

# Oceli pro kryogenní aplikace

Definování kryogenity. Požadavky na nízkoteplotní aplikace. Rázová houževnatost, přechodová teplota. Přehled kryogenních ocelí (obsahujících až 9% Ni). Vliv niklu na nízkoteplotní vlastnosti nízkolegovaných ocelí.



***doc. Ing. Jaromír MORAVEC, Ph.D.***

# Kryogenita a kryogenní teploty

**Kryogenika** nebo-li **fyzika nízkých teplot** je oborem zabývajícím se dosahováním velmi nízkých teplot a studiem působení těchto teplot na různé materiály. Americký Národní institut standardů a technologie stanovil hranici mezi chlazením a kryogenikou na 93,15 K ( $-180^{\circ}\text{C}$ ). Je to logické, neboť bod varu tzv. permanentních plynů ( $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ) leží pod touto hranicí a bod varu běžných chladicích kapalin leží nad ní. Tato hranice však není pevně dána a může být posouvána.

**Absolutní nula** je hypotetický stav látky, ve které se zastaví veškerý tepelný pohyb částic. Absolutní nula je počátek stupnice absolutní teploty (Kelvinovy stupnice), označuje se  $T = 0 \text{ K}$ , tj.  $-273,15^{\circ}\text{C}$ .

**Třetí věta termodynamická** tvrdí, že absolutní nuly nelze nikdy zcela dosáhnout, tj. absolutní nula je jen teoretická teplota. Lze se k ní ovšem limitně přiblížit velice blízko.

**Za kryogenní teplotu se obvykle pokládá teplota nižší než  $-150^{\circ}\text{C}$ .**

*Materiály určené pro práci za snížených teplot se obvykle rozdělují do základních skupin na materiály pracující za teplot:*

- Do teploty  $-80^{\circ}\text{C}$ ;**
- v rozmezí teplot  $-80$  až  $-120^{\circ}\text{C}$ ;**
- v rozmezí teplot  $-120$  až  $-196^{\circ}\text{C}$ ;**
- pod teplotou  $-196^{\circ}\text{C}$ .**

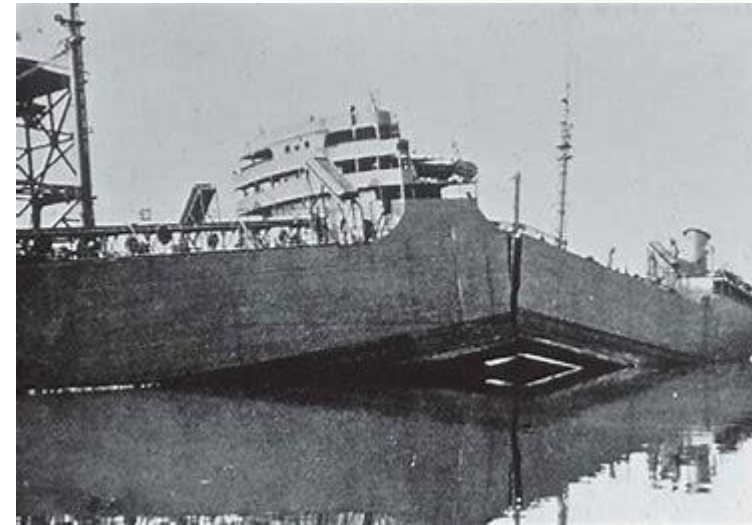
# Křehké lomy konstrukcí

**Houževnatost materiálu** udává jeho odolnost proti křehkému lomu. Ten je nebezpečným druhem porušení, neboť při malé spotřebě energie a nepatrné tvárné deformaci se často šíří velkou rychlostí. Vznik křehkého lomu závisí na řadě faktorů. Nejvýznamnějšími jsou ***nízká teplota, rychlost zatěžování, tloušťka konstrukce, přítomnost vrubu či výskyt vad, ale i jakost materiálu.***

**Liberty ship – jedna z prvních svařovaných lodních konstrukcí**, vyrobeno 2700 lodí, každá sedmá byla postižena křehkým lomem.

**Porušení lodí bylo zapříčiněno souhrou následujících faktorů:**

- Konstrukcí – většina lomů byla iniciována v rozích hranatých palubních otvorů, v nichž bylo koncentrováno napětí.
- Použitým materiálem – použitá ocel měla velmi nízkou dynamickou lomovou houževnatost – až tak, že některé lodi se rozlomily dřív než byly nasazeny do boje v chladných vodách.
- Výrobou – svary zhotovené nezkušenými pracovníky obsahovaly poruchy podobné trhlinám.
- Lomová houževnatost použitých oceli byla dostatečná pro nýtované konstrukce, kde každá trhlina může být zachycena na nýtu; ve svařovaných konstrukcích však trhlina nenarazí na žádnou bariéru a může tak projít celým trupem.



# Lomová mechanika

- S rozvojem používání **vysoce pevných ocelí** se ukázalo, že únosnost strojních součástí a konstrukcí neurčuje mez kluzu, ale odolnost proti iniciaci lomu z defektu.
- Vzniká nová disciplína → **lomová mechanika.**
- Respektuje významný vliv přítomnosti defektů v materiálu, pojednává o napjatosti kolem těchto defektů, o jejich chování při zatěžování statickém či dynamickém a definuje podmínky pro okamžik iniciace nestabilního lomu (z defektu).
- Objevuje se nový materiálový parametr → **lomová houževnatost.**

Měření lomové houževnatosti umožňuje nový pohled na jakost materiálu a stanoví přípustné velikosti defektu, který je v součásti za provozních podmínek.

- **lineární (elastická) lomová mechanika**
- **elasticko-plastická lomová mechanika**

# Rázové zkoušky

- V provozu působí často na strojní součásti síla, která se cyklicky mění, popř. její působení je dynamického charakteru. Rázové působení síly je velmi nebezpečné, neboť to může iniciovat náhlou destrukci materiálu, ke které by při statickém zatížení nikdy nedošlo.
- Náhlý lom vzniklý rázovým působením síly má obvykle ve svém okolí jen nepatrné deformace (křehký lom). Zatímco u stejného materiálu, který je zatěžován statickou silou, dojde před porušením k rozvoji tvárné deformace (tvárný lom).
- Ke zjištění, jak se chová materiál při náhlém vzrůstu namáhání slouží zkoušky rázem. Tyto zkoušky se provádějí buď za RT, nebo za snížených teplot. Ve výjimečných případech mohou být realizovány i za teplot zvýšených.

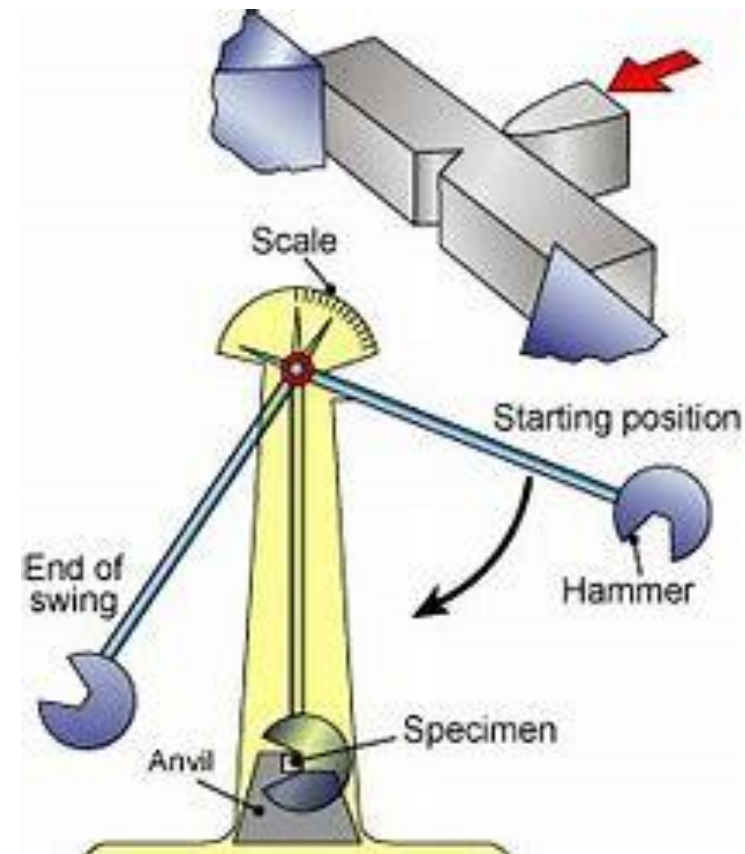
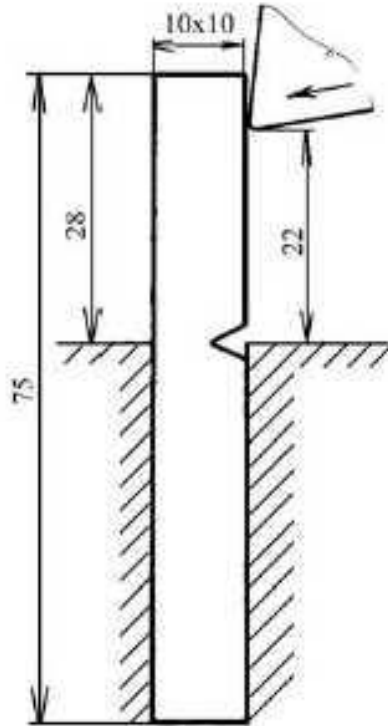
Podle způsobu jakým působí síla při rázu lze tyto zkoušky rozdělit na:

1. Rázové zkoušky v tahu a tlaku.
2. **Rázové zkoušky v ohybu – tyto zkoušky mají největší význam.**
3. Rázové zkoušky v krutu.

# Rázové zkoušky ohybem

Rázová zkouška v ohybu má z rázových zkoušek největší význam. Používá se zejména u ocelí. Vzhledem k vysoké houževnatosti ocelí by někdy nedošlo k porušení (přeražení) zkušebního tělesa, ale jen k plastické deformaci. Proto se opatřují zkušební tyče vrubem. Ve dně vrubu dochází při úderu ke koncentraci napětí a vzniká oblast složité napjatosti, což zvýší pravděpodobnost křehkého porušení tělesa.

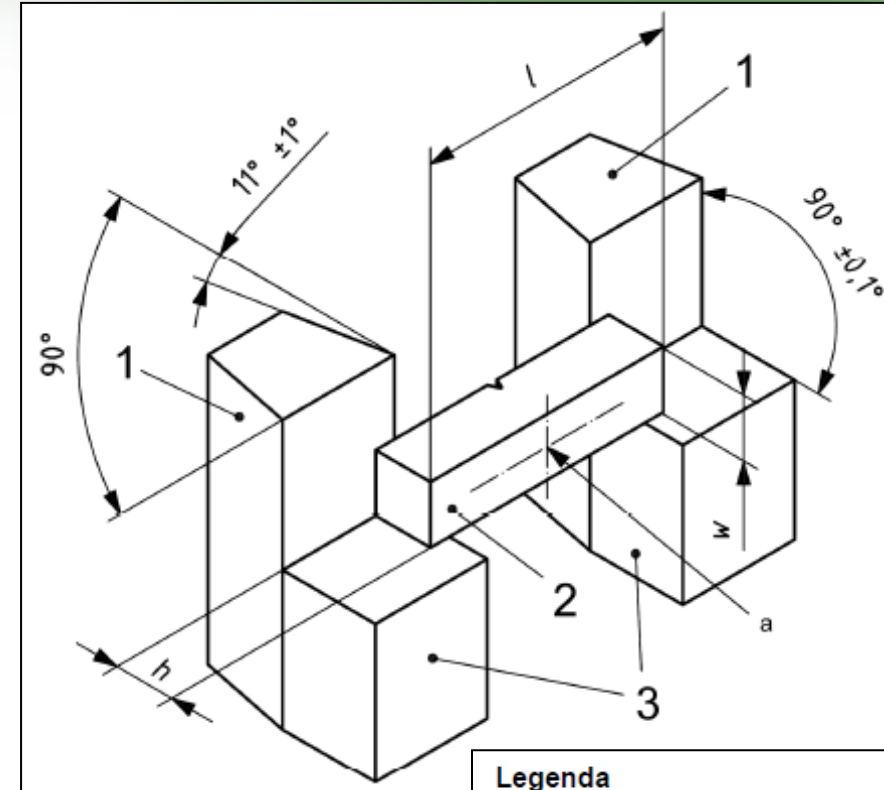
- Protože však i při geometrické podobnosti vzniká u tyčí různých rozměrů ve dně vrubu při rázu rozdílná napjatost, nelze výsledky získané na tyčích různých rozměrů srovnávat. Proto jsou tvar i rozměry zkušebních těles stanoveny normou.
- Podle způsobu uložení tyče, na niž dopadá ráz, jsou rázové zkoušky rozděleny na *zkoušky podle Charpyho* (tyč je uložena na dvou podporách) a *zkoušky podle Izoda* (tyč uchycena letmo).
- Rozdíl obou způsobů spočívá v tom, že u Charpyho zkoušky narazí kladivo na zkoušenou tyč v rovině lomu, zatímco u Izodovy zkoušky je ráz veden na místo od lomu vzdálené.



# Rázová zkouška ohybem - Charpy

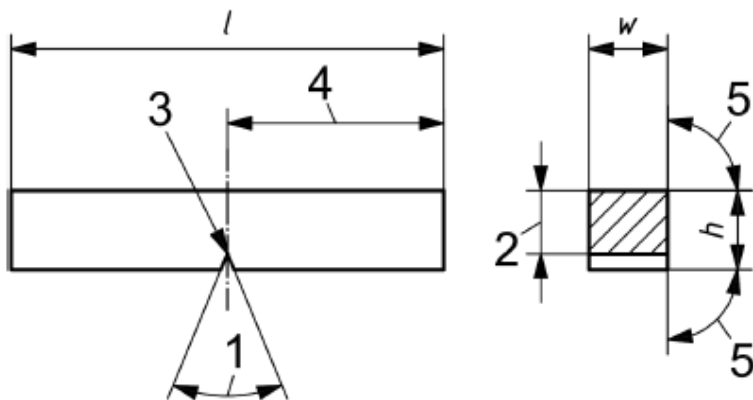
Norma **ČSN ISO 148** specifikuje zkušební metodu pro určování energie absorbované při zkoušce rázem v ohybu kovových materiálů metodou Charpy (těles s V-vruby a U-vruby).

Značka	Jednotka	Význam
$K_p$	J	Počáteční potenciální energie (potenciální energie)
$FA$	%	Podíl smykového lomu
$h$	mm	Výška zkušebního tělesa
$KU_2$	J	Absorbovaná energie v případě zkušebního tělesa s U-vrubem při použití břitu o poloměru 2 mm
$KU_8$	J	Absorbovaná energie v případě zkušebního tělesa s U-vrubem při použití břitu o poloměru 8 mm
$KV_2$	J	Absorbovaná energie v případě zkušebního tělesa s V-vrubem při použití břitu o poloměru 2 mm
$KV_8$	J	Absorbovaná energie v případě zkušebního tělesa s V-vrubem při použití břitu o poloměru 8 mm
$LE$	mm	Příčné rozšíření
$l$	mm	Délka zkušebního tělesa
$T_t$	°C	Přechodová teplota
$w$	mm	Šířka zkušebního tělesa

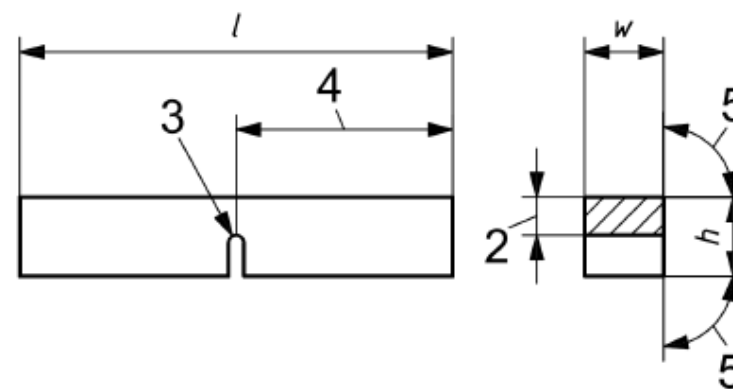


## Legenda

- 1 opěry
- 2 standardní zkušební těleso
- 3 podpory zkušebního tělesa
- 4 kryt
- $h$  výška zkušebního tělesa
- $l$  délka zkušebního tělesa
- $w$  šířka zkušebního tělesa
- $a$  střed rázu
- $b$  směr kyvu kladiva



a) geometrie tělesa s V-vrubem

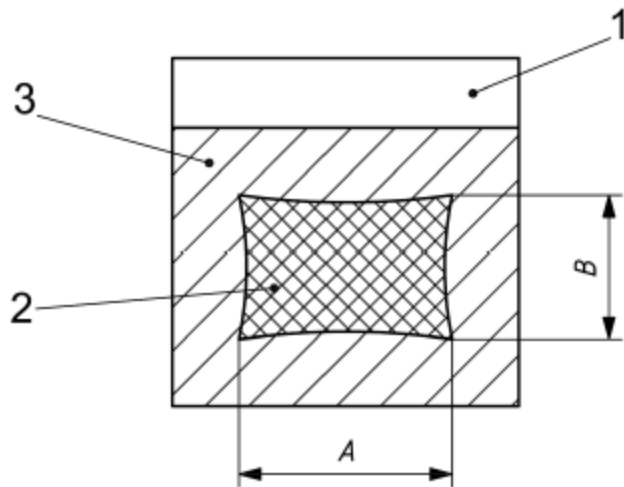


b) geometrie tělesa s U-vrubem

# Rázová zkouška ohybem - Charpy

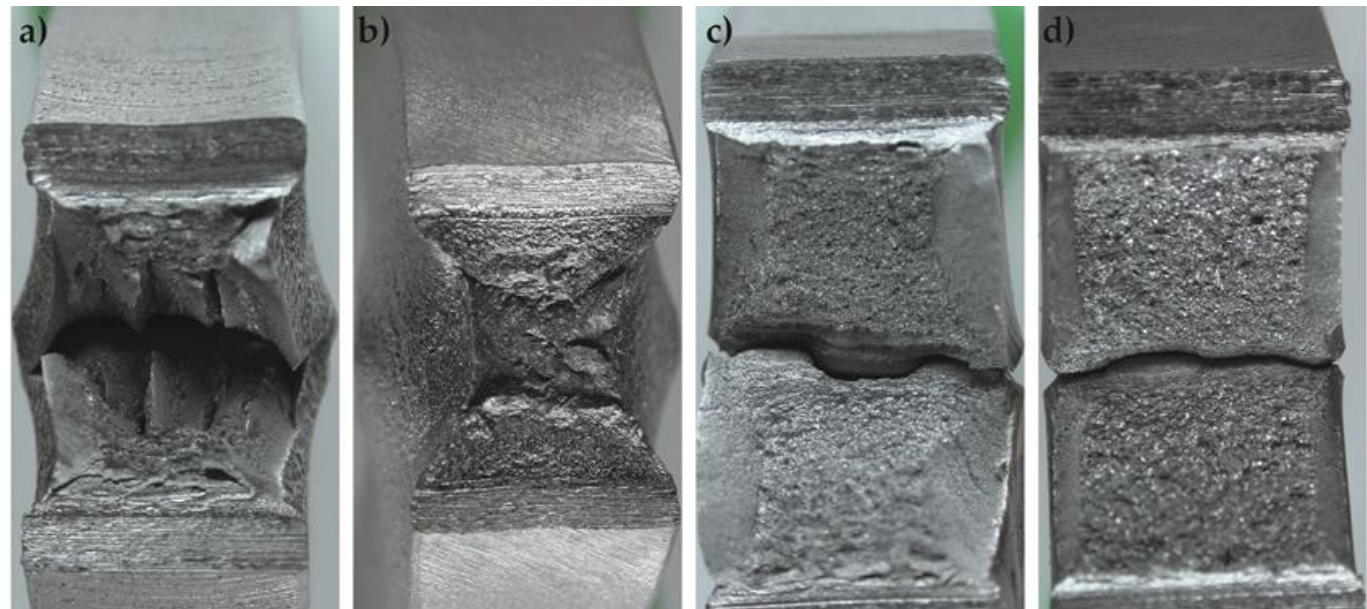
Kromě absorbované energie **KV, KU (J)** se určuje ještě hodnota nárazové práce označená jako **KCV nebo KCU ( $J.cm^{-2}$ )**. Mimoto je vhodné po každé rázové zkoušce ohybem vyhodnotit typ vzniklého lomu, zda je tzv. smykový (tvárný), nebo štěpný (křehký). Procento smykového lomu se určuje libovolně následující metodou:

- Změří se délka a šířka štěpné části lomové plochy a dle tabulky v normě se určí procento smykového lomu.
- Komparačně porovnáním lomu s mapou vzhledů lomu – viz norma.
- Lomová plocha se vyfotografuje a planimetricky se v grafickém programu vypočtou % smykového lomu.
- Smykový lom se vyhodnotí technikami obrazové analýzy.



## Legenda

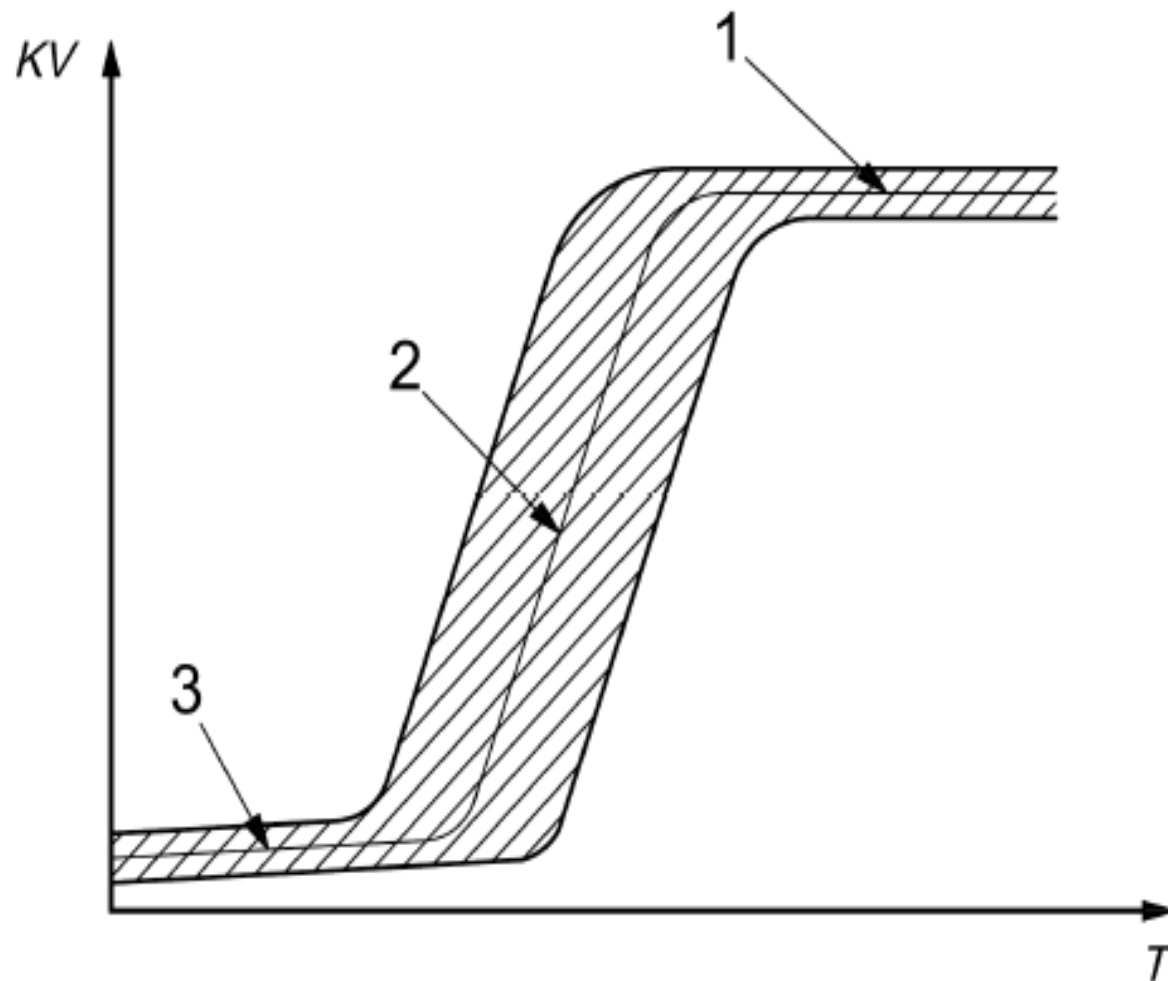
- vrub
- štěpná plocha (křehká)
- smyková plocha (matná)





# Teplotní závislost absorbované energie

Křivka teplotní závislosti absorbované energie (křivka  $KV/T$ ) znázorňuje absorbovanou energii jako funkci zkušební teploty pro daný tvar zkušební vzorku (viz obrázek D.1). Všeobecně se tato křivka získá tak, že se jednotlivými hodnotami proloží aproximační křivka. Tvar křivky a rozptyl zkušebních hodnot závisí na materiálu, tvaru zkušební vzorku a nárazové rychlosti. V případě křivky vykazující přechodové chování se rozlišuje mezi oblastí horních prahových hodnot, přechodovou oblastí a oblastí spodních prahových hodnot.



## Legenda

$T$  teplota

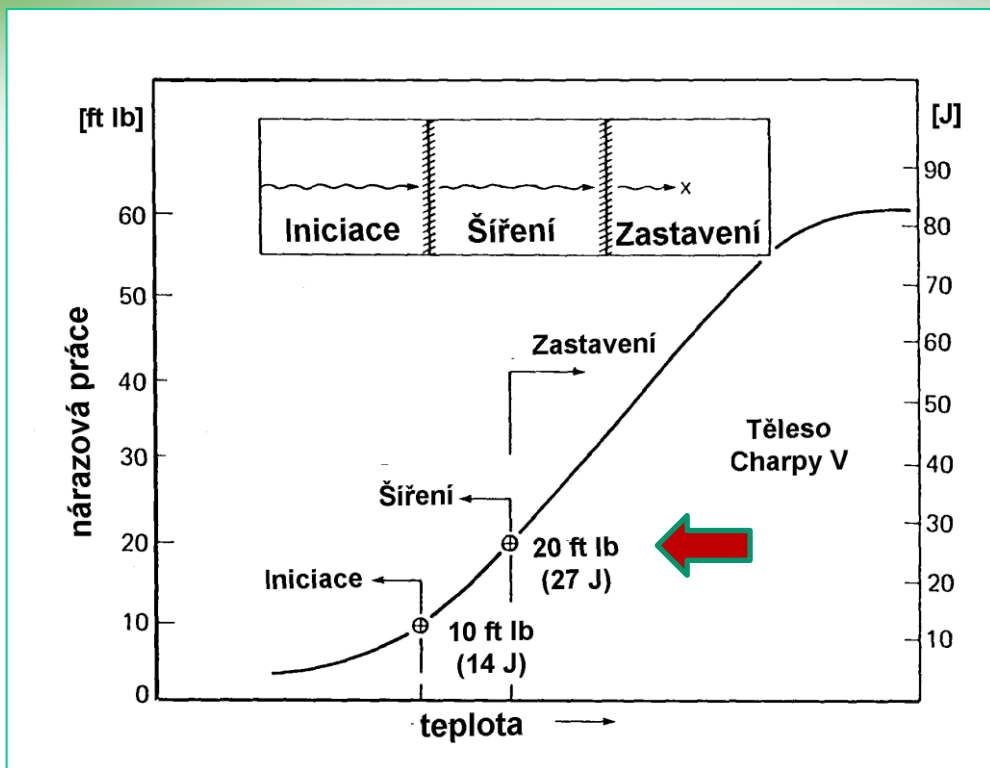
$KV$  absorbovaná energie

1 oblast horních prahových hodnot

2 přechodová oblast

3 oblast spodních prahových hodnot

# Přechodová (transientní) teplota



- Je to teplota, při které dochází k přechodu houževnatého porušení materiálu na křehký charakter porušení;
- Snižuje-li se teplota při zkoušce, klesá nárazová práce potřebná k přeražení zkušební tyče;
- Za vyšších teplot je zjišťovaný houževnatý (tvárný) lom. Při poklesu teploty pod tranzitní teplotu se mění v lom křehký, který je obecně charakteristický pro nižší teploty.

Přechodová teplota  $T_t$ , charakterizuje místo strmého nárůstu na křivce teplotní závislosti absorbované energie. Dochází k němu obvykle v poměrně širokém teplotním intervalu a proto neexistuje žádná všeobecně platná definice  $T_t$ . Přechodová teplota  $T_t$ , je teplota při které:

- Se dosáhne specifické hodnoty absorbované energie, např.  $KV_8=27J$ .**
- Se vyskytuje specifické % smykového lomu, např. 50%.**
- Dosáhne se specifické hodnoty příčného rozšíření, např. 0,9 mm.**

# Podstata změny chování materiálu při nízkých teplotách

**Přechod ke křehkému lomu za nízkých teplot je typický u kovů s prostorově centrovanou kubickou mřížkou a některé kovy s hexagonální mřížkou.**

Jev je způsobený stavem napjatosti. V bezprostředním okolí vrubu vzniká vysoká lokální složka tahového napětí a při trojosé napjatosti v okolí kořene vrubu dochází k redukci maxima smykového napětí. Smykové napětí je nutné pro pohyb dislokací a proto je pohyb dislokací omezen. Další omezení pohybu dislokací vzniká následkem poklesu teploty a s růstem rychlosti zatěžování.

**Omezení pohybu dislokací vede k upřednostnění nežádoucího typu lomu – vzniká křehký lom.**

**Snaha o nalezení kritériální hodnoty rázové energie:**

**V současné době je používána hodnota KV 27 J.**

Nevýhoda hodnoty 27 J – platí pouze pro C-Mn oceli s mezí kluzu 230-270 MPa, tloušťku stěny 10-38 mm a pro podmínky spojené s provozem lodi.

Výhoda hodnoty 27 J – hodnota leží v ohybu tranzitní křivky, nad touto hodnotou hodnota rázové práce s teplotou prudce vzrůstá.

# Procesy ovlivňující hodnotu přechodové teploty

## Přechodovou teplotu zvyšují:

- Kalení;
- Tváření za studena (deformace tlakem, malá deformace tahem);
- Postupy, které mají za následek zhrubnutí struktury;
- Postupy, které mají za následek heterogenitu struktury.

## Přechodovou teplotu snižují:

- Žíhání; Zušlechťování;
- Tváření za studena, po kterém následuje rekrytalizace;
- Postupy, které mají za následek zjemnění struktury. Čím je menší velikost feritického zrna, tím je nižší  $T_t$ ;
- Postupy, které mají za následek vznik homogenní struktury.

**Při záporných teplotách je chování kovů značně závislé na jejich krystalové struktuře**

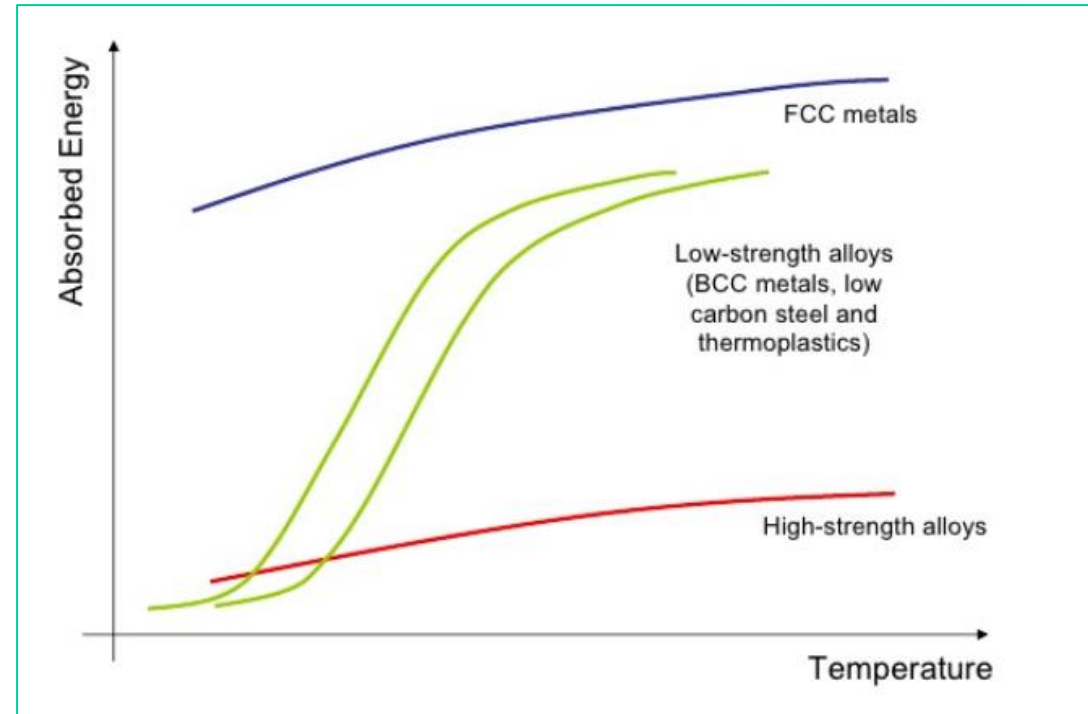
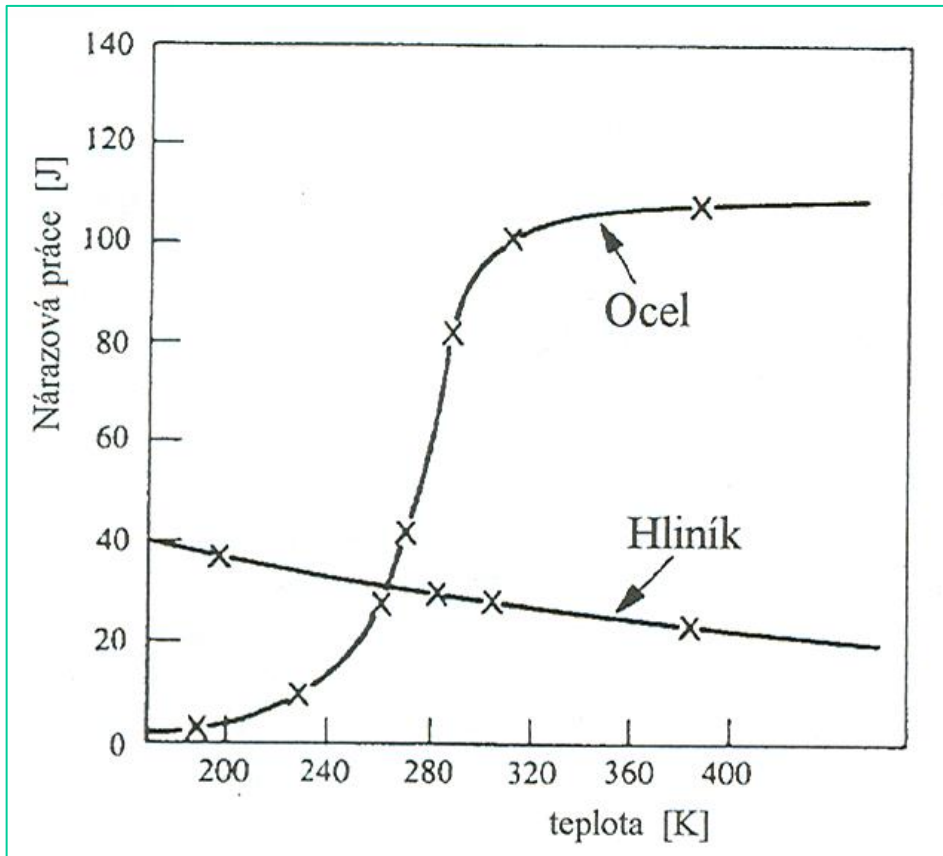
## Kovy krystalizující v BCC mřížce (kubické prostorově středěné mřížce):

- Mez kluzu a mez pevnosti jsou silně závislé na teplotě.
- Vykazují již v úzkém intervalu záporných teplot ztrátu houževnatosti.

## Kovy krystalizující v FCC mřížce (kubické plošně středěné mřížce):

- Mez pevnosti je mnohem více závislá na teplotě než jejich mez kluzu.
- Nevyskytuje se tak prudký pokles houževnatosti jako u kovů s BCC.
- U některých kovů s kubickou plošně středěnou mřížkou dochází při snižování teploty spíše k nárůstu jejich houževnatosti !!!

# Porovnání teplotní závislosti nárazové práce pro různé typy materiálů



# Způsoby ochlazování vzorků

- **Při teplotách do  $-50^{\circ}\text{C}$**  se používají běžné laboratorní ledničky.
- **Při teplotách do  $-75^{\circ}\text{C}$**  se používá směs tuhého oxidu uhličitého (suchý led) s etylalkoholem nebo s jinou netoxickou, nemrznoucí kapalinou.
- **Při teplotách do  $-180^{\circ}\text{C}$**  se používá směs kapalného dusíku s nemrznoucí netoxickou kapalinou.
- **Pro teplotu  $-190^{\circ}\text{C}$**  se použije kapalný dusík.

**Ochlazovací směsi nesmí mít agresivní účinek na zkušební tyče. Pro zajištění stanovené zkušební teploty je nutno zkušební tyče před umístěním na opěry kladiva podchladiť. Podchlazení by mělo být realizováno s následující přesností:**

**2 až  $3^{\circ}\text{C}$  při zkušební teplotě do  $-40^{\circ}\text{C}$**

**3 až  $4^{\circ}\text{C}$  při zkušební teplotě do  $-60^{\circ}\text{C}$**

**4 až  $6^{\circ}\text{C}$  při zkušební teplotě do  $-190^{\circ}\text{C}$**

Doba ustavení ochlazené zkušební tyče na opěry kyvadlového kladiva, od okamžiku jejího vyjmutí z ochlazovacího prostředí do úderu kladiva, nesmí překročit 5 s.

# Materiály pro použití za nízkých teplot

Oceli používané při teplotách nižších než 0°C musí být jemnozrnné, musí mít nízký obsah nečistot (zejména S a P), musí mít velmi nízké přechodové teploty a vyhovující křehkolomové charakteristiky za nízkých teplot.

Základní rozdělení materiálů je podle minimální použitelné teploty:

- **Pro teploty do -80°C** je možné použít jemnozrnné nízkouhlíkové oceli dezoxidované Al, s velmi nízkým obsahem S a s limitovaným obsahem Mn do cca 1,6 %. Při vyšších obsazích Mn by mohly ve struktuře vzniknout lokální ostrůvky bainitu nebo martenzitu.
- **Pro teploty do -120°C** se používají nízkolegované oceli dolegované 3 až 3,5% Ni. Oceli musí být jemnozrnné a musí mít nízký obsah nečistot. Dle CEN ISO/TR 15608 jsou zařazeny do skupiny 9.1.
- **Pro teploty -120°C až -196°C** se používají oceli legované 5 až 9 % Ni. Dle CEN ISO/TR 15608 jsou zařazeny do skupiny 9.2 a 9.3.
- **Pro teploty -196°C a nižší** se používají Cr-Ni austenitické oceli. Dle CEN ISO/TR 15608 jsou zařazeny do skupiny 8.1 a 8.2. Do teploty -196°C je možné použít levnější variantu Cr-Ni austenitických ocelí a to Mn-Cr oceli zařazené dle CEN ISO/TR 15608 do skupiny 8.3.

**Děkuji Vám za pozornost.**