** mají:

- vysokou tvrdost,
- vyšší poměr pevnosti/hmotnosti,
- vyšší mez kluzu a pružnosti,
- vysokou odolnost proti korozi,
- vysokou rezistivitu,
- vysokou otěruvzdornost,
- vysokou rychlost šíření vln a vynikající clonící účinek.



Nevýhodou kovových skel je zejména jejich **teplotní nestabilita**. Při ohřevu nad určitou teplotu **dochází ke krystalizaci**, a tím i ke ztrátě příznivých vlastností. Tato teplota závisí na typu slitiny a obvykle nepřesahuje 300 °C.



Řada vlastností kovových skel (např. *hustota, stlačitelnost*) je **shodná** s vlastnostmi **krystalických materiálů**. Rozdíly jsou významné ve vlastnostech, které **jsou závislé na orientaci krystalů** (*anizotropii*). **Anizotropie** se v kovových sklech totiž **neuplatňuje**, což je jejich velkou výhodou. Kovová skla také vykazují **vysokou odolnost vůči radiačnímu poškození**.

a) Mechanické vlastnosti kovových skel

Kovová skla vykazují **velmi vysoké hodnoty meze kluzu**, což souvisí s tím, že je v nich velmi nízká pohyblivost *dislokací*, díky jejich **neuspořádanosti** a **absenci skluzových rovin**. Kovová skla jsou sice při **tahovém zatížení** **plasticky nestabilní**; ovšem v **ohybu, smyku a tlaku** snášejí velké plastické deformace.

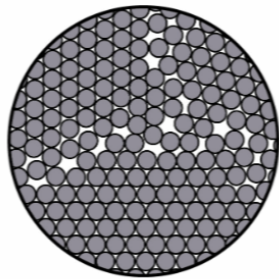
b) Korozní vlastnosti kovových skel

Kovová skla jsou charakteristická **extrémně vysokou odolností proti korozi** (i v porovnání s *nerezovou ocelí*). Na jejich povrchu se vytváří **homogenní ochranný oxidický film**, který je velmi odolný vůči účinkům koroze. Jejich korozní odolnost také souvisí s **nepřítomností hranic zrn**, které u běžných kovů podporují korozi.



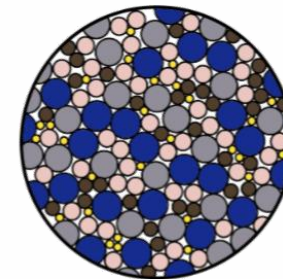
c) Magnetické vlastnosti kovových skel

U konvenčních materiálů je dosahováno vyšší účinnosti magnetizace **snížením hustoty dislokací**, což vede ke **snížení pevnostních vlastností**. Oproti tomu, kovová skla v sobě spojují **výborné pevnostní charakteristiky** i **snadnou magnetizaci**. Ta je dána **vysokou mobilitou stěn magnetických domén** – díky nepřítomnosti **překážek bránících jejich pohybu** (jako jsou *hranice zrn*). Kovová skla mají vysokou **izotropii vlastností** a díky jejich **vysokému el. odporu** efektivně **snižují ztráty vířivými proudy**.



Most Metals

- Polycrystalline grains of varying shapes and sizes.
- Misaligned planes of atoms slip past each other easily, absorbing energy and allowing dislocations to move, making deformation permanent.
- Grain boundaries represent weak spots of less than optimal atomic packing, where fractures can form and corrosion starts.



Metallic Glass

- Cooled faster than atoms can rearrange into a crystal.
- Dislocation movement obstructed so absorbs less energy and rebounds elastically to its initial shape.
- Resistant to corrosion and wear.
- Slow heat conduction limits casting thickness.

13.3.2 Výroba kovových skel

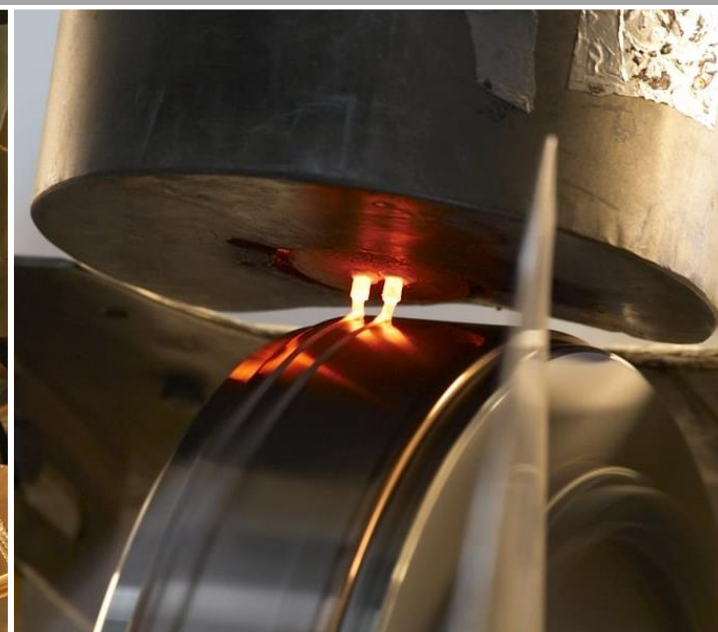
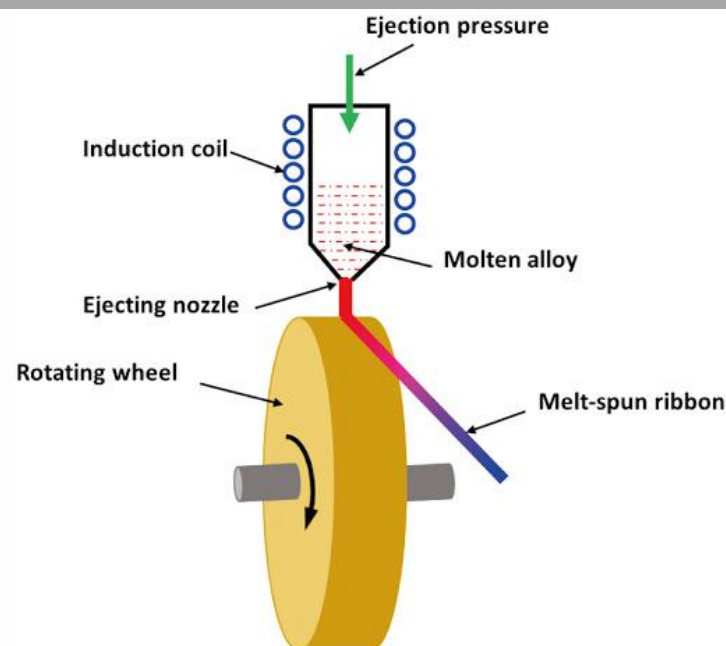
Společným prvkem všech technologií výroby kovových skel je **dosažení velké rychlosti ochlazování taveniny**, tzv. **rychlé solidifikace** (RSP – *Rapid Solidification Processing*, RST – *Rapid Solidification Technology*).

Při překročení určité úrovně rychlosti ochlazování nemá tavenina **dostatek času k tvorbě krystalické struktury** => kov si zachová (amorfní) strukturu taveniny a **vznikají kovová skla** (*amorfní, mikrokrytalické kovy*). Rychlost chlazení se pohybuje v rozmezí 10^4 až 10^6 °C·s⁻¹, přičemž při konvenčním chlazení je v rozmezí 10^3 až 10 °C·s⁻¹.

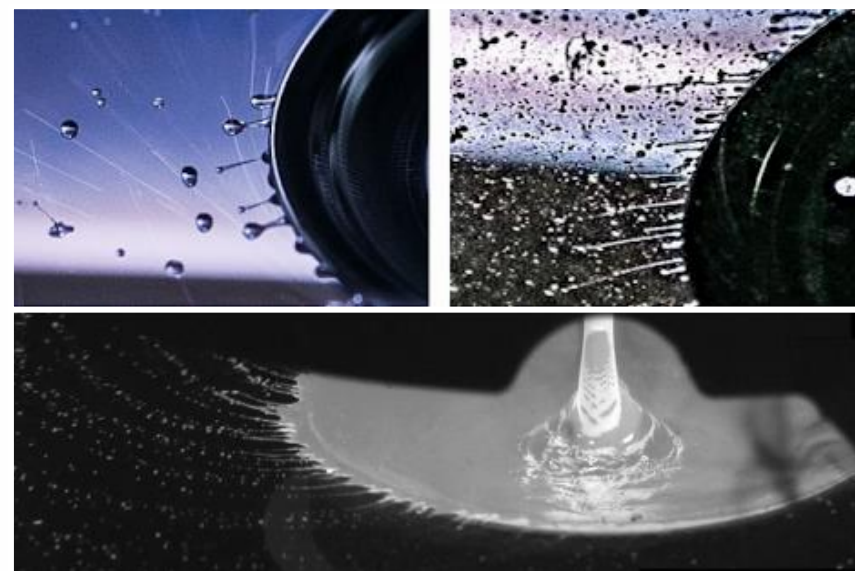
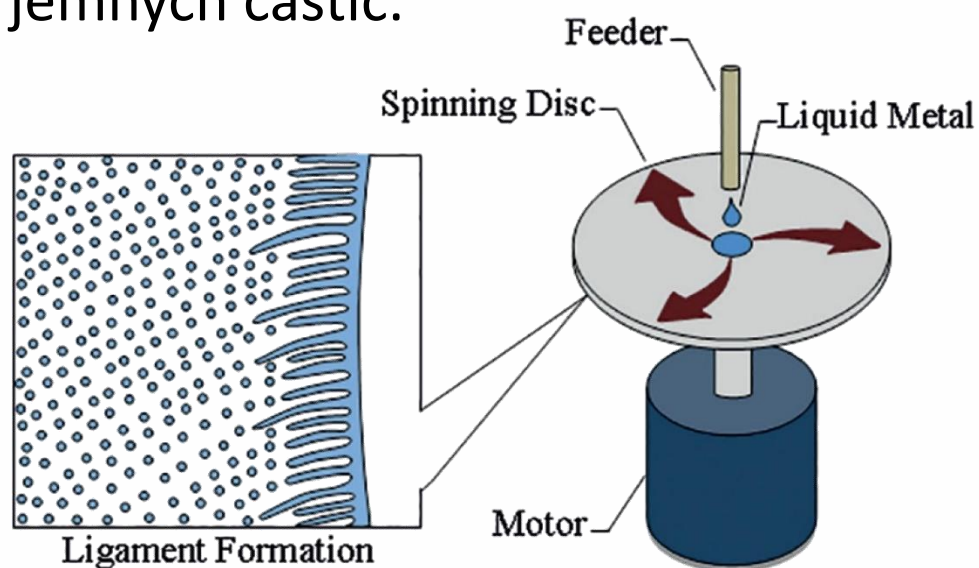
V současnosti se můžeme setkat s těmito technologiemi:

- 1) Výroba tenkých pásků (*Melt Spinning*)** – velmi tenký pásek vznikající při styku roztaveného kovu s **chlazeným, rychle rotujícím měděným bubnem**. Obvodová rychlost bubnu ≈ 100 km·h⁻¹, pásek tloušťky do 80 μm, šířka pásku 1 až 150 mm.

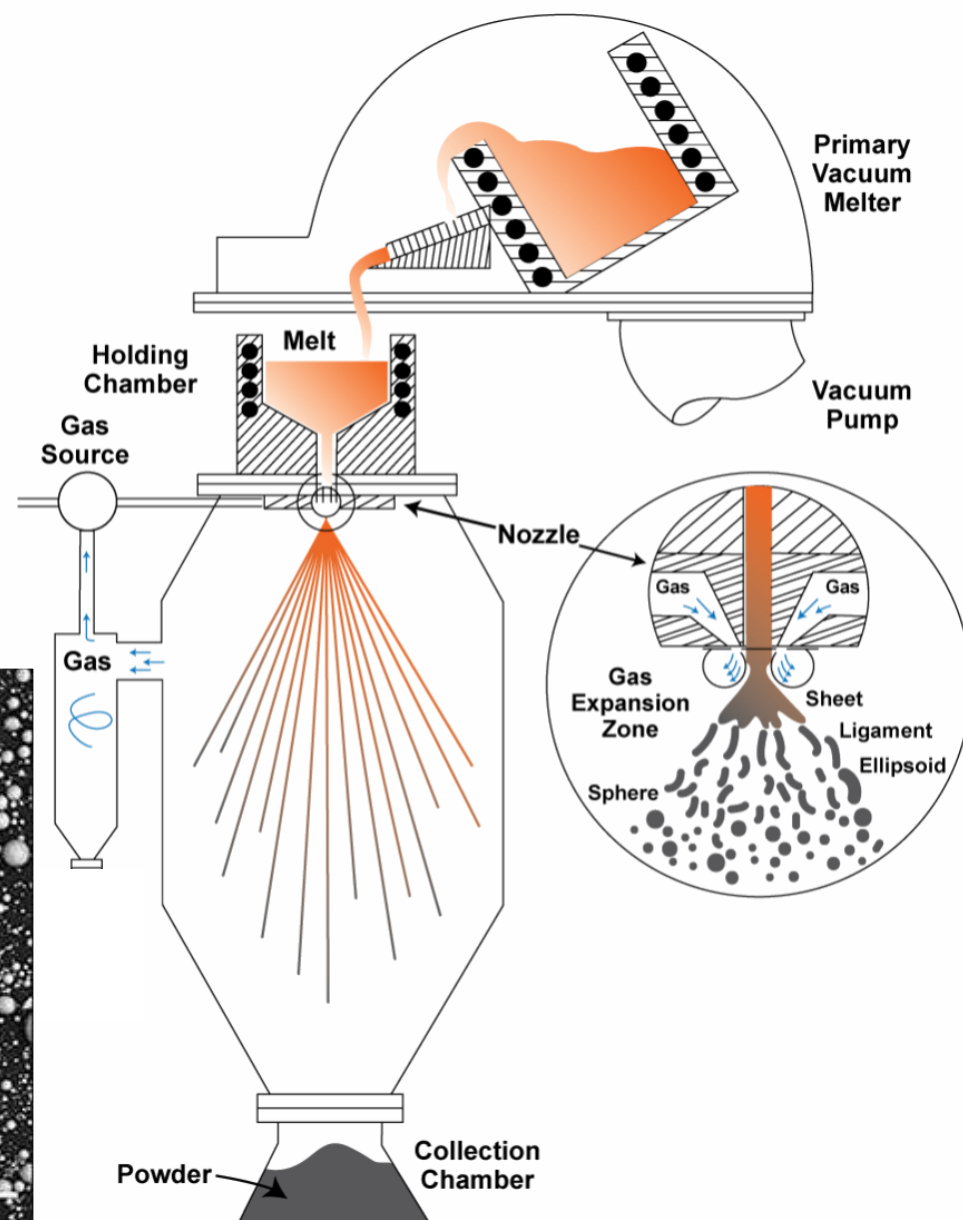
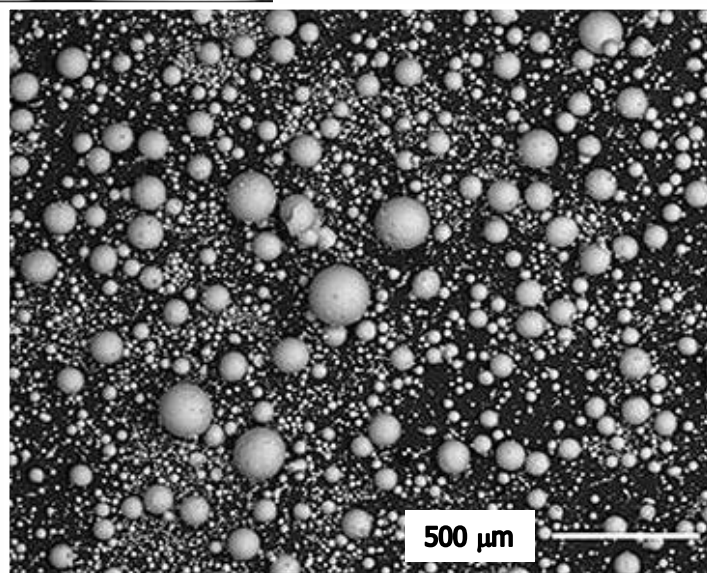
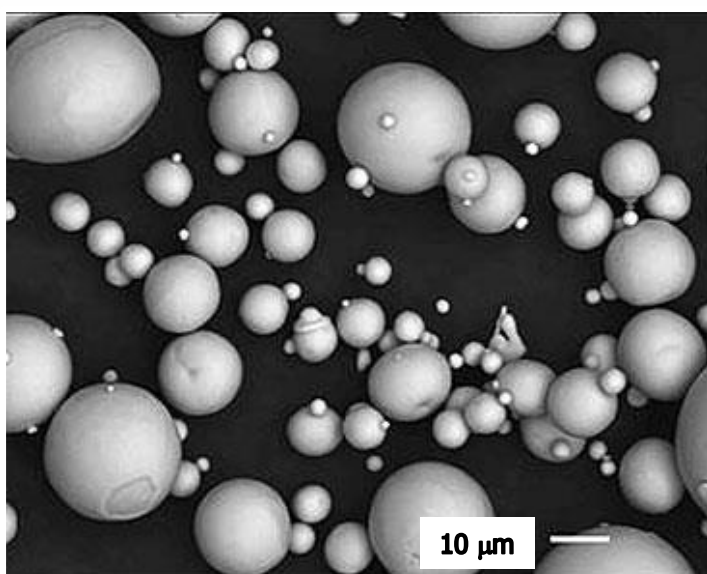




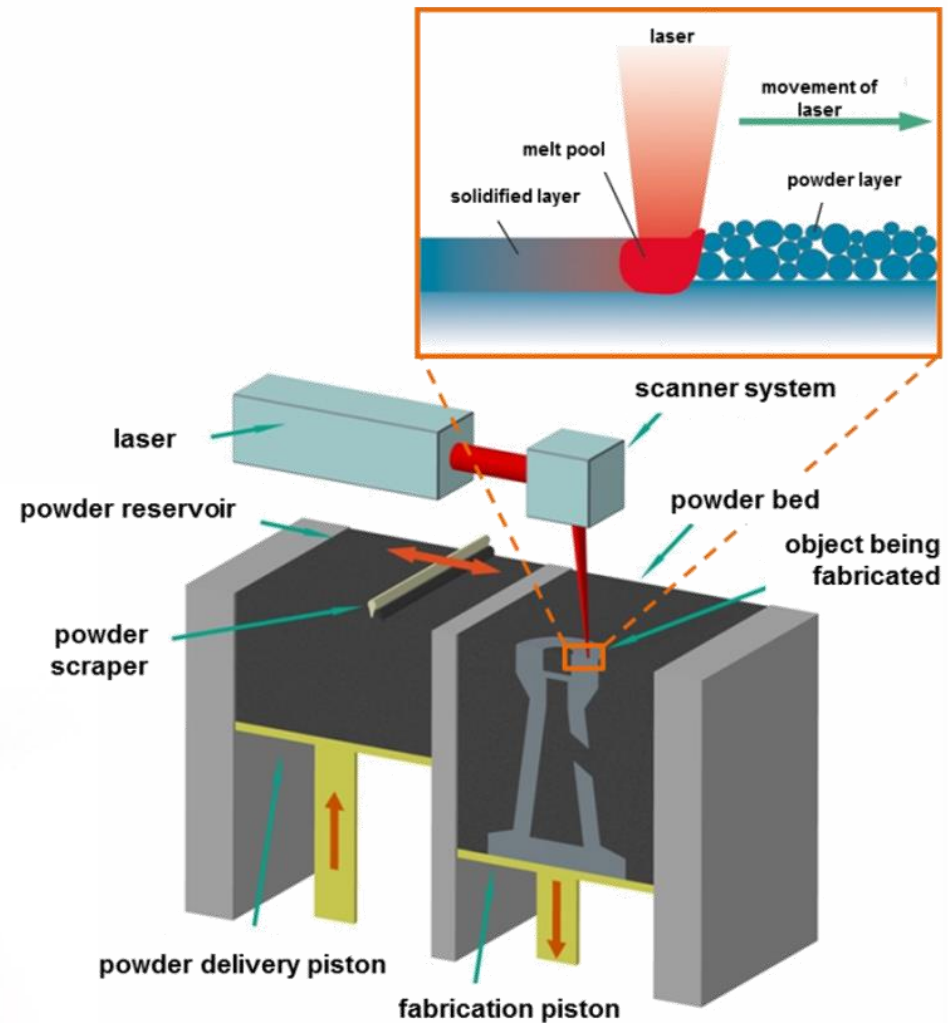
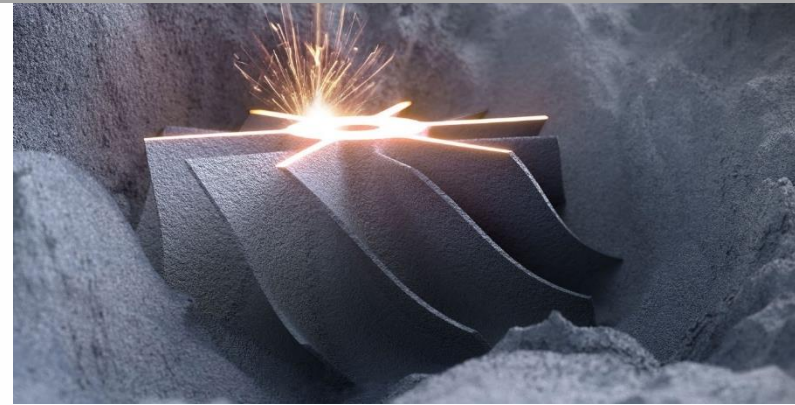
2) Rozstříkování taveniny rotujícím diskem (Rotating Disk Atomization) – tavenina je rozstříkována při dopadu na rotující disk za vzniku velmi jemných částic.



3) Atomizace částic kovu (Vacuum Gas Atomization) – technika umožňující „atomizaci“ částic kovu pomocí rychle přiváděného proudu inertního plynu. Vznikají velmi jemné částice.



4) Laserové tavení (Selective Laser Melting) – rychlé ochlazování tenké povrchově (laserově) natavené vrstvy zpracovávaného materiálu. Ve spojení s aditivní výrobou lze tímto způsobem zpracovávat i objemnější výrobky.



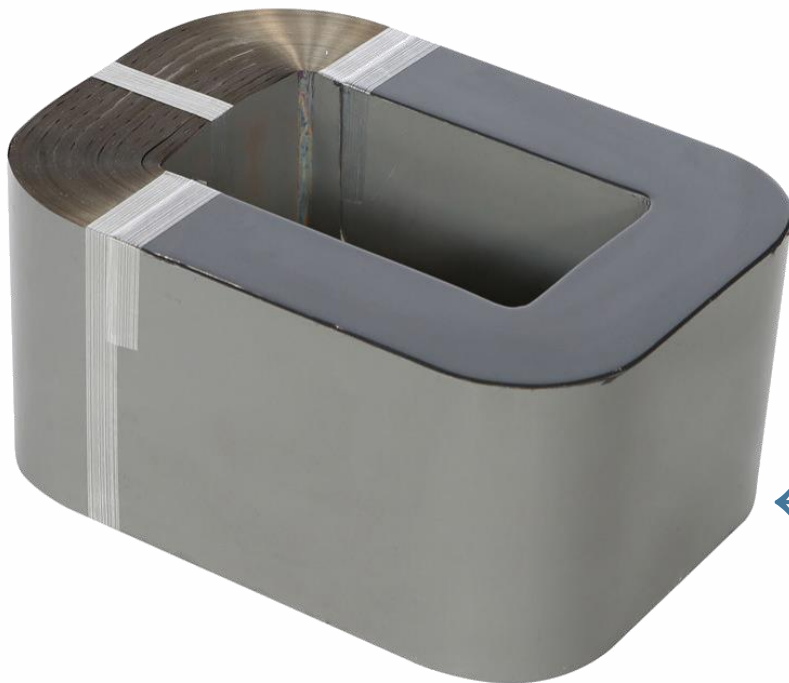
13.3.3 Typičtí zástupci kovových skel

Kovová skla jsou **slitiny kovů** (*mangan, železo, kobalt, nikl, platina, molybden,...*) a **metaloidů** (polokovů), tedy prvků, které mají **některé vlastnosti kovů i nekovů** a je tedy obtížné klasifikovat je buď jako kov nebo nekov (např. *bor, uhlík, dusík, křemík, fosfor,...*).

K přemagnetování kovového skla stačí magnetické pole o intenzitě cca pouze $3 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-1}$ (stejně jako u špičkových *permalloyů*) a to díky **nepřítomnosti hranic zrn**.

Složení	B_s (T)	H_c ($\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$)	μ_{max}
$\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$	1,8	6,4	$1 \cdot 10^5$
$\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$	0,5	0,8	$4 \cdot 10^5$
$\text{Co}_{74}\text{Fe}_6\text{B}_{20}$	1,2	3,0	$3 \cdot 10^5$

↑ Vlastnosti některých kovových skel



← Jádru transformátoru z amorfního kovu

13.3.4 Použití kovových skel

Oproti *křemíkové oceli* mají kovová skla až **5krát větší rezistivitu**, a tedy **nižší ztráty vířivými proudy**. Proto se mohou použít (i) ke **konstrukci jader transformátorů**, (ii) k výrobě vysoce **kvalitních a levných snímacích hlav** pro mg. záznam či (iii) na **miniaturní mikrofony** apod. Zajímavé je jejich využití pro **magnetické stínění**, kdy se úzké pásy tkají do širokých pásků, na které se nanáší epoxidová vrstva.

V případě jejich využití pro **konstrukci transformátorů** je jejich nevýhodou **omezená časová a teplotní stabilita** (časem mohou přecházet zpět do krystalického stavu) => nesmí být vystaveny ohřevu nad **kritickou teplotu** (cca 0,4 až 0,8 násobek teploty počátku krystalizace slitiny).

Porovnání vybraných parametrů pro transformátor 15 kVA s jádrem z křemíkové oceli a z kovového skla ↓

Parametr	Křemíková ocel	Kovové sklo
Proud	2,5 A	0,12 A
Ztráty v železe	112 W	14 W
Ztráty v mědi	210 W	166 W
Ztráty celkové	322 W	180 W
Úspora energie	-	1250 kWh/rok
Teplota	100 °C	70 °C



13.4 Materiály pro fotovoltaické (solární) články

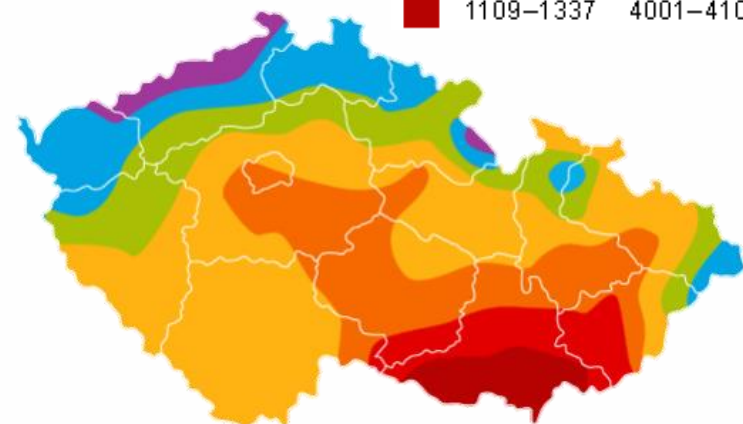
Sluneční (solární) energie patří mezi „**nevyčerpatelné**“ **zdroje energie** a její využití má (pravděpodobně) **minimální dopady na životní prostředí** (krátká zkušenost s recyklací solárních panelů). Množství využitelné energie závisí na **klimatických podmínkách** jednotlivých částí zemského povrchu.

V ČR jsou **relativně dobré podmínky** pro využití energie Slunce. Nicméně, intenzita dopadajícího světelného toku v průběhu roku **kolísá** a jeho **největší množství** je k dispozici v období, kdy je **spotřeba nejnižší**.

Ročně dopadá kolmo na 1 m² plochy 800 až 1250 kWh solární energie. V období **od dubna do října** je to **75 %** energie a v období **od října do dubna** **25 %** energie.



	kWh/m ²	MJ/m ²
	940–970	3401–3500
	971–998	3501–3600
	998–1026	3601–3700
	1026–1054	3701–3800
	1054–1082	3801–3900
	1082–1109	3901–4000
	1109–1337	4001–4100

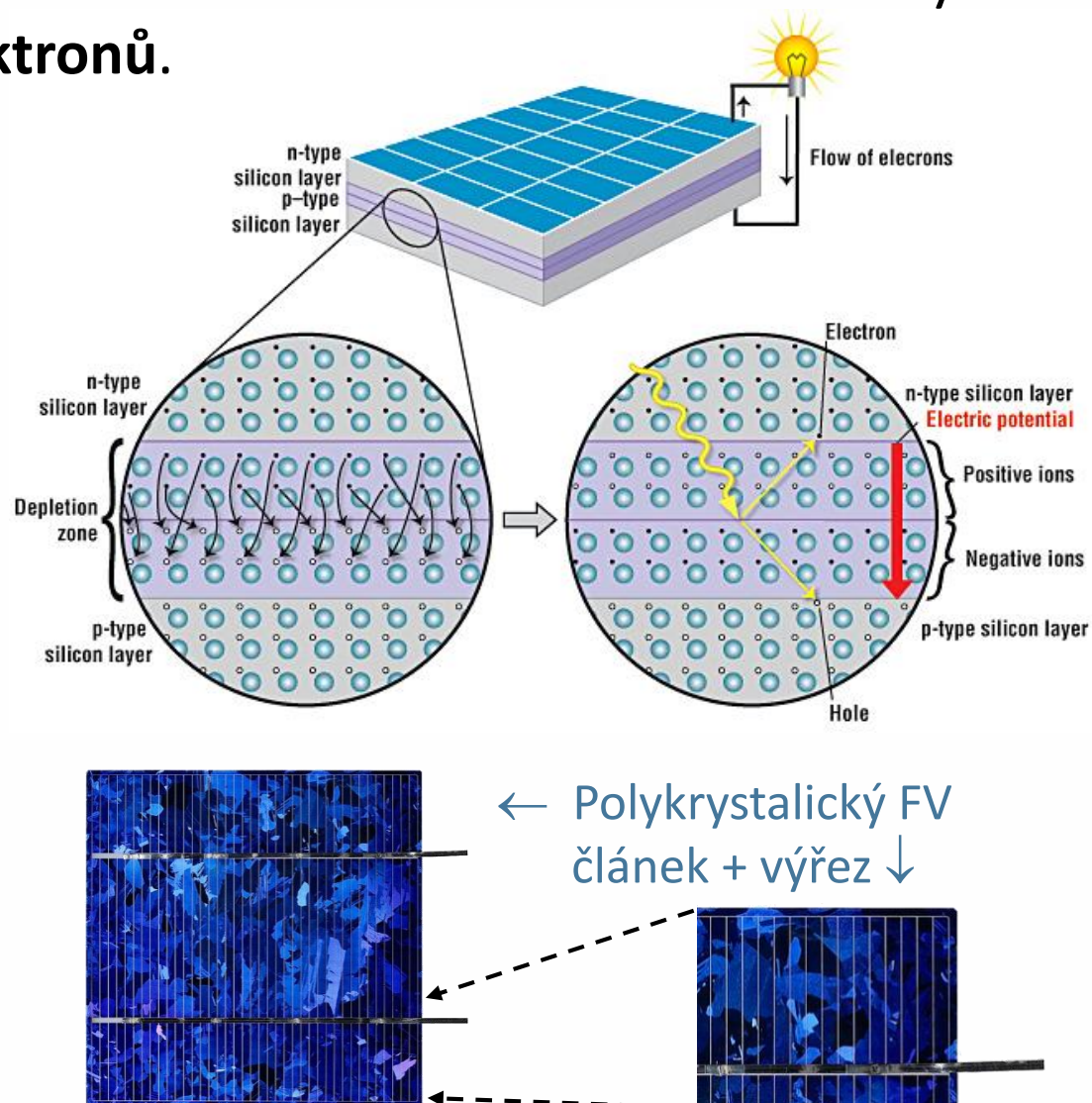


13.4.1 Princip přeměny světla na elektrickou energii

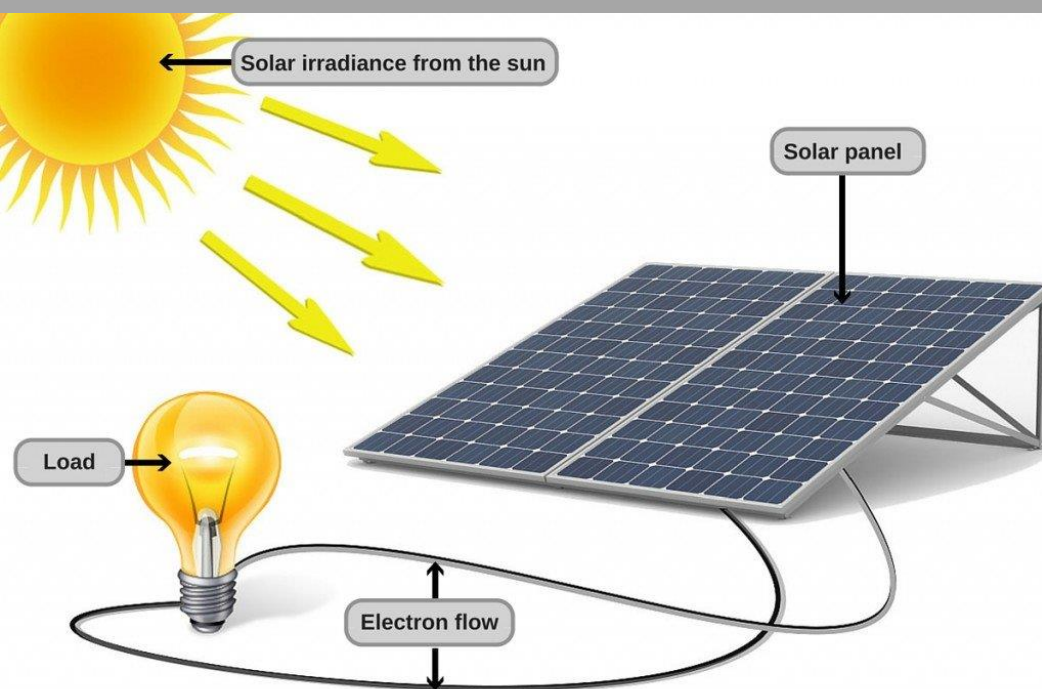
Světelnou energii je možno přeměnit na elektrickou pomocí **fotovoltaického (solárního) článku** pracujícího na principu **fotovoltaického (FV) jevu**, při kterém dochází vzájemným působením slunečního záření a hmoty k **pohlcování fotonů a uvolňování elektronů**.

Základem fotovoltaického článku je **PN přechod** tvořený (typicky) **dvěma vrstvami křemíku**.

Vrchní vrstva křemíkového plátku je sycena obvykle **fosforem (polovodič typu N)** a spodní strana je potištěna mřížkou **stříbra (Ag)** s příměsí **hliníku (Al)**. **Hliník** v průběhu výrobního procesu pronikne do křemíkového plátku a **vytvoří vrstvu P (polovodič typu P)**.



13.4 Materiály pro fotovoltaické (solární) články



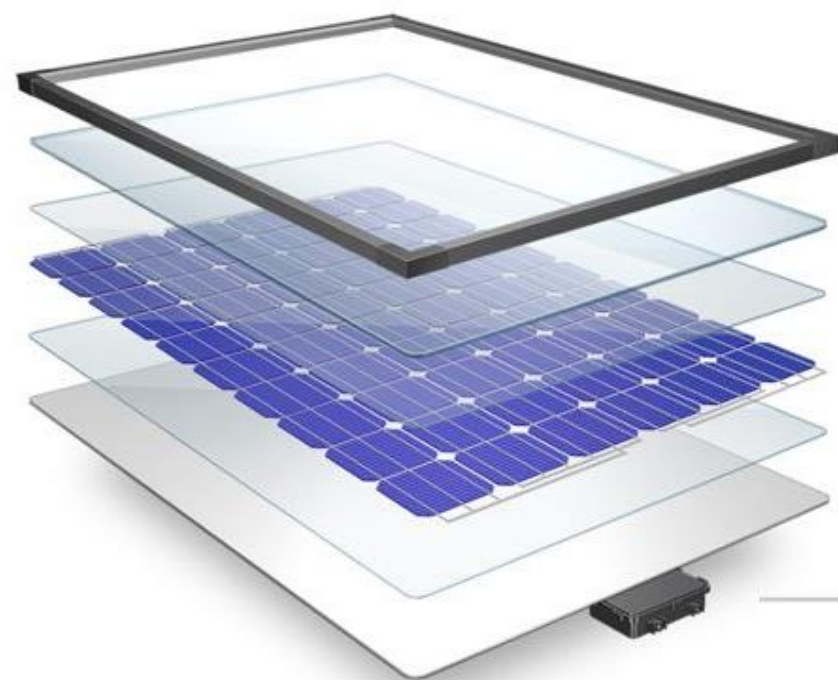
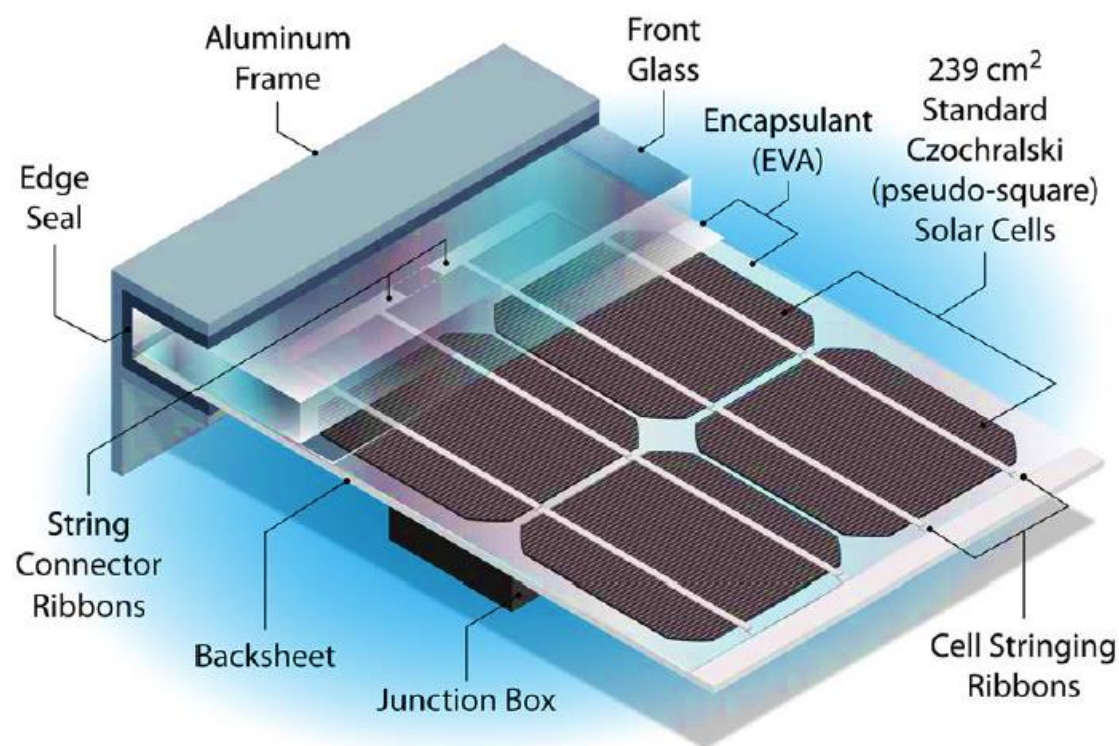
Vzniklý PN přechod **zabraňuje přenosu volných** (přebytečných) elektronů z *horní vrstvy N* přímo do *dolní vrstvy P* – tvoří tedy **elektrickou bariéru**, díky které se **hromadí volné elektrony v horní vrstvě N** a vytváří el. potenciál o napětí cca **0,6 V** na jeden solární článek.

Po připojení elektrického obvodu na kontaktní plošky, začnou **elektrony procházet vodičem z horní vrstvy**, kde je jich přebytek, **do vrstvy spodní**, kde je jich méně a tak se **celý el. obvod uzavírá**.



13.4.2 Konstrukce fotovoltaického (solárního) panelu

Základní stavební jednotkou **fotovoltaického panelu** jsou jednotlivé **fotovoltaické články**, které se kompletují do tzv. **modulů**. Jejich uspořádání je buď *paralelní*, nebo *sériové* v závislosti na požadovaných elektrických parametrech.



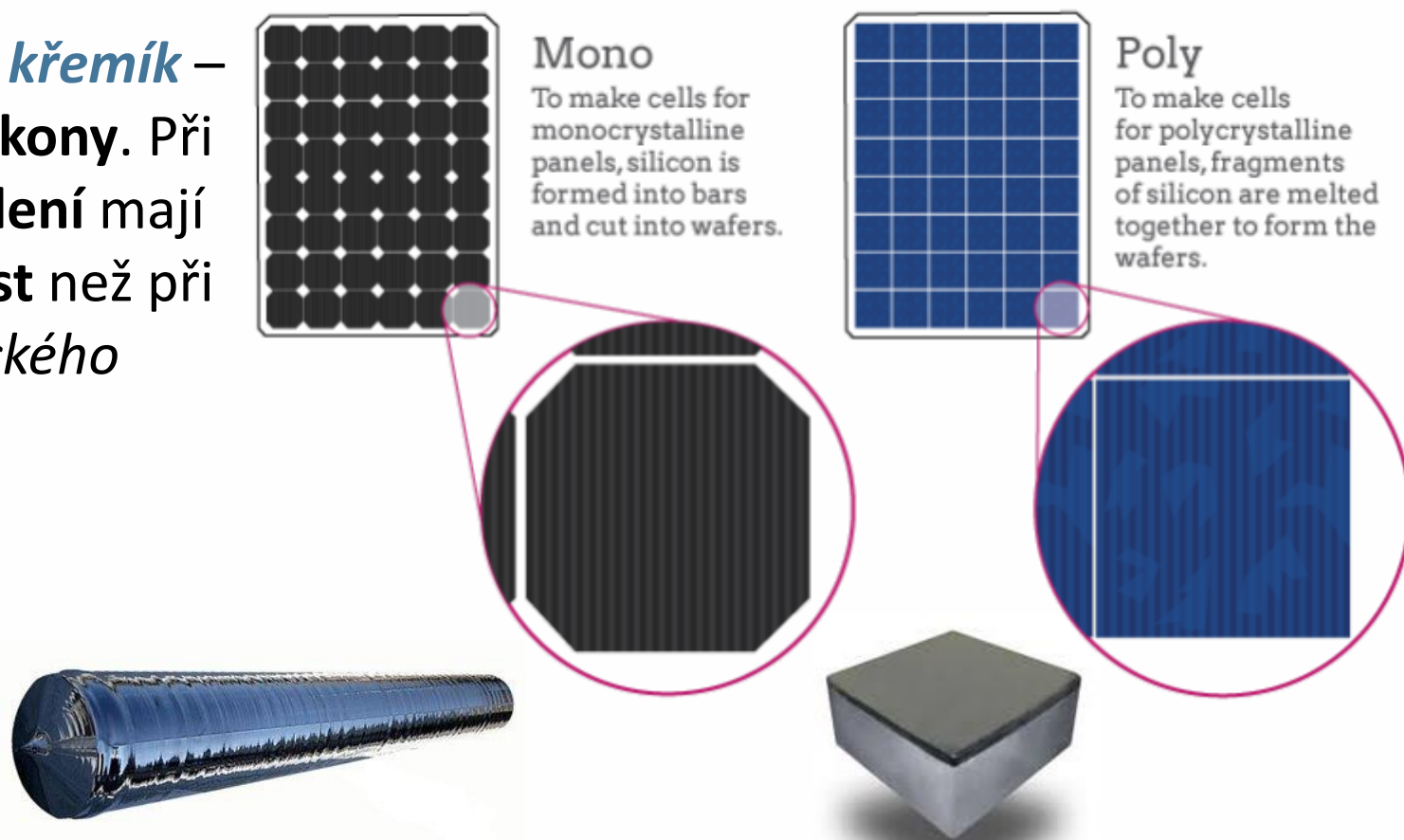
13.4.3 Materiály pro fotovoltaické články

Historicky nejstarším a v současnosti stále ještě nejpoužívanějším materiálem pro konstrukci FV článků je **křemík** v jeho různých podobách.

Mezi **základní materiály** pro fotovoltaické články řadíme:

1) Polykrystalický a **amorfní křemík** – vhodné pro **menší výkony**, jejich hlavní výhodou je **poměrně dobrá účinnost** i při **nižších hladinách osvětlení**.

2) Monokrystalický křemík – vhodný pro **větší výkony**. Při **dostatečném osvětlení** mají články **vyšší účinnost** než při použití **polykrystalického křemíku**.



3) Arsenid galia (*GaAs*) – jeho hlavní výhodou je **vyšší účinnost** ($\div 20 \%$), **větší odolnost proti kosmickému záření** a schopnost pracovat bez snížení efektivity i při **teplotách nad $100\text{ }^{\circ}\text{C}$** . Mezi nevýhody patří **mnohem vyšší cena** a **větší hustota *GaAs*** oproti krystalickému křemíku.

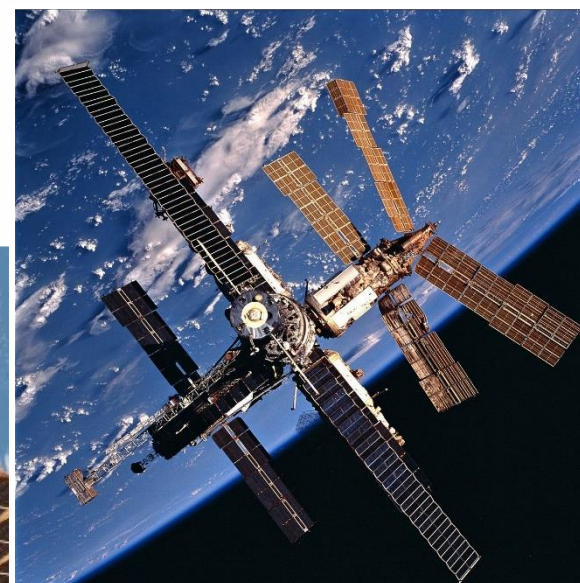
V současnosti jsou vyvíjeny **kombinace *Si*** a ***GaAs* článků**, protože oba materiály mají odlišnou spektrální citlivost – **křemíkové články** využívají oblast viditelného světla hlavně **směrem k modré barvě** a **články *GaAs*** oblast **směrem k červené barvě**. Vhodnou kombinací obou typů lze dosáhnout **účinnosti až 30%** .

Ve spojení se **solárními koncentrátory** (*koncentrovaná fotovoltaika*) se očekává dosažení **ještě vyšší účinnosti**.



4) Sulfid kademnatý (CdS) – články tvořené přechodem Cu_2S a CdS dosahují účinnosti **10 %**. Jejich výhodou je **malá hmotnost**, díky čemuž se používaly pro **vesmírné aplikace**. Nevýhodou je **malá stabilita** těchto článků.

Od 90tých let se pro vesmírné aplikace používají články na bázi $GaAs$, které jsou postupně nahrazovány **vícevrstevnými články** (*Multi-Junction Solar Cells*).



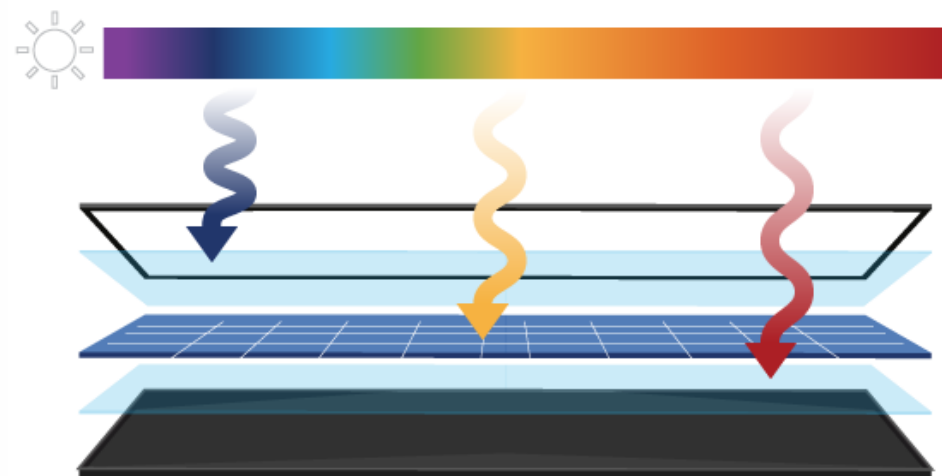
13.4.4 Zlepšování účinnosti fotovoltaických článků

Zlepšování účinnosti fotovoltaických článků jde ruku v ruce s jejich **cenou**. V minulosti bylo dosaženo (při hromadné výrobě) u **monokrystalického křemíku** účinnosti **17 až 18 %** díky: **(i) snížení odrazivosti panelů** (antireflexní vrstvou a speciálním opracováním jejich povrchu); a **(ii) použitím vícevrstevných přechodů** z materiálů se širokým energetickým pásem, které umožňují **účinnější pohlcení světelné energie**.

Polykrystalický křemík (*Multicrystalline Silicon, m-Si*) a články z **amorfního křemíku** (*Amorphous Silicon, a-Si*) dnes dosahují účinnosti **14 až 16 %**. V této oblasti bylo dosaženo nejvyššího pokroku použitím **amorfního karbidu křemíku** (*a-SiC*), u kterého je možno řídit velikost energetického pásu nejenom **dotováním přechodu PN**, ale i **obsahem uhlíku**.

Výrazného zlepšení bylo dosaženo použitím **vícevrstvých článků a-SiC/a-Si** a **hybridních HIT článků** (*Heterojunction with Intrinsic Thin layer*).

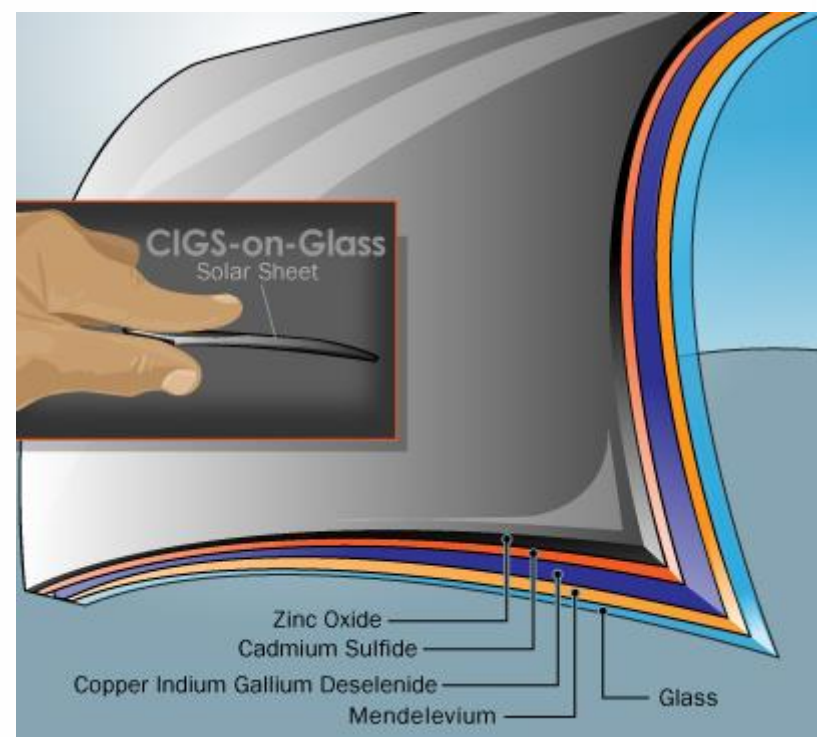
Dále se otevřela cesta pro využití dalších materiálů jako: **a-SiGe**, **mikrokrystalický Si** (*mc-Si*), **a-Si₃N₄** (*nitrid křemičitý*).



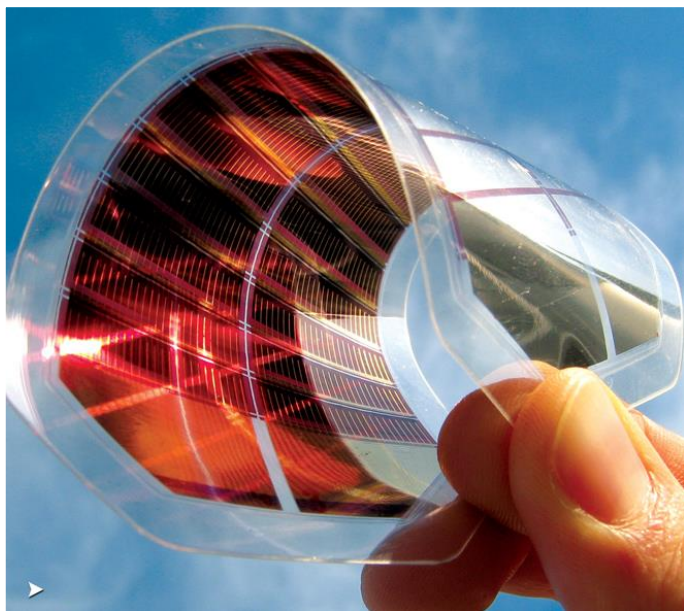
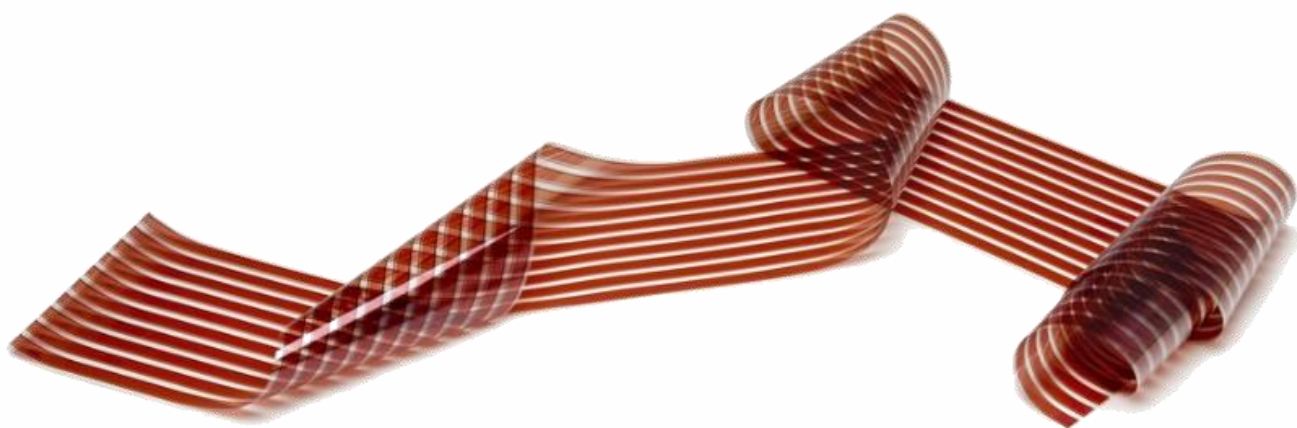
Materiál		Účinnost (%)
a-Si (<i>hromadně vyráběný</i>)		8 - 9
Laboratorně vyráběné	Vícevrstvé články na bázi a-SiC/a-Si	13,4
	Vícevrstvé články na bázi a-Si/a-SiGe	14,3
	a-Si/m-Si (2 vrstvy)	15,04
	a-Si/m-Si (4 vrstvy)	21

Druhou generací fotovoltaických článků jsou souhrnně nazývány **tenkovrstvé fotovoltaické články** (*Thin-Film Solar Cell*) na bázi: (i) **CdTe** (telurid kadmia) – s účinností **9 až 11 %**; (ii) **CIS** (měď, indium, selen), **CIGS** (měď, indium, galium, diselenid) – s účinností **10 až 15 %** (**20 %** v laboratorních podmínkách) a (iii) **amorfního tenkovrstvého křemíku** (*Amorphous Thin-Film Silicon; a-Si, TF-Si*).

Důležitou vlastností těchto článků je jejich **ohebnost** a **možnost nanášení vrstev** třeba na sklo.



Nejnovější skupinou ($\approx$ třetí generací) jsou **organické fotovoltaické články** (s účinností cca **11 %**) spojující **levnou výrobu, dostupnost materiálů** a možnost **nanášení na pružné podklady**. Organické FV články využívají k pohlcení fotonu **molekulární** nebo **polymerní absorbéry**.

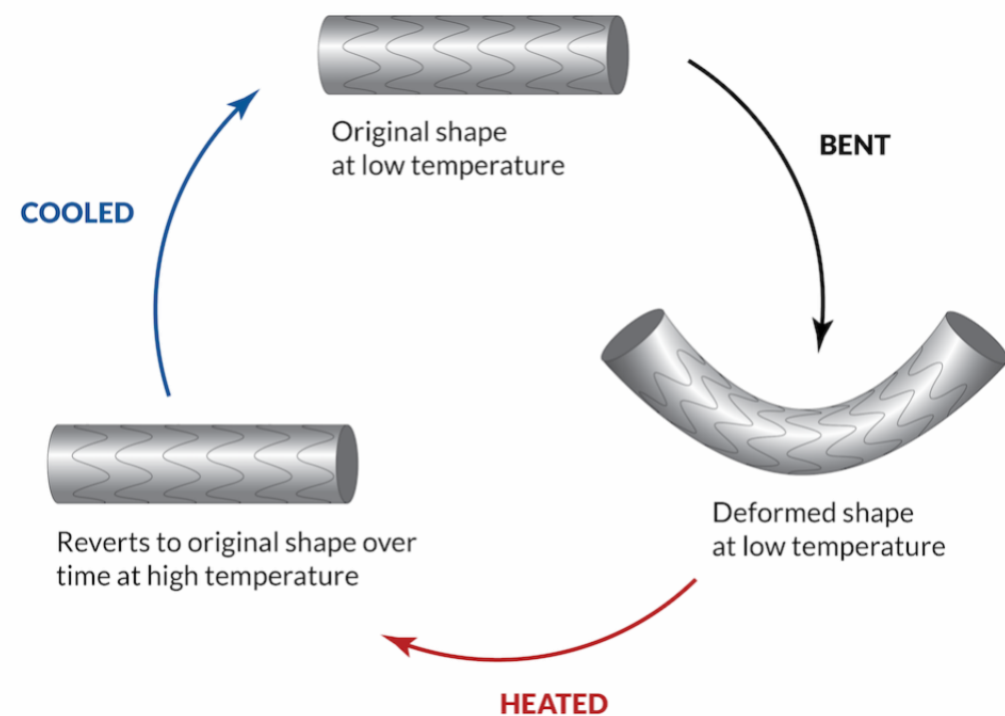
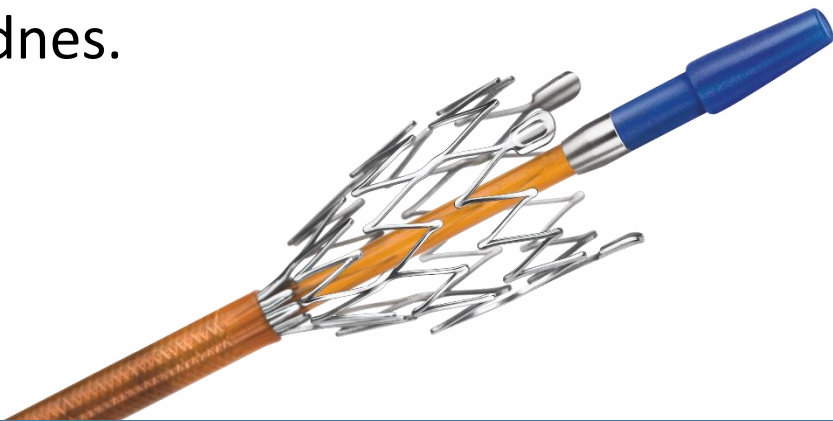


13.5 Kovové materiály s tvarovou pamětí

13.5.1 Co jsou to materiály s tvarovou pamětí?

Tvarová paměť je jev pozorovatelný především u **kovových slitin**, v podstatně menší míře u některých **plastů** a **keramik**. Jedná se o materiály, které si **pamatují svůj původní tvar**. Mohou se různým způsobem tvarovat, ale po zahřátí na určitou **teplotu** se vrátí zpět do své **původní podoby**. K tomuto přechodu dochází na základě jednoduché **změny atomové mřížky** v závislosti na teplotě.

Slitiny s tvarovou pamětí (Shape Memory Alloys – SMAs) nejsou novinkou, ale k jejich praktickému rozšíření dochází ve větší míře až dnes.

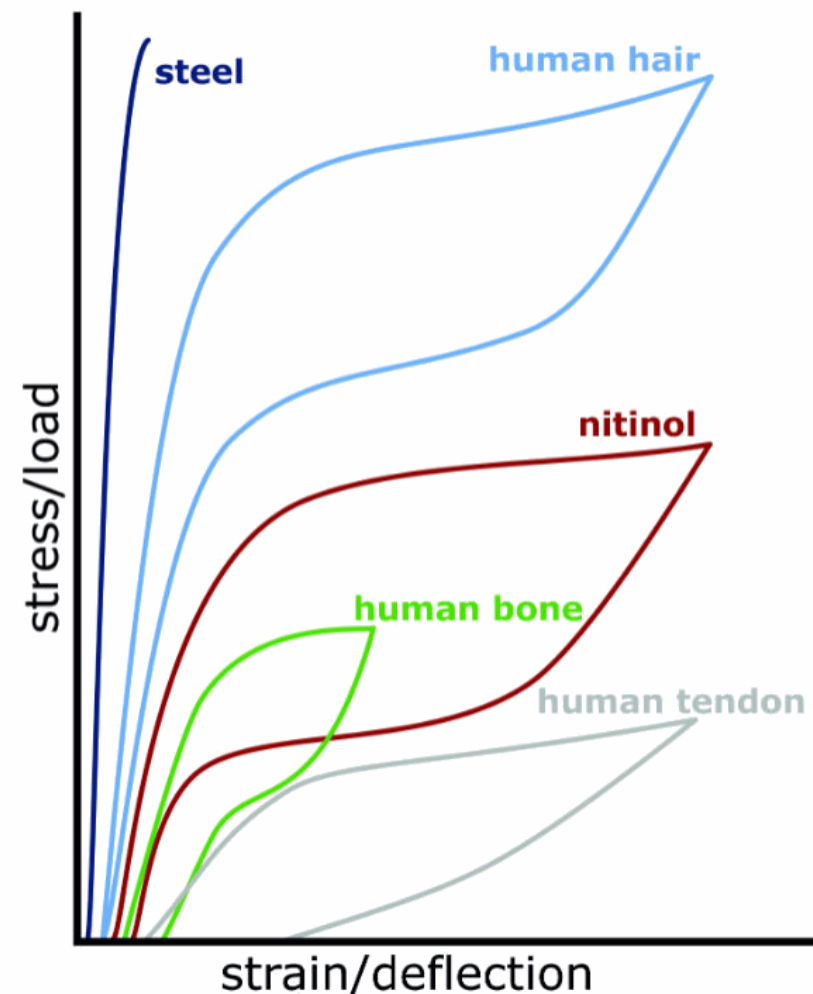


13.5.2 Fyzikální podstata tvarové paměti

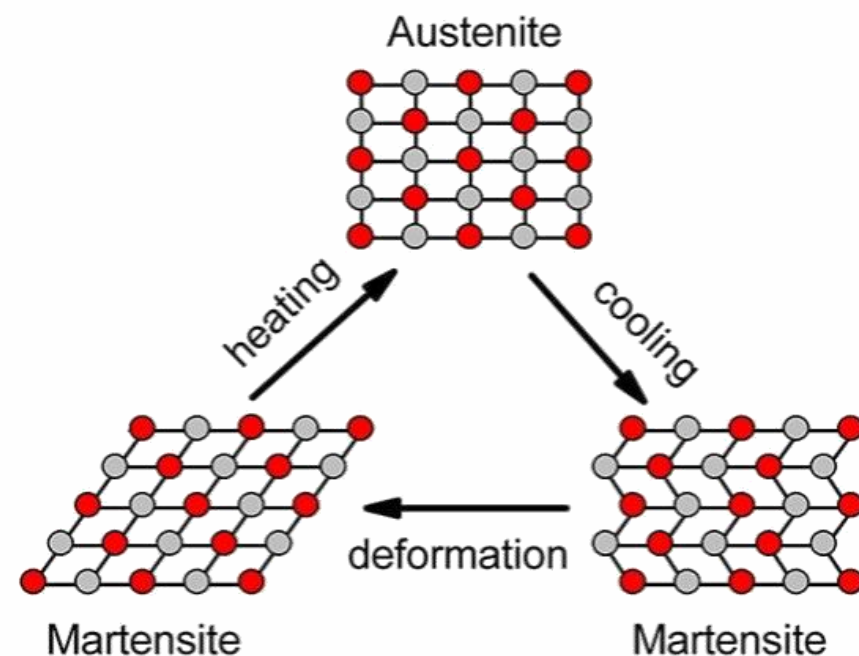
Jev tvarové paměti je způsoben tím, že daný kov **přechází** (při určité teplotě) **z jedné krystalické struktury do jiné** (tzv. **martenzitická transformace**). Slitina se snaží udržet v **energeticky nejvýhodnějším stavu**, a proto se vždy přeorientuje do krystalické mřížky, která je za daných podmínek **energeticky nejúspornější**.

Pokud slitině něco v přechodu brání, dokáže vyvinout **značnou sílu** a **rychlost** (v závislosti na teplotě), aby se dostala do té krystalické struktury, která je pro ni za daných podmínek nejvhodnější.

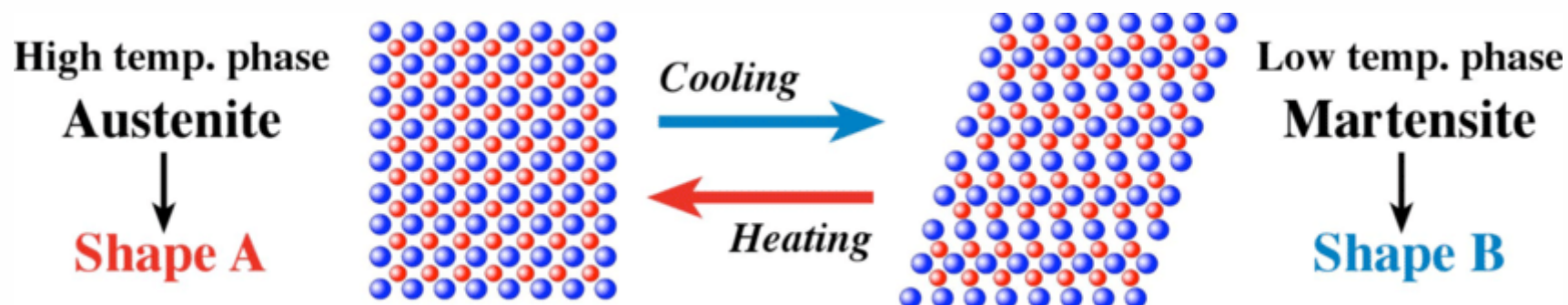
Zajímavou vlastností těchto slitin je jejich **elastická deformace**. Zatímco u běžných kovů vratná (elastická) deformace nepřesahuje **1 %**, u SMAs může plně **vratná deformace dosahovat až 15 %** (označuje se jako tzv. **superelastická**).



Podstatou tvarové paměti je **bezdifúzní fázová transformace** (jev podobný *feromagnetismu*). Krystalická struktura, kterou látka zaujímá **za nižších teplot**, je **martenzit** (má nižší symetrii, mřížka je *ortorombická, tetragonální, monoklinická* apod.) a fáze existující při **vyšší teplotě** je **austenit** (struktura s vysoce symetrickou *kubickou mřížkou*).

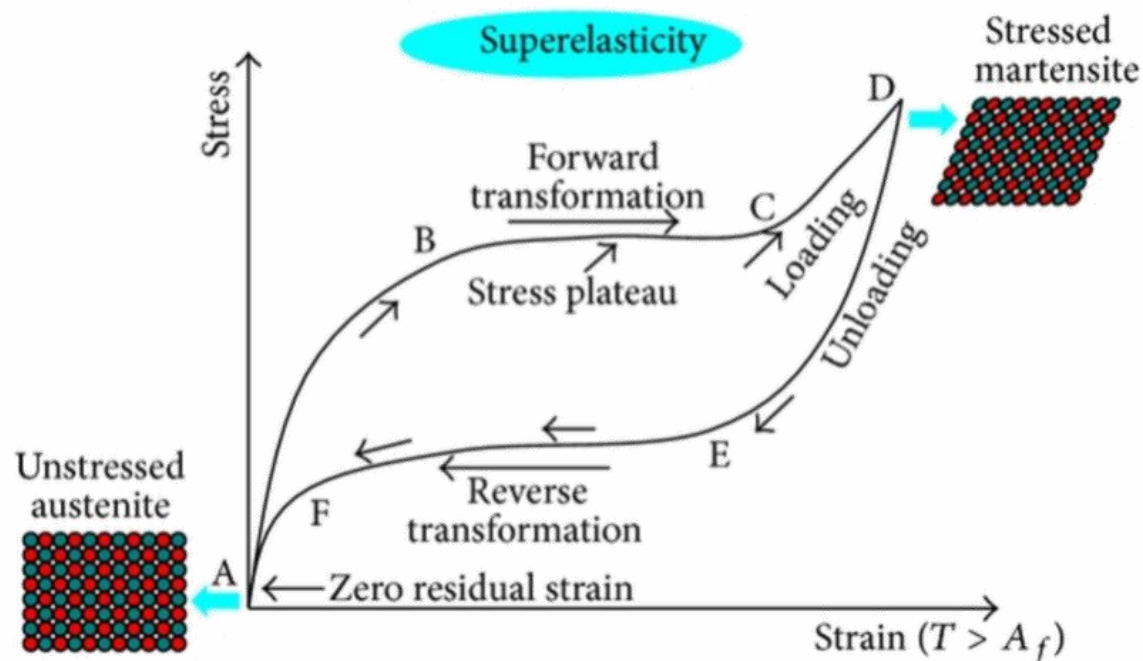


Průběh martenzitické transformace silně závisí na okolních podmínkách jako je **teplota, vnější síly** a u některých slitin i **magnetismus** (např. *Ni-Mn-Ga*). Teploty transformace se mohou pohybovat v širokém rozmezí, např. od teplot **-100 °C do +100 °C** a závisí na **použitých příměsích**.



13.5.3 Charakteristické vlastnosti kovů s tvarovou pamětí

Změna krystalické struktury je příčinou změn **fyzikálních vlastností** SMAs. Charakteristické je jejich **silně hysterezní chování**, tj. jejich vlastnosti jsou během transformace (za stejné teploty) **různé** podle toho, jestli materiál přechází z *austenitu* do *martenzitu* nebo naopak.



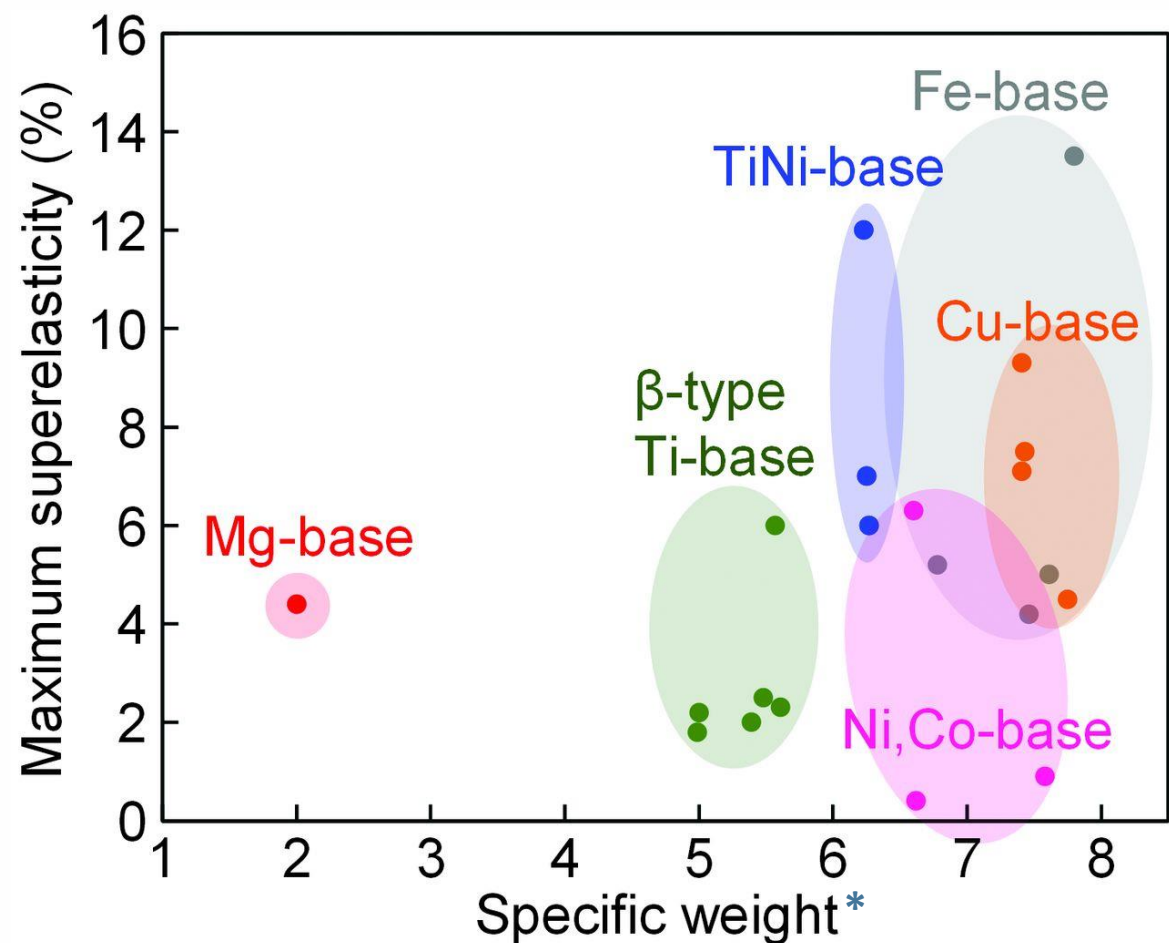
Další zajímavou vlastností SMAs je také téměř **konstantní úroveň napětí, kterou působí na své okolí** – síla, kterou součástka vyvine, je stejná, ať je její prodloužení 1 % nebo 10 %.

Významná je jejich **dobrá odolnost proti korozi** – např. nejpoužívanější slitina **Nitinol** (viz dále) je dobře odolná vůči kyselinám a zásadám, proto se běžně používá v lékařství již více než 20 let. Aby se dosáhlo ještě vyšší odolnosti a životnosti, pokrývá se *Nitinol* vrstvou TiO_2 (oxid titaničitý).

13.5.4 Přehled slitin vykazujících tvarovou paměť

V technických aplikacích jsou zdaleka nejrozšířenější slitiny **NiTi** (50 ÷ 51 % Ni) známé pod již zmíněným obchodním názvem **Nitinol** a to buď **binární** nebo s **příměsí třetího prvku** (Cu, Hf, Nb, Pd...). Vedle nich je však známa celá řada dalších slitin.

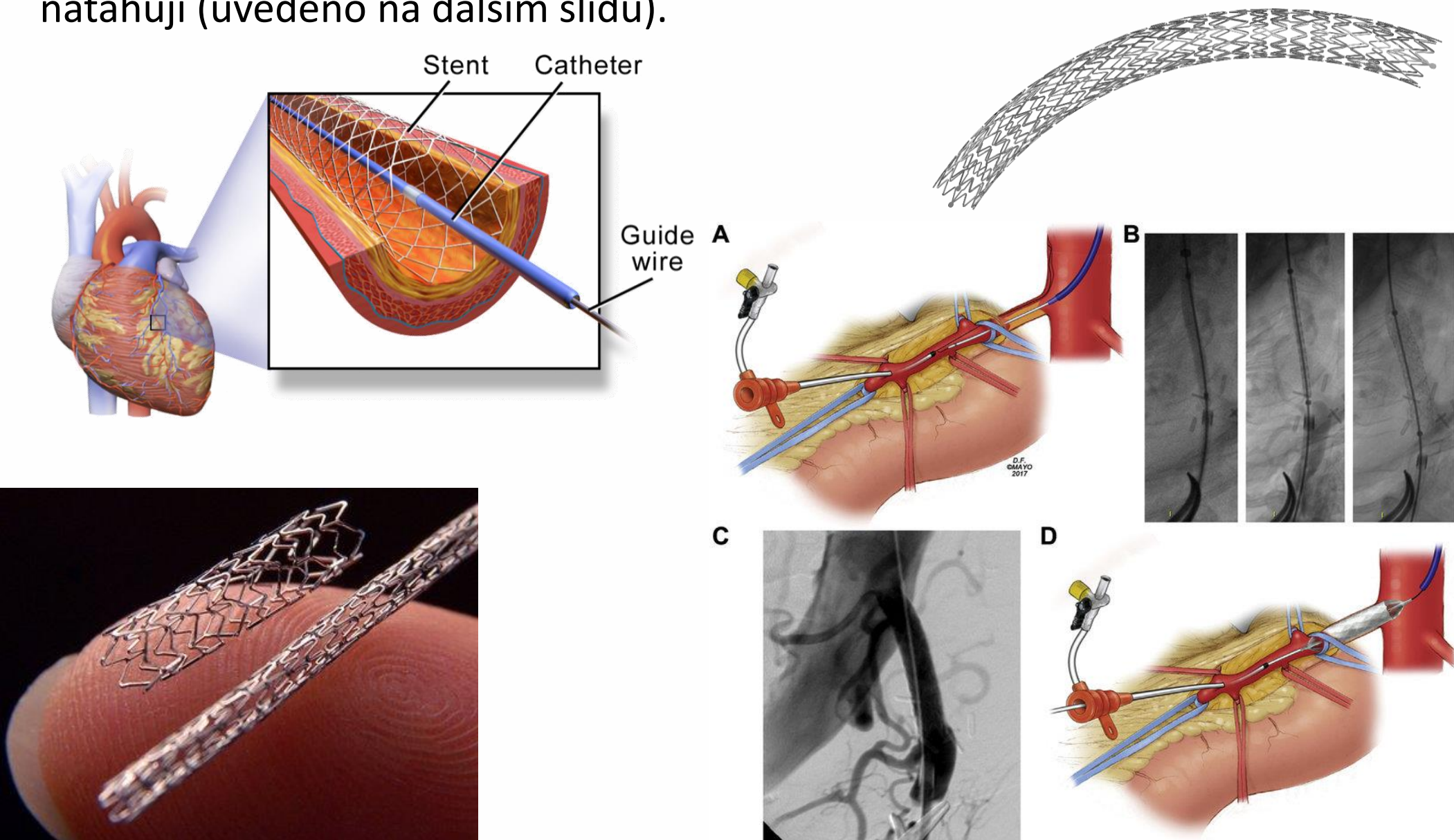
- **Ag-Cd** (44 ÷ 49 % Cd);
- **Au-Cd** (46,5 ÷ 50 % Cd);
- **Cu-Al-Ni**
(14 ÷ 14,5 % Al; 3 ÷ 4,5 % Ni);
- **Cu-Sn** (÷ 15 % Sn);
- **Cu-Zn** (38,5 ÷ 41,5 % Zn);
- **Fe-Pt** (÷ 25 % Pt);
- **Mn-Cu** (5 ÷ 35 % Cu);
- **Fe-Mn-Si**; a mnohé další.



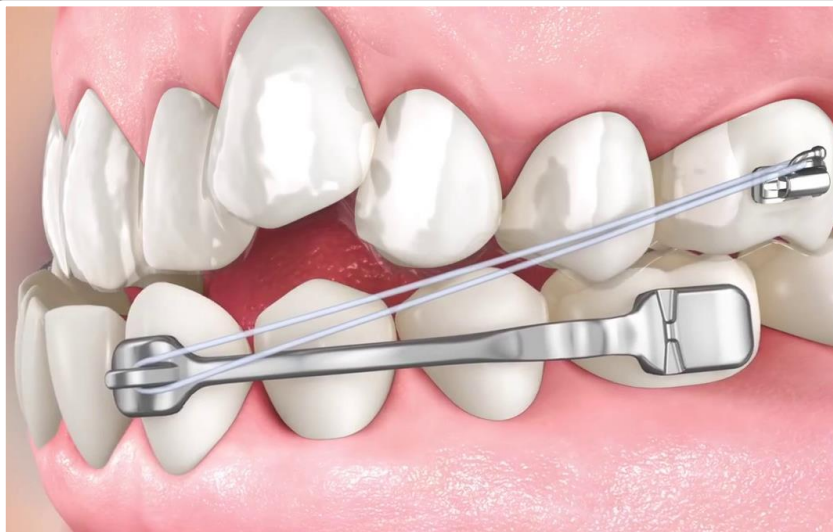
*Specifická hmotnost je v tomto případě dána poměrem hustoty materiálu k hustotě vody.

13.5.5 Příklady využití materiálů s tvarovou pamětí

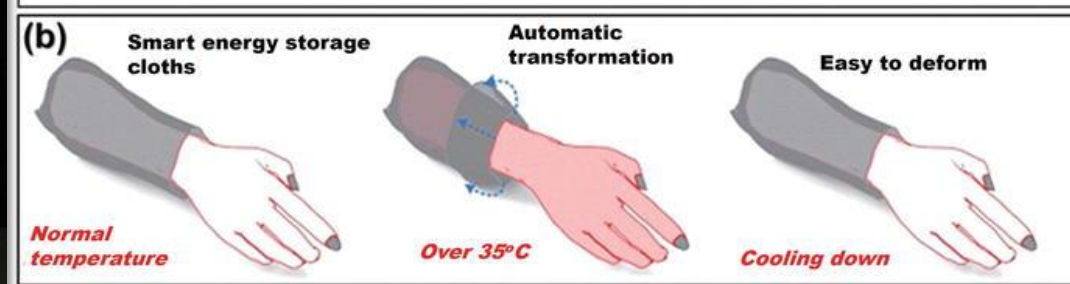
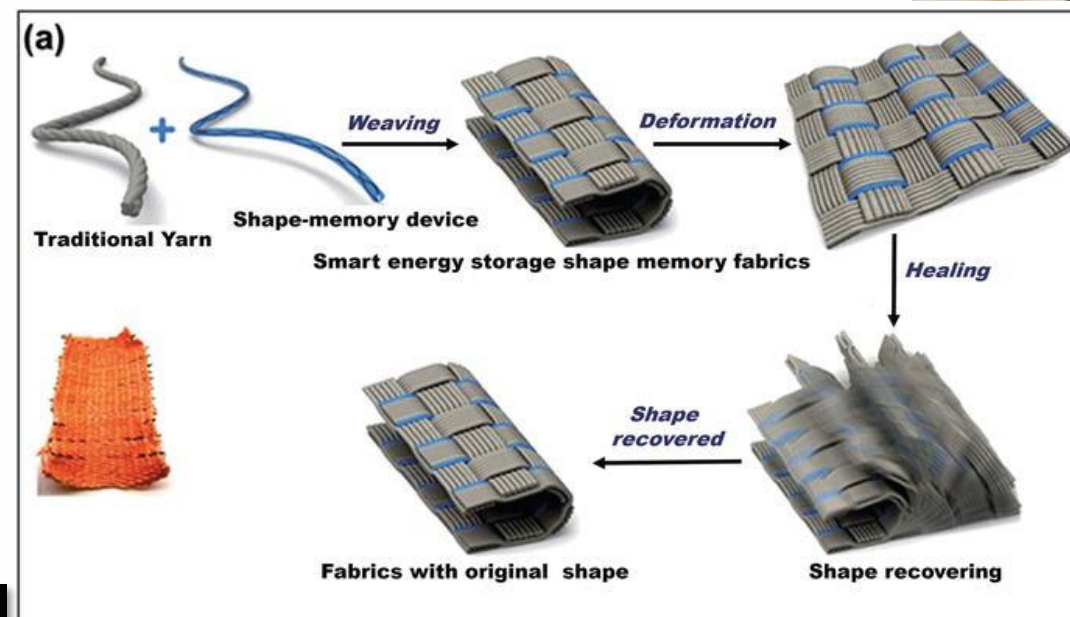
V lékařství: *superelastické stenty* nebo např. *rovnátka*, která se sama natahují (uvedeno na dalším slidu).



13.5 Kovové materiály s tvarovou pamětí

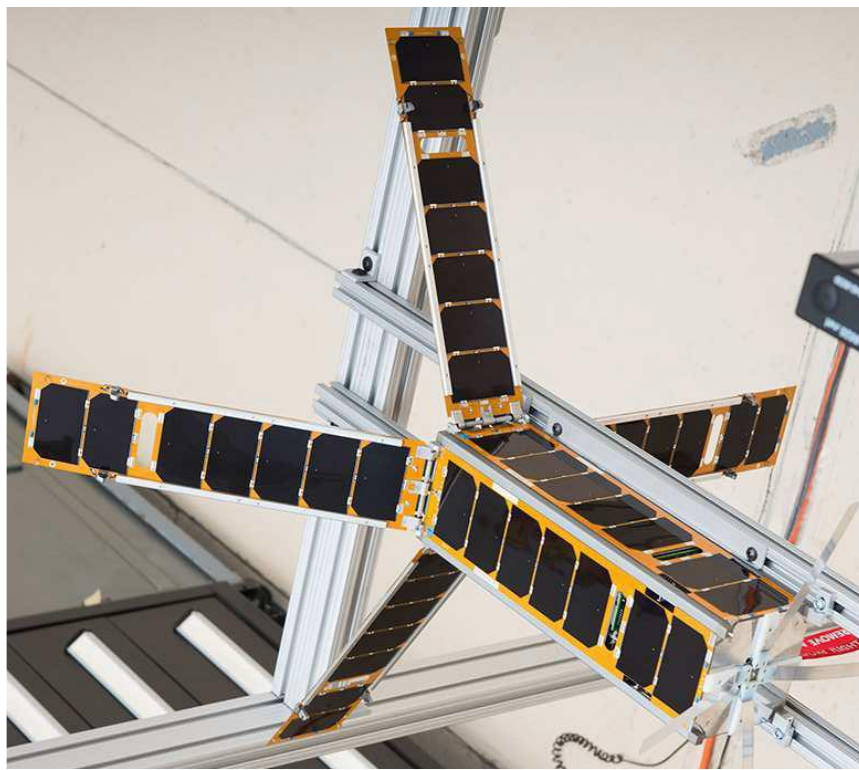


V textilním průmyslu: ↓ →
textil, který se vlivem teploty sám
vyžehlí, změní tvar nebo délku.



Vesmírné aplikace: rozvíjení solárních panelů a antén – podchlazené struktury se vlivem slunečního záření samy rozvinou; testování nového „nezničitelného“ kola pro vozítko *Mars Rover Curiosity* aj.

Současné kolo pro **Mars Rover Curiosity** poškozené provozem ↓.



Nové „nezničitelné“ kolo pro vozítko **Mars Rover Curiosity** vyrobené kombinací 3D tisku a SMAs ↓.

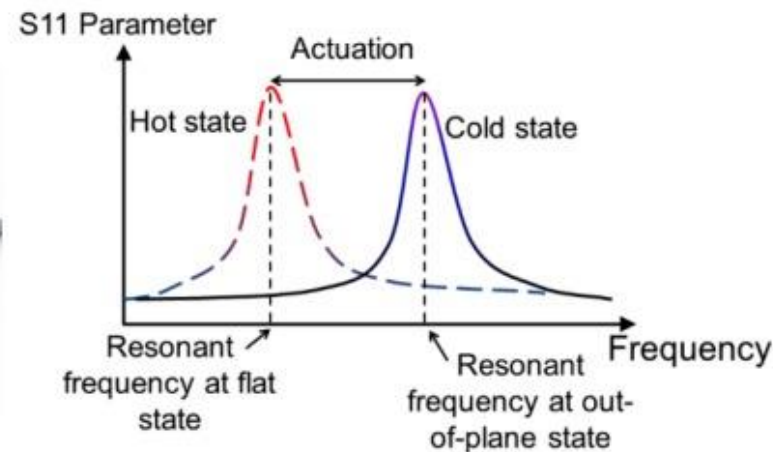
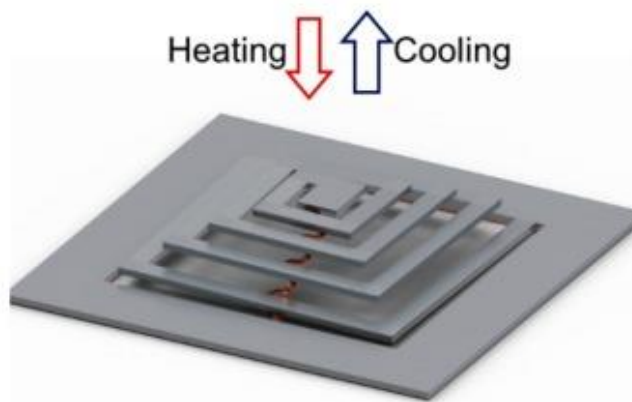


↑ Použití materiálů s tvarovou pamětí v **mikrosatelitu CubeSat** (rozvíjení solárních panelů).

V letectví: tlumicí zařízení v křídlech; velmi odolné spojky potrubí ve stíhačkách (F-14).

V domácnostech: směšovací vodovodní baterie; regulace teploty v kávovarech a klimatizacích.

V elektrotechnice: senzory teploty, aktuátory, mikro-elektro-mechanická zařízení (MEMS), adaptivní kompozitní materiály.



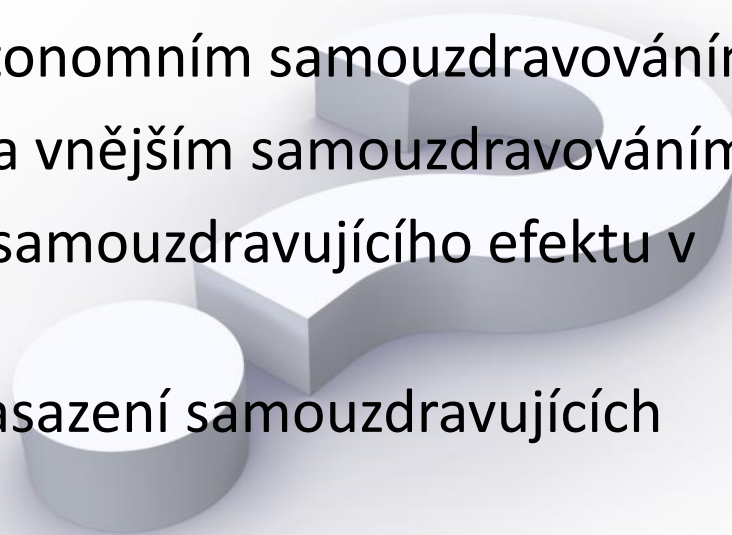
Lineární aktuátor tvořený svazkem *NiTi* drátů pro vyvození spolehlivého lineárního pohybu (např. regulace toku tekutin) ↓.

↑ **SMA mikroaktuátor** umožňující sledovat vertikální pohyb cívky v reálném čase pomocí změn rezonance obvodu (bez potřeby bateriově napájeného senzoru polohy).



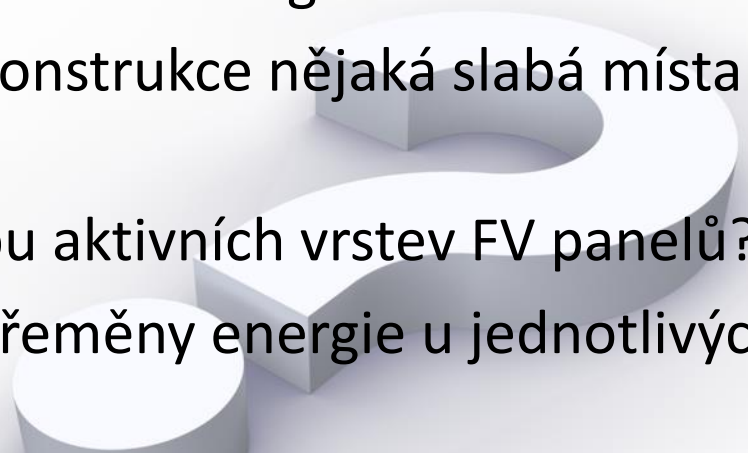
Kontrolní otázky

- Definujte pojem nanomateriál.
- Na co upozornil nositel Nobelovy ceny Richard Feynman?
- Popište některé příklady z přírody, které demonstrují unikátní možnosti nanotechnologií.
- V jakých technických oblastech je možné očekávat velký přínos nanotechnologií? Jmenujte konkrétní příklady.
- Definujte pojem „samouzdravování“.
- Jaký je rozdíl mezi neautonomním a autonomním samouzdravováním?
- Jaký je rozdíl mezi polymery s vnitřním a vnějším samouzdravováním?
- Popište strategie používané k dosažení samouzdravujícího efektu v polymerech.
- Kde je možné uvažovat o technickém nasazení samouzdravujících polymerů/materiálů?
- Definujte pojem magnetické kovové sklo.



Kontrolní otázky

- V čem se liší kovová skla od kovů?
- Jaké jsou vlastnosti kovových skel? Znáte nějakou jejich zásadní nevýhodu?
- Jak se kovová skla vyrábějí?
- V jakých aplikacích (v elektrotechnice) mohou být kovová skla přínosná?
- Popište potenciál využití fotovoltaických (FV) panelů v prostředí ČR.
- Popište princip přeměny světla na elektrickou energii.
- Popište konstrukci FV panelu. Má tato konstrukce nějaká slabá místa z hlediska spolehlivosti?
- Jaké materiály se používaly(jí) pro tvorbu aktivních vrstev FV panelů?
- Jmenujte typické hladiny účinnosti FV přeměny energie u jednotlivých používaných technologií.
- Popište nejnovější trendy v oblasti FV přeměny energie.
- Popište fyzikální podstatu tvarové paměti kovů.



Kontrolní otázky

- Pro jaké jejich typické vlastnosti využíváme kovy s tvarovou pamětí?
- Co je to Nitinol a kde se používá?
- Jmenujte několik zástupců slitin s tvarovou pamětí.
- Co je to superelastická?
- Kde se používají kovové materiály s tvarovou pamětí?

