

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239



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

 ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Katedra elektrotechniky

1



Západočeská univerzita v Plzni
Katedra materiálů a technologií

1.

**Elektrotechnické materiály
KET/ELTM**

Ing. Robert Vik, Ph.D.

 FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI

EK 410, rvik@fel.zcu.cz

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

 ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Katedra elektrotechniky

2

Požadavky na předmět

Zápočet

- absolvování laboratorních cvičení
- vypracování elaborátů
- 2 průběžné testy

Zkouška

- písemná formou testu
- započítány výsledky průběžných testů

Informace o předmětu a podklady na adrese
Courseware <https://portal.zcu.cz/portal/studium/courseware/ket/eltm>
Moodle <https://phix.zcu.cz/moodle/course/view.php?id=2701>

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

 ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Katedra elektrotechniky

3

Témata přednášek

1. Úvod do předmětu, klasifikace materiálů, vztah struktury a vlastností látek.
2. Konstrukční materiály. Klasifikace, vlastnosti, použití železných i neželezných kovů.
3. Elektrovedné materiály a jejich aplikace (vodiče, kontaktní materiály, supravodiče).
4. Speciální vodivé materiály (odporové materiály, pájky, termoelektrické články atd.)
5. Základy polovodičových materiálů, materiály pro optoelektroniku.
6. Základy magnetismu, základní klasifikace a vlastnosti magnetických materiálů.
7. Materiály pro magnetické obvody, aplikace magnetických materiálů.
8. Dielektrické materiály a jejich vlastnosti, chování dielektrika v elektrickém poli.
9. Plyné a kapalně izolanty; charakteristické vlastnosti a použití.
10. Pevné anorganické izolanty; charakteristické vlastnosti a použití.
11. Pevné organické izolanty, elastomery, kompozity; charakteristické vlastnosti a použití.
12. Speciální dielektrické materiály (piezoelektrika, pyroelektrika, elektrety), kapalně krystaly.
13. Environmentální vlastnosti materiálů, recyklace materiálů.



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

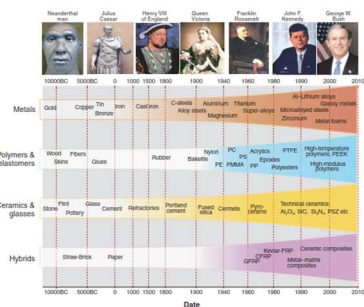
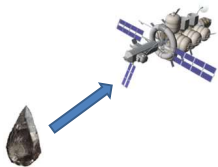


4

Historický vývoj materiálů používaných člověkem

Materiály

- látky, které mají prakticky využitelné vlastnosti
- určeny pro další technologické zpracování ve výrobě



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



5

Materiálové vědy a materiálové inženýrství

Materiálové vědy (nauka o materiálu)

- interdisciplinární vědní obor zkoumající vztah mezi strukturou materiálů a jejich vlastnostmi
- kombinuje znalosti z chemie, fyziky, metalurgie, mechaniky, matematiky
- **prakticky:** charakterizace stávajících materiálů, příprava nových materiálů

Materiálové inženýrství

- na základě znalosti vztahu mezi strukturou materiálu a vlastnostmi cíleně tuto strukturu ovlivňujeme abychom dosáhli předem požadovaných výsledných vlastností
- **prakticky:** nové technologické postupy přípravy materiálů, nové produkty a technické aplikace



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

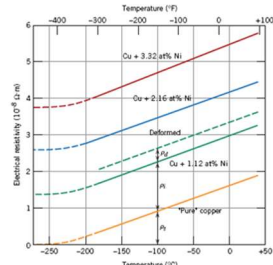


6

Materiálový tetraedr – vzájemné souvislosti



W. D. Callister and D. G. Rethwisch, Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach. John Wiley & Sons, 2008.



upraveno dle W. D. Callister and D. G. Rethwisch, Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach. John Wiley & Sons, 2008.



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



7

Volba vhodného materiálu

- závisí na účelu, pro který má materiál sloužit
- dle funkce se volí materiály se specifickými vlastnostmi

Postup volby materiálu

- cílová aplikace** » » » určuje požadované vlastnosti materiálů
 - vlastnosti: mechanické, elektrické, magnetické, optické, chemické, tepelné
- vlastnosti** » » » podle nich volíme vhodné materiály
 - materiály: struktura, složení
- materiály** » » » definují možné metody zpracování
 - zpracování: ovlivňuje vnitřní strukturu materiálů (např. odlévání, sinterování, tažení, lisování, svařování, pájení, žhání atd.)



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



8

Využití materiálů v elektrotechnice

Elektrické zařízení

- systém využívající pro svou funkci charakteristické vlastnosti jednotlivých materiálů
- 4 podsystémy:

Podsystém	Sledované vlastnosti
konstrukční	mechanické, tepelné, chemické, optické
elektrický	elektrické, tepelné, mechanické
magnetický	magnetické, mechanické
dielektrický	elektrické, tepelné, mechanické



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



9

Materiály pro elektrická zařízení

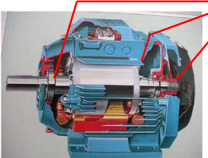
Konstrukční podsystém



keramika



litiny



oceli



hliník



plasty, kompozity aj.

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

MT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
VÝCHOVY A TĚLOVÝCHOVY

10

Materiály pro elektrická zařízení

Elektrický podsystém



měď



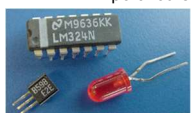
hliník



mosaz



zlato



polovodiče

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

MT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
VÝCHOVY A TĚLOVÝCHOVY

11

Materiály pro elektrická zařízení

Magnetický podsystém



ferity



ocel



magnety na bázi vzácných zemin (Nd, Sm)

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

MT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
VÝCHOVY A TĚLOVÝCHOVY

12

Materiály pro elektrická zařízení

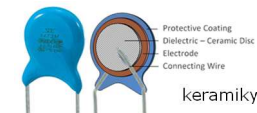
Dielektrický podsystém



sklo



organické kapaliny



keramiky



polymerní materiály



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



13

Struktura látek

Struktura látek je určena:

- **částicemi, ze kterých se látka skládá**
 - ▶ atomy, ionty, molekuly
- **vzájemným uspořádáním částic**
 - ▶ pravidelné X nepravidelné
- **silami, kterými jsou částice vázány**



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



14

Struktura atomů

Atom

- jádro – protony a neutrony
- elektronový obal – elektrony

	symbol	klidová hmotnost (kg)	elementární náboj
proton	p	$1,6725 \cdot 10^{-27}$	+1
neutron	n	$1,6748 \cdot 10^{-27}$	0
elektron	e	$9,11 \cdot 10^{-31}$	-1

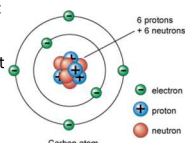
elementární náboj elektronu $Q_e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

- za normálních podmínek počet protonů shodný s počtem elektricky neutrální
- **velikost atomu** řádově 10^{-10} m (**0,1 nm**), jádro cca menší (cca 10^{-15} m , 1 fm)

chemický prvek



A – nukleonové číslo
Z – protonové číslo



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



15

The Scale of Things – Nanometers and More

Things Natural

Things Manmade

The Challenge

Interface between the biological and the nanoscale

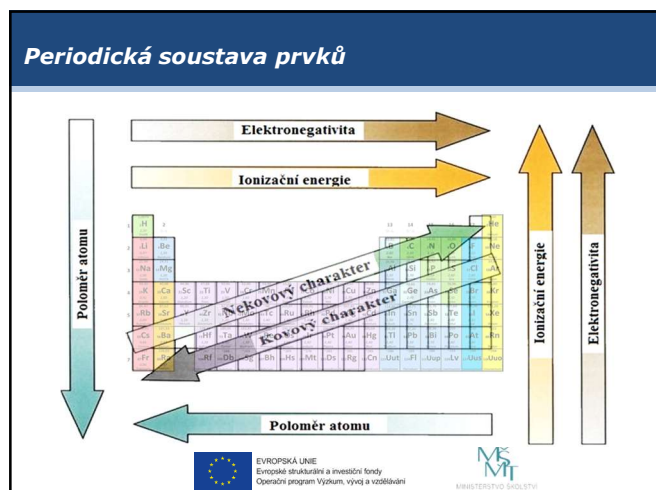
- **prvek** - látka skládající se z atomů jednoho druhu
- **molekula** - částice složená z atomů nebo iontů
- **ionty** - atomy s vyšším nebo nižším počtem elektronů proti základnímu stavu
 - ▶ **kationt** - vzniká při odebrání elektronu z neutrálního atomu
 - ▶ **aniont** - vzniká při přijetí elektronu neutrálním atomem
- **ionizační energie (E_i)** - energie potřebná k odtržení elektronu od atomu v základním stavu
- **elektronová afinita (E_{ea})** - energie uvolněná při přijetí elektronu atomem
- **elektronegativita (X)** - míra schopnosti atomu přijímat nebo ztrácet elektrony

$$X = \frac{E_i - E_{ea}}{2}$$

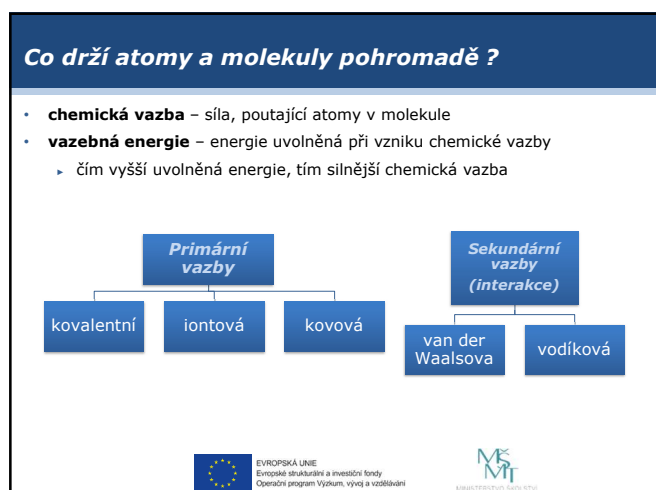
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

	H 1	He 2																	Li 3		Be 4											B 5		C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
1	H 1,01	He 4,00																			Li 6,94	Be 9,01											B 10,81	C 12,01	N 14,01	O 16,00	F 18,99	Ne 20,18
2	Li 6,94	Be 9,01	skupina 1		skupina 2		skupina 3		skupina 4		skupina 5		skupina 6		skupina 7		skupina 8		skupina 9		skupina 10		skupina 11		skupina 12		skupina 13		skupina 14		skupina 15		skupina 16		skupina 17		He 4,00	
3	Na 22,99	Mg 24,31	skupina 1		skupina 2		skupina 3		skupina 4		skupina 5		skupina 6		skupina 7		skupina 8		skupina 9		skupina 10		skupina 11		skupina 12		skupina 13		skupina 14		skupina 15		skupina 16		skupina 17		Ar 39,95	
4	K 39,10	Ca 40,08	skupina 1		skupina 2		skupina 3		skupina 4		skupina 5		skupina 6		skupina 7		skupina 8		skupina 9		skupina 10		skupina 11		skupina 12		skupina 13		skupina 14		skupina 15		skupina 16		skupina 17		Kr 83,80	
5	Rb 85,47	Sr 87,62	skupina 1		skupina 2		skupina 3		skupina 4		skupina 5		skupina 6		skupina 7		skupina 8		skupina 9		skupina 10		skupina 11		skupina 12		skupina 13		skupina 14		skupina 15		skupina 16		skupina 17		Xe 131,3	
6	Cs 132,91	Ba 137,33	skupina 1		skupina 2		skupina 3		skupina 4		skupina 5		skupina 6		skupina 7		skupina 8		skupina 9		skupina 10		skupina 11		skupina 12		skupina 13		skupina 14		skupina 15		skupina 16		skupina 17		Rn 222	
7	Fr 223	Ra 226	skupina 1		skupina 2		skupina 3		skupina 4		skupina 5		skupina 6		skupina 7		skupina 8		skupina 9		skupina 10		skupina 11		skupina 12		skupina 13		skupina 14		skupina 15		skupina 16		skupina 17		Uuo 289	



19



20

Kovalentní vazba

- vzniká při reakci dvou atomů se stejnou nebo málo rozdílnou elektronegativitou
- počet valenčních elektronů = max. počet vazeb atomu
- podstatou sdílení jednoho nebo více párů elektronů mezi dvěma atomy
- vazba směrová
- výskyt: mezi atomy organických molekul, u anorganických látek s krystalickou mřížkou složenou z atomů (diamant, křemík, germanium, karbid křemíku, aj.)

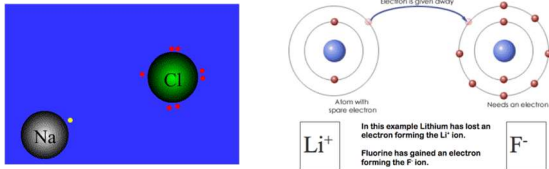
The diagram illustrates covalent bonding with two atoms. It shows the 'Attraction' between nuclei and the 'Shared electrons' forming a bond. A 3D model of a crystal lattice is also shown.

Logos: EVROPSKÁ UNIE, Evropské strukturální a investiční fondy, Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání; MŠMT, MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY.

21

Iontová vazba

- předáním jednoho či více elektronů mezi atomy – vznik iontů s opačným znaménkem
- vazba sférická, elektrostatický charakter
- typická vazba pro iontové krystaly (např. soli alkalických kovů – NaCl); nejsilnější při reakci prvků I. a VII. skupiny PSP (velký rozdíl elektronegativit)



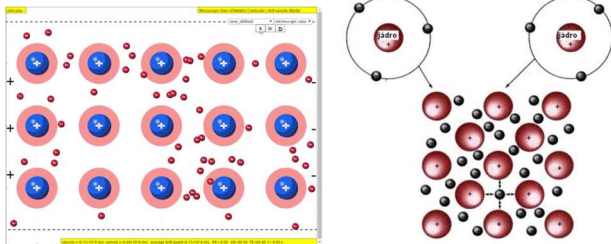
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



22

Kovová vazba

- kationty kovů uspořádány v mřížce + volné elektrony v celém objemu látky (elektronový plyn)
- elektrostatický charakter



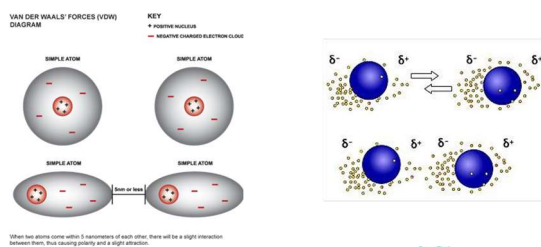
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



23

Van der Waalsova vazba (síla)

- mezi kladnými a zápornými náboji na neutrálních molekulách
- vzájemné působení molekulových dipólů (které existují kvůli okamžitému nerovnoměrnému rozložení elektronů v molekule)
- přibližně o dva řády slabší než kovalentní či iontová vazba



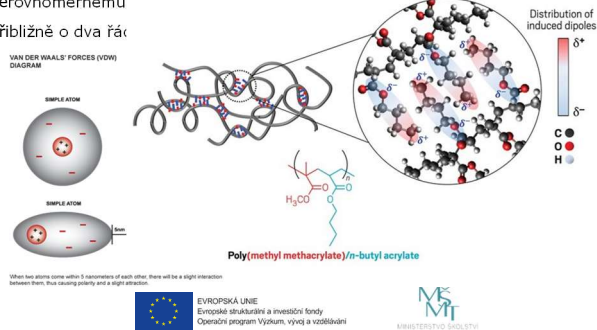
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



24

Van der Waalsova vazba (síla)

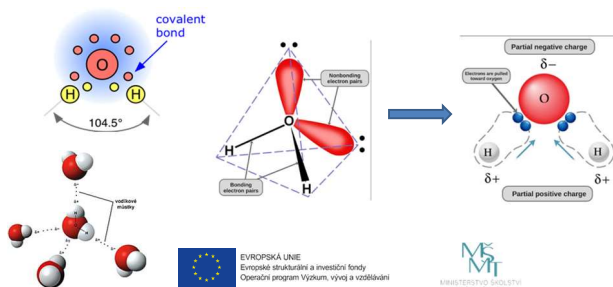
- mezi kladnými a zápornými náboji na neutrálních molekulách
- vzájemné působení molekulových dipólů (které existují kvůli okamžitému nerovnoměrnému
- přibližně o dva řádky



25

Vodíková vazba

- přitažlivé síly mezi atomy vodíku a atomy s volným elektronovým párem v sousedních molekulách
- vyskytuje se, pokud je vodík kovalentně vázán na silně elektronegativní prvek (např. kyslík, dusík)



26

Skupenství látek

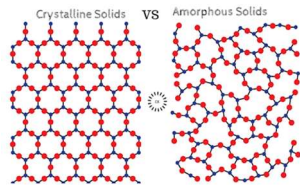
- **plyny**
 - ▶ 10^{25} základních částic v 1 m^3
 - ▶ mezi částicemi nepatrné síly
 - ▶ rozložení částic náhodné a neuspořádané
 - ▶ vzdálenosti částic nanometry (10^{-9} m)
- **kapaliny a pevné látky (kondenzované látky)**
 - ▶ $10^{28} \div 10^{29}$ atomů v 1 m^3
 - ▶ vzdálenost částic několik desetin nanometru
 - ▶ vzdálenosti částic jsou srovnatelné s vlastními rozměry atomů

27

Uspořádání částic v pevných látkách

• krystalické látky

- ▶ charakterizovány pravidelným uspořádáním částic
- ▶ rozložení částic se periodicky opakuje v celém krystalu
- ▶ monokrystaly, polykrystaly



• amorfni látky

- ▶ nemají pravidelnou strukturu
- ▶ periodické uspořádání těchto částic je omezeno na velmi krátkou vzdálenost



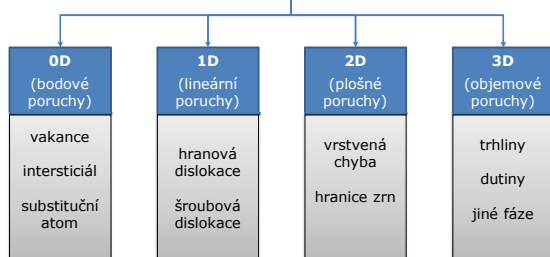
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



28

Poruchy ve struktuře krystalických látek

Poruchy v krystalech



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

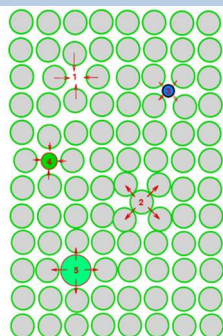


29

Poruchy ve struktuře krystalických látek - bodové

- narušení pravidelnosti struktury v jednom místě (bodě)

- 1) vakance
- 2) intersticiál
- 3) příměs v intersticiální poloze
- 4, 5) substituční příměsi



SEM snímek



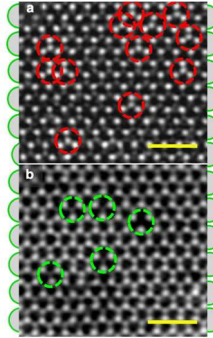
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



30

Poruchy ve struktuře krystalických látek - bodové

- narušení pravidelnosti struktury v jednom místě (bodě)
- 1) vakance
- 2) intersticiál
- 3) příměs v intersticiální poloze
- 4, 5) substituční příměsi



Hong, J., Hu, Z., Probert, M., Li, K., Liu, Q., Yang, X., Gu, L., Mei, N., Peng, Q., Xu, L., Zheng, J., Wu, D., Zheng, Z., Jin, C., Li, W., Zhang, X., Tian, J., Zhang, Z. (2019). Studying atomic defects in crystalline materials. *Nature Communications*, 10, 1233.



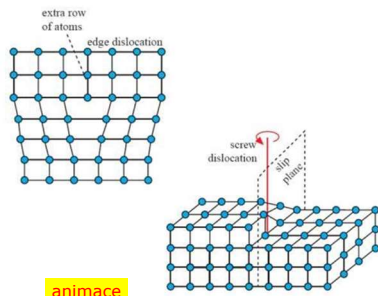
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



31

Poruchy ve struktuře krystalických látek - lineární

- porušení pravidelnosti podél jedné čáry (linie)
- 1) hranová dislokace (edge dislocation)
- 2) šroubová dislokace (screw dislocation)



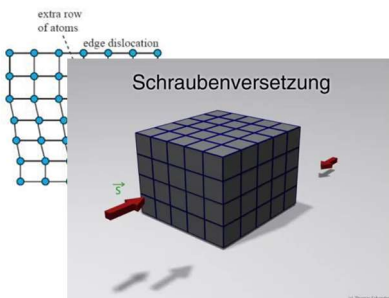
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



32

Poruchy ve struktuře krystalických látek - lineární

- porušení pravidelnosti podél jedné čáry (linie)
- 1) hranová dislokace (edge dislocation)
- 2) šroubová dislokace (screw dislocation)



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

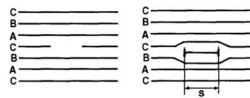


33

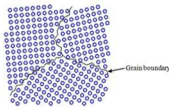
Poruchy ve struktuře krystalických látek – plošné a objemové

- **plošné poruchy**

- 1) vrstvená chyba (porucha)

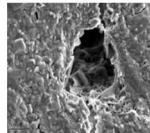
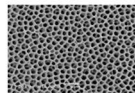


- 2) hranice zrn



- **objemové poruchy**

- ▶ trhliny, dutiny, jiné fáze atd.



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



34



Západočeská univerzita v Plzni
Katedra materiálů a technologií

Děkuji za pozornost



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



FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI



35
