

Houževnatost

- i.** Základní pojmy (tranzitní lomové chování ocelí, teplotní závislost pevnostních vlastností, fraktografie)
- ii.** (Empirické) zkoušky houževnatosti (Charpy, TNDT)
- iii.** Lineárně-elastická lomová mechanika (Irwin, zkoušky lomové houževnatosti)
- iv.** Elasto-plastická lomová mechanika (zkoušky, interpretace, podmínky šíření trhliny)

(Empirické) metody zkoušení odolnosti ocelí proti křehkému lomu (teplotně tranzitní přístup)

- **Úvod**
- **Zkouška rázem v ohybu**
- **Lomový diagram podle Pelliniho**
- **Základní tranzitní teploty určené na velkých tělesech – t_{NDT} , t_{YC} a $t_{50\%}^{\text{DWTT}}$**

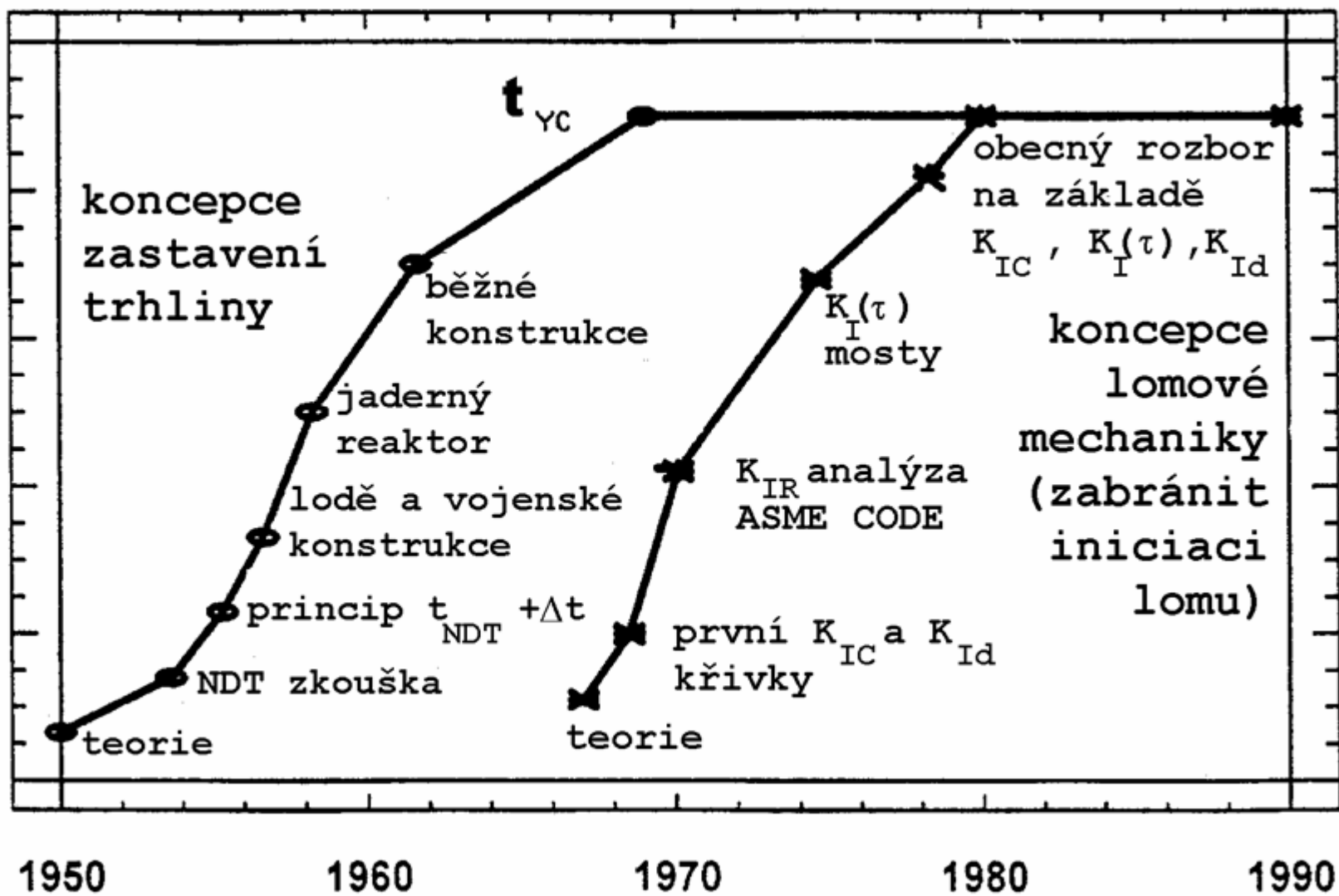
Tranzitní lomové chování

Změna charakteru lomu oceli – z tvárného lomu na lom štěpný v závislosti na poklesu teploty.

Jak zabránit havárii ocelové svařované konstrukce křehkým lomem

- **filosofie zastavení trhliny** – tranzitní teplota
- **filosofie zabránění iniciace lomu** – lomová mechanika

TECHNOLOGICKÝ POKROK



Rozdělení zkoušek podle účelu

Zkoušky

- *Srovnávací*
- *Specifické*

Použití srovnávacích zkoušek



Použití srovnávacích zkoušek

- 1) Posoudit, zda se u daného materiálu vyskytuje tranzitní lomové chování (zvonovina, revolver)
- 2) Posouzení citlivosti lomového chování daného materiálu na změnu teploty (volba materiálu k výrobě lokomotivy pro BAM)
- 3) Kontrola zda byl použit předepsaný materiál z hlediska houževnatosti

Technické dodací podmínky – konstrukční oceli

(11 378.1 Železniční stavitelství) 7

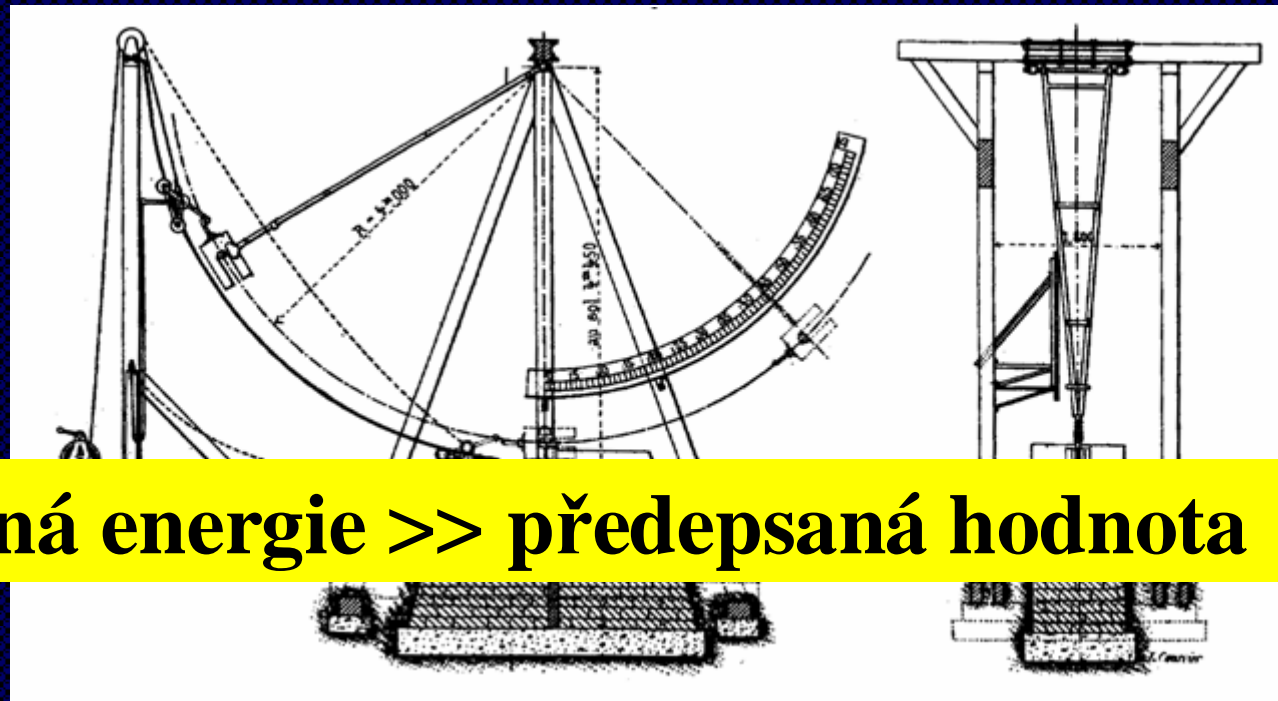
Použití srovnávacích zkoušek

Hlavní požadavky na srovnávací zkoušky:

- ✓ **Levná výroba zkušebních těles**
- ✓ **Jednoduché provádění zkoušky**
- ✓ **Reprodukovatelnost výsledků**

Použití srovnávacích zkoušek

V současné době se ve světě jako srovnávací zkouška pro hodnocení houževnatosti materiálů používá zkouška rázem v ohybu podle **Charpyho**



absorbovaná energie >> předepsaná hodnota

Použití specifických zkoušek

Zkoušky prováděné za podmínek srovnatelných s provozními podmínkami konstrukce

- volba materiálu pro daný typ konstrukce

Podle filosofie jak zabránit lomu

- filozofie tranzitní teploty
- lomově mechanické filosofie

Použití specifických zkoušek

Filozofie tranzitní teploty

- má opodstatnění jen u materiálů, které vykazují tranzitní lomové chování
- materiálovou charakteristikou je tranzitní teplota

provozní teplota >> tranzitní teplota



Použití specifických zkoušek

Filozofie založená na lomové mechanice

- má opodstatnění u materiálů, které vykazují nestabilní lom
- materiálovou charakteristikou je lomová houževnatost

$$K_I, J_I, \delta \ll K_{Ic}, J_{Ic}, \delta_c$$



Zkouška rázem v ohybu

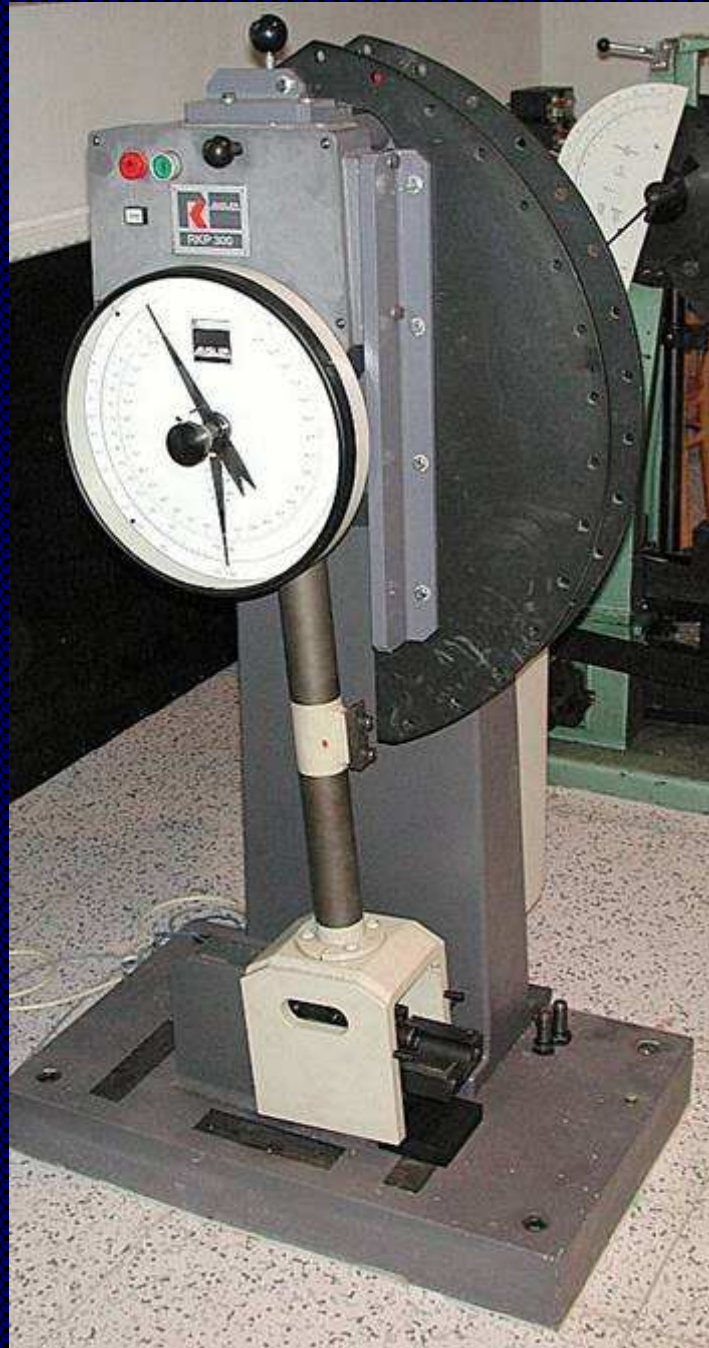
Srovnávací zkouška **ČSN EN 10 045 – 1 (420381)**

Kovové materiály - zkouška rázem v ohybu podle Charpyho

Zkušební zařízení - kyvadlové kladivo
vyrábí se o energiích (50J) 150 J, 300 J, 450 J

musí vyhovovat ČSN EN 10 045 – 2

Cejchování - geometrie, tření, hmotnost
- použití cejchovných těles



Zkouška rázem v ohybu

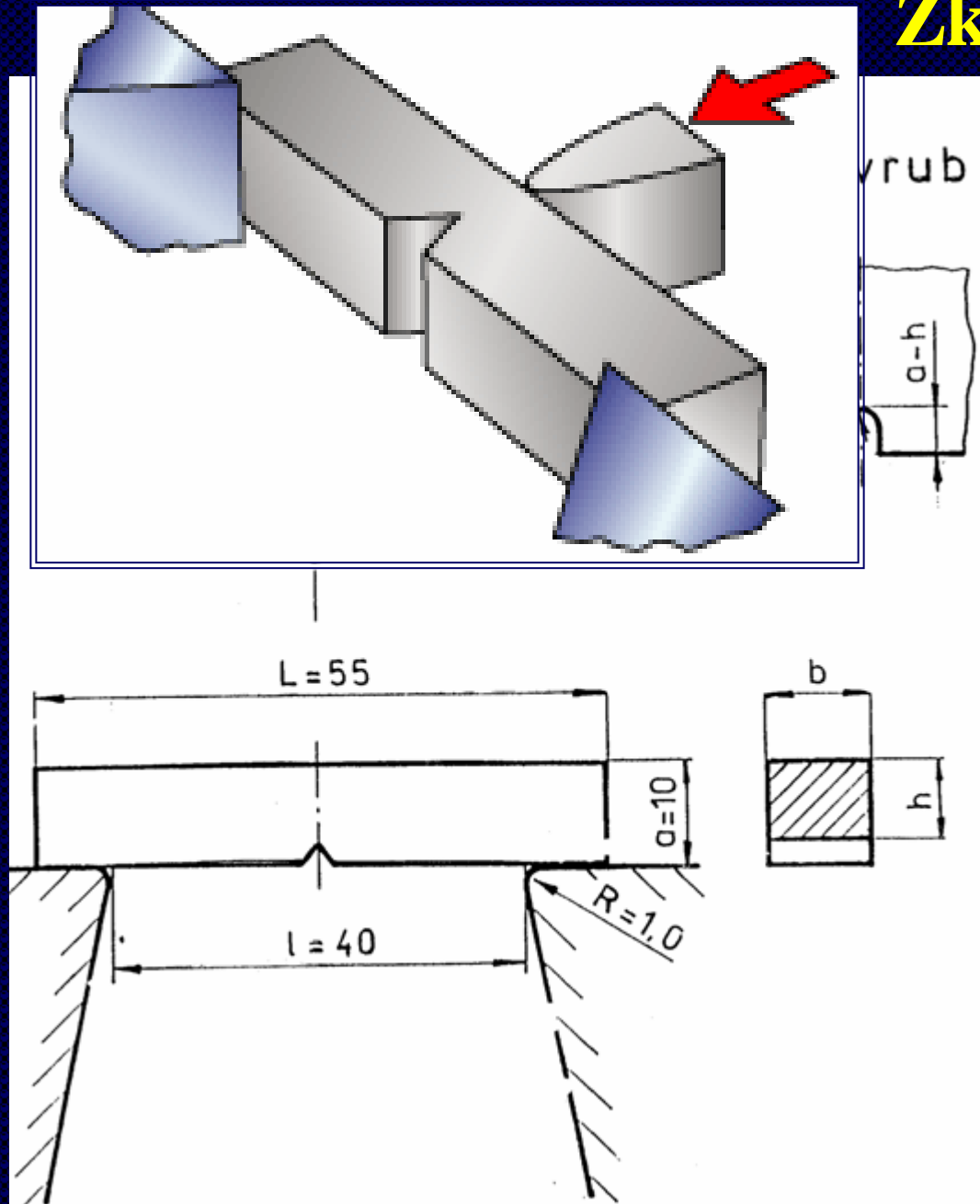
Srovnávací zkouška

Kovové materiály - zkouška rázem v ohybu podle Charpyho

Tvar zkušebních těles a metodika zkoušky je uvedena v ČSN EN 10 045 – 1 (420381)

zkušební tyč (**10x10x55**) mm & **V vrub**,
tyče o menší tloušťce než 10 mm (7,5 mm a 5 mm) jsou povoleny pouze pro V-vrub

Zkouška rázem v ohybu



V vrub

U vrub

EN v případě U-
vrubu připouští
hloubku pouze
 $a-h = 5$ mm;

ASTM předepisuje
jiný tvar břitu
beranu R8

Zkouška rázem v ohybu

Kdy se používá V-vrub, kdy U-vrub?

V-vrub

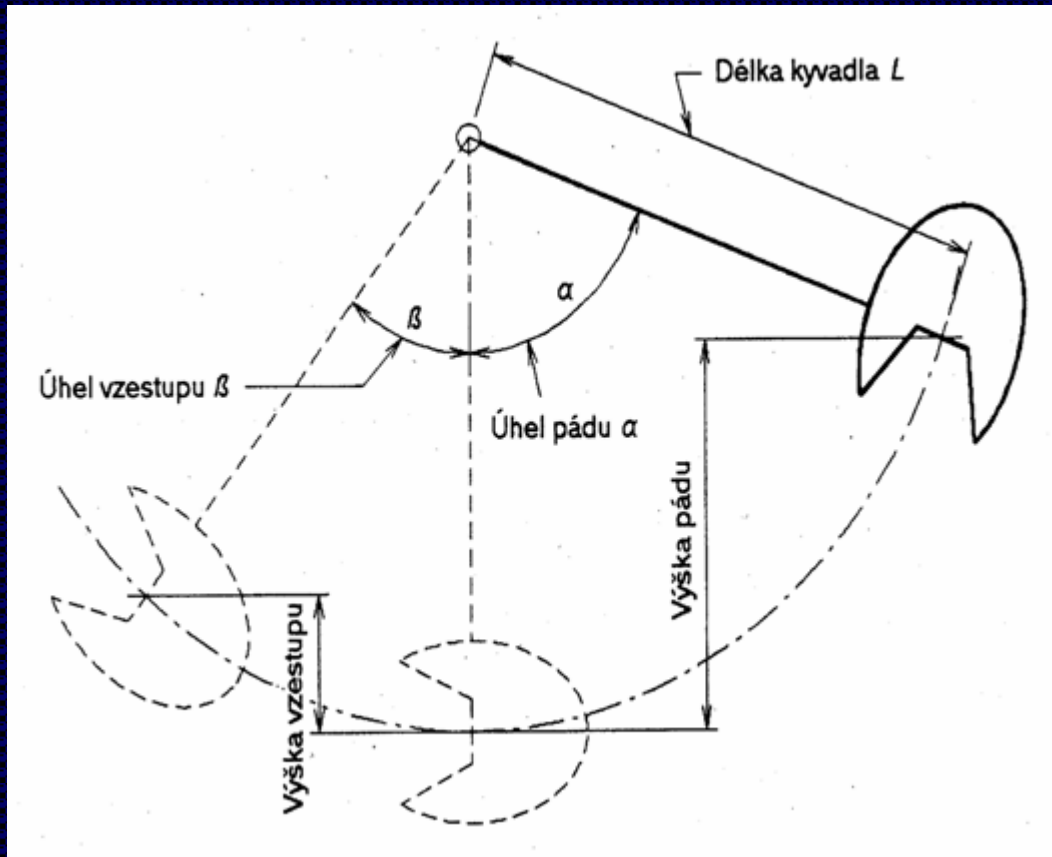
**materiály vykazující tranzitní lomové chování –
v technických dodacích podmínkách EN –
svařitelné oceli tvářené i na odlitky, tvárná
litina**

U-vrub

**vyskytuje se zpravidla v materiálových listech –
legované oceli, perlitické oceli na železniční
dvojkolí, apod.**

Zkouška rázem v ohybu

Co se měří při zkoušce rázem v ohybu



Kladivo 300J

V-vrub

tloušťka vzorku 10 mm

$KV = 121 J$

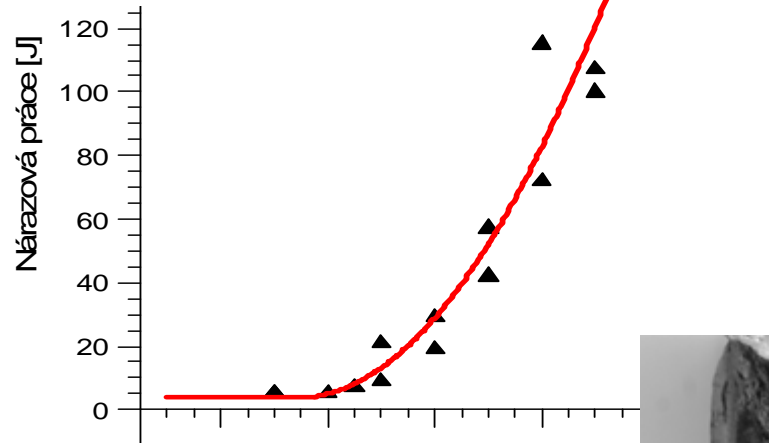
$KV150/7,5 = 83 J$

- ❖ teplota zkoušky
- ❖ vzhled lomové plochy
- ❖ FATT ($t_{50\%}$)
- ❖ další tt

Zkouška rázem v ohybu

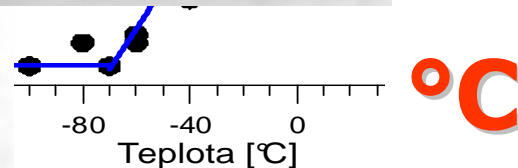
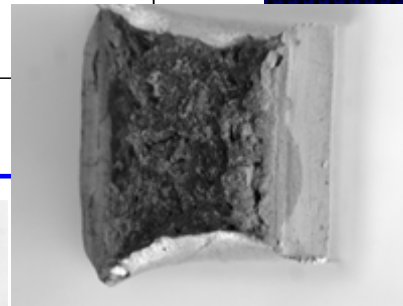
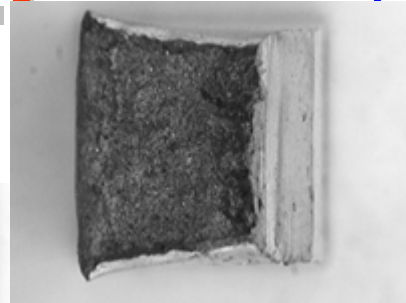
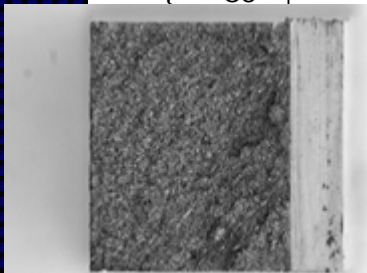
Co se měří při zkoušce rázem v ohybu

KV [J]



% tv.!

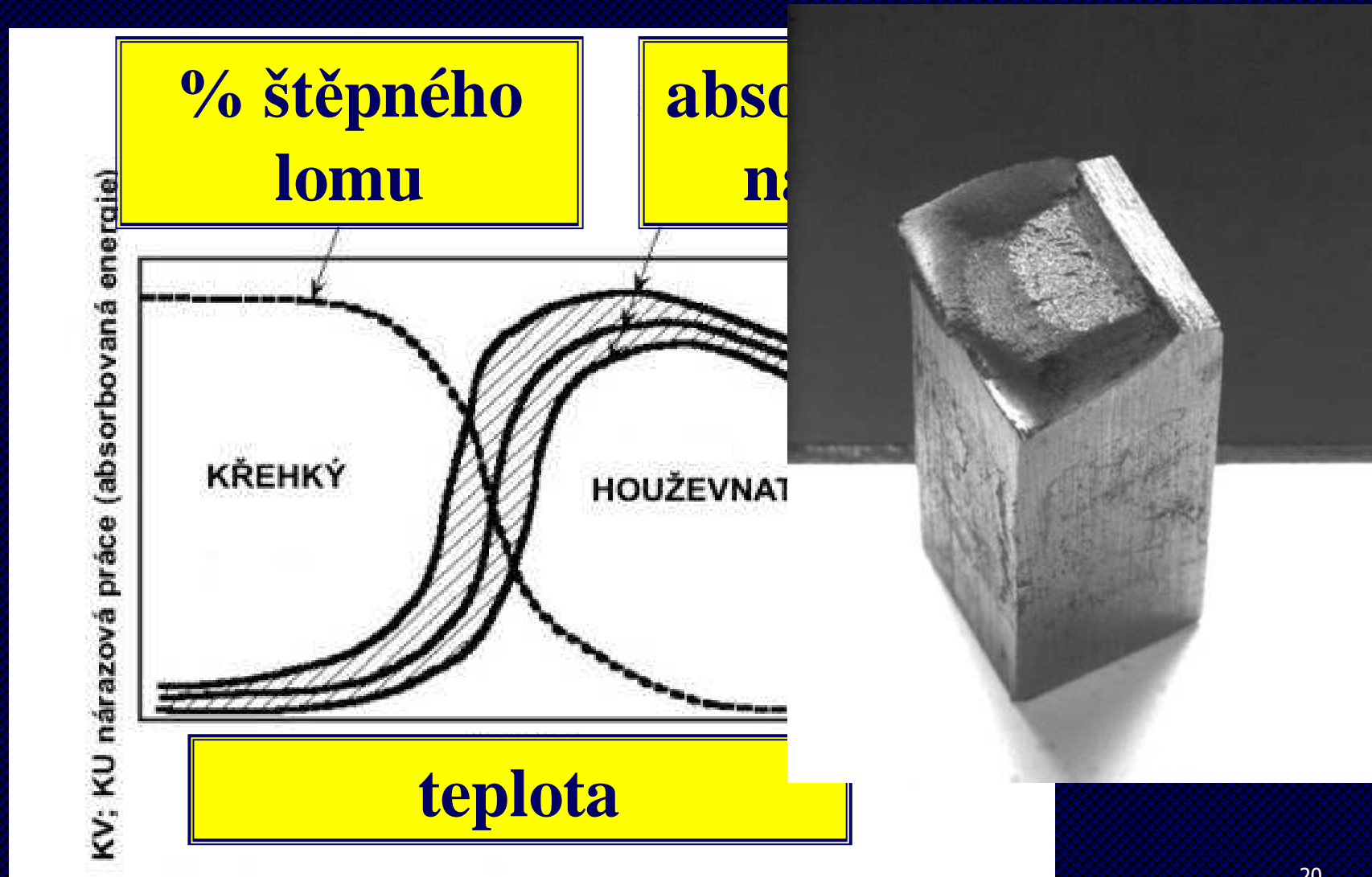
úměrného poru



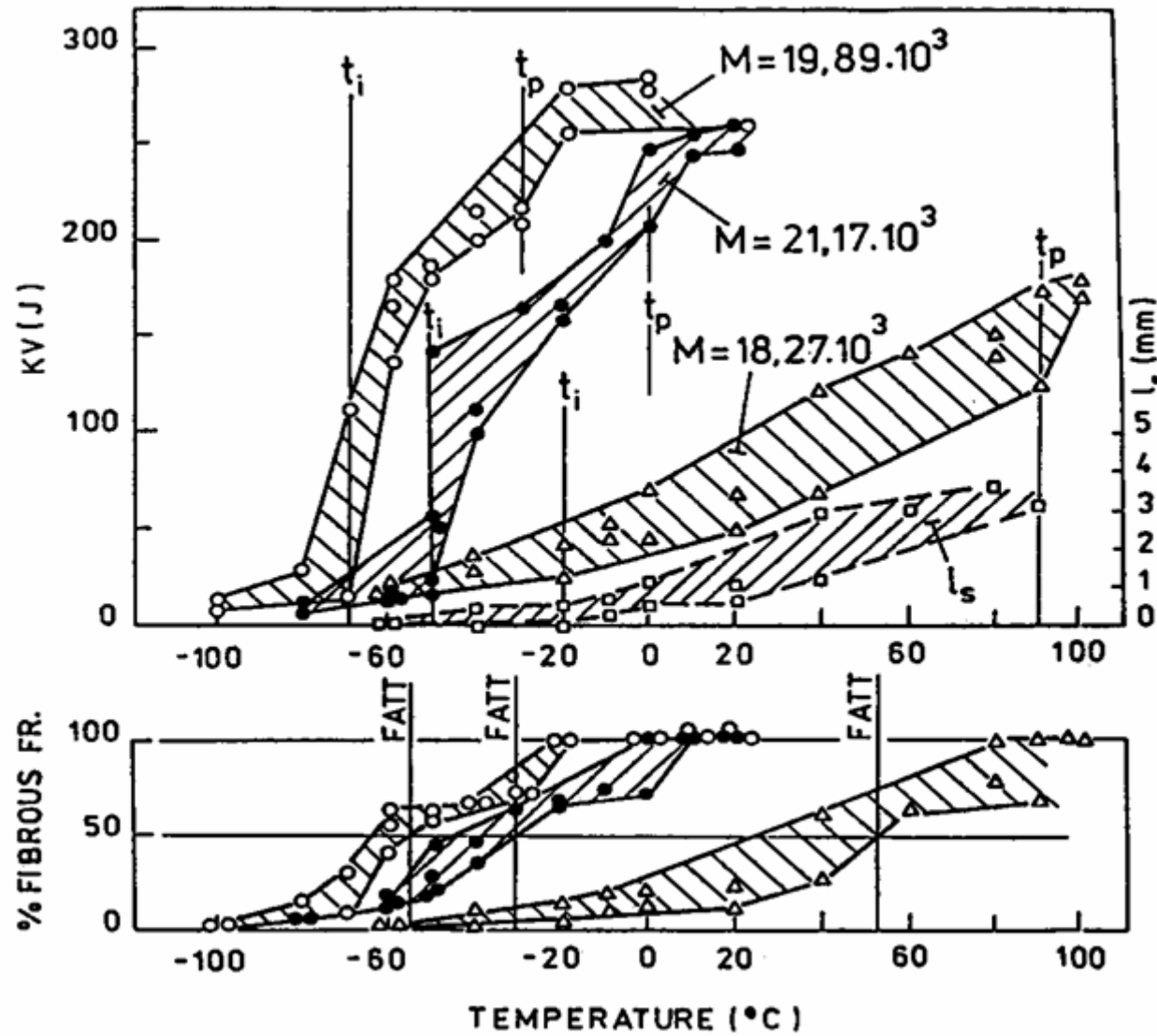
°C

Zkouška rázem v ohybu

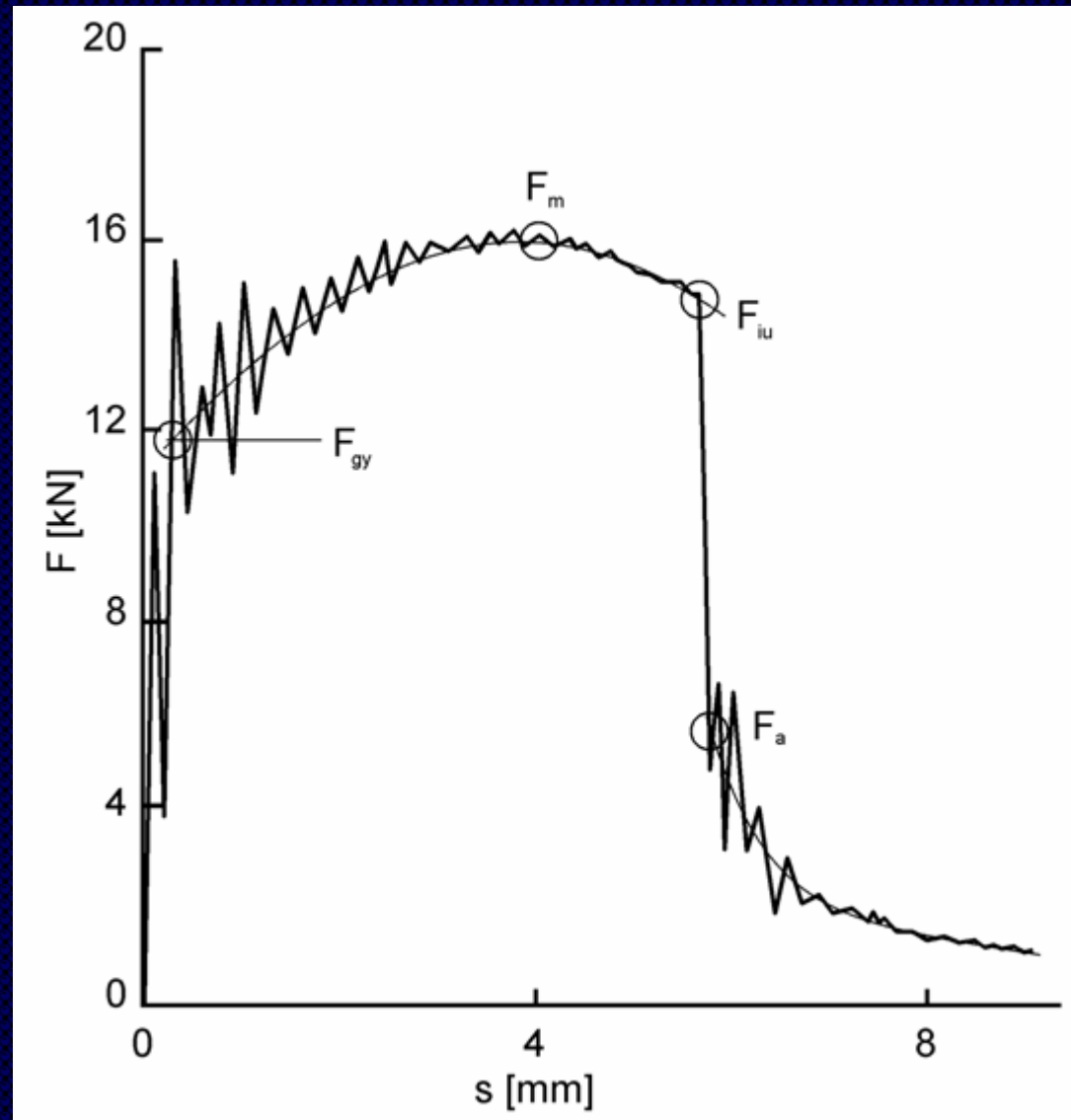
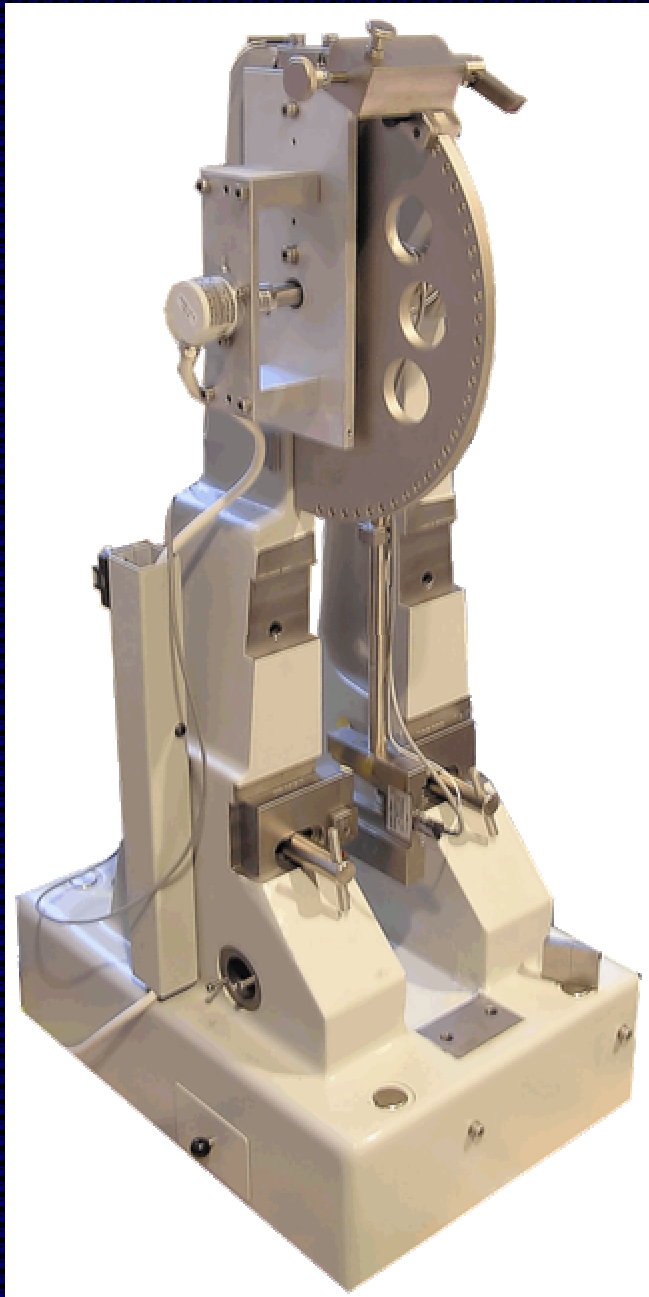
Co se měří při zkoušce rázem v ohybu



Zkouška rázem v ohybu



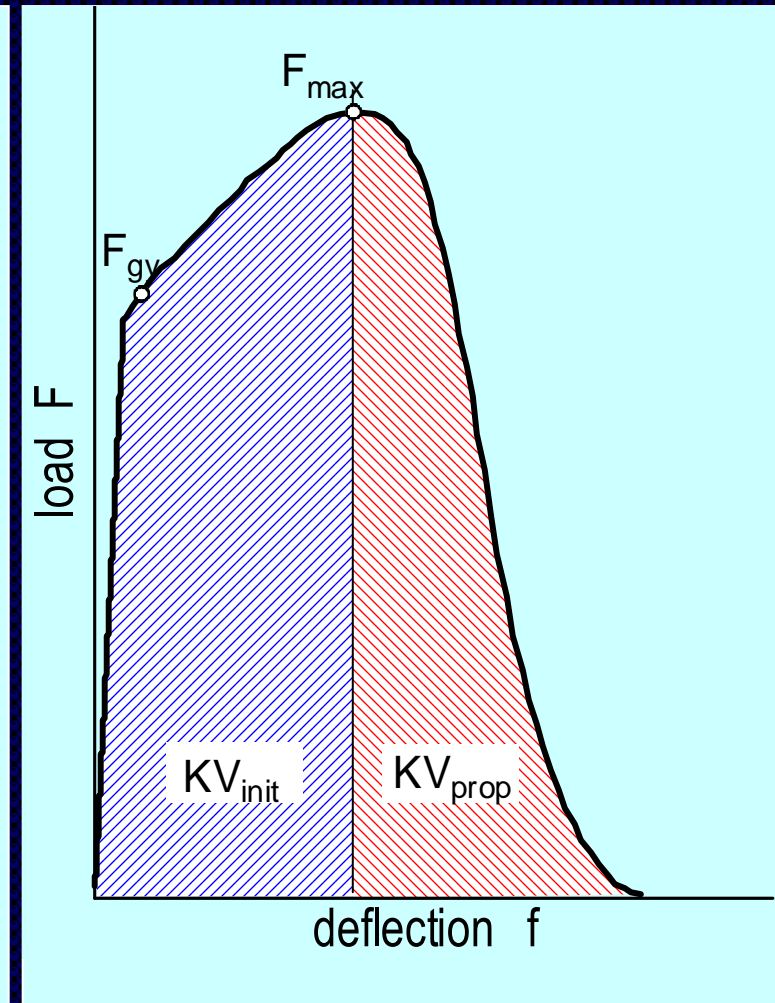
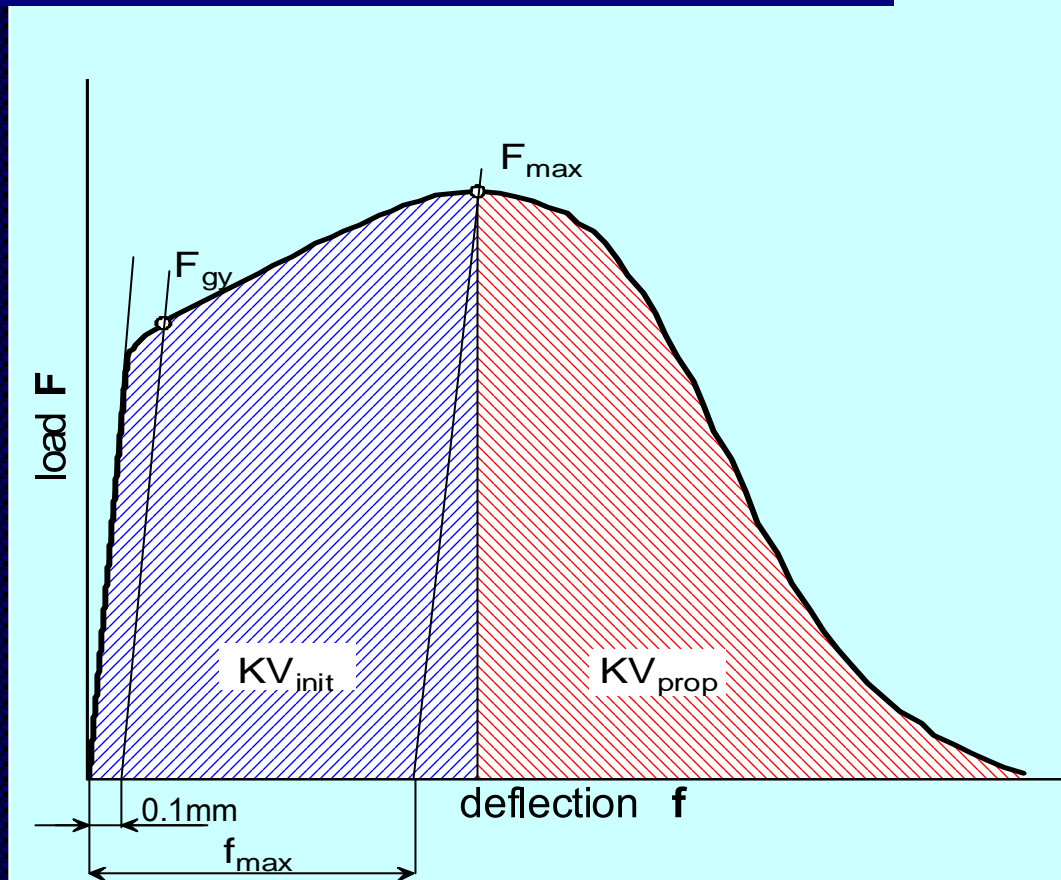
Zkouška rázem v ohybu instrumentovaná



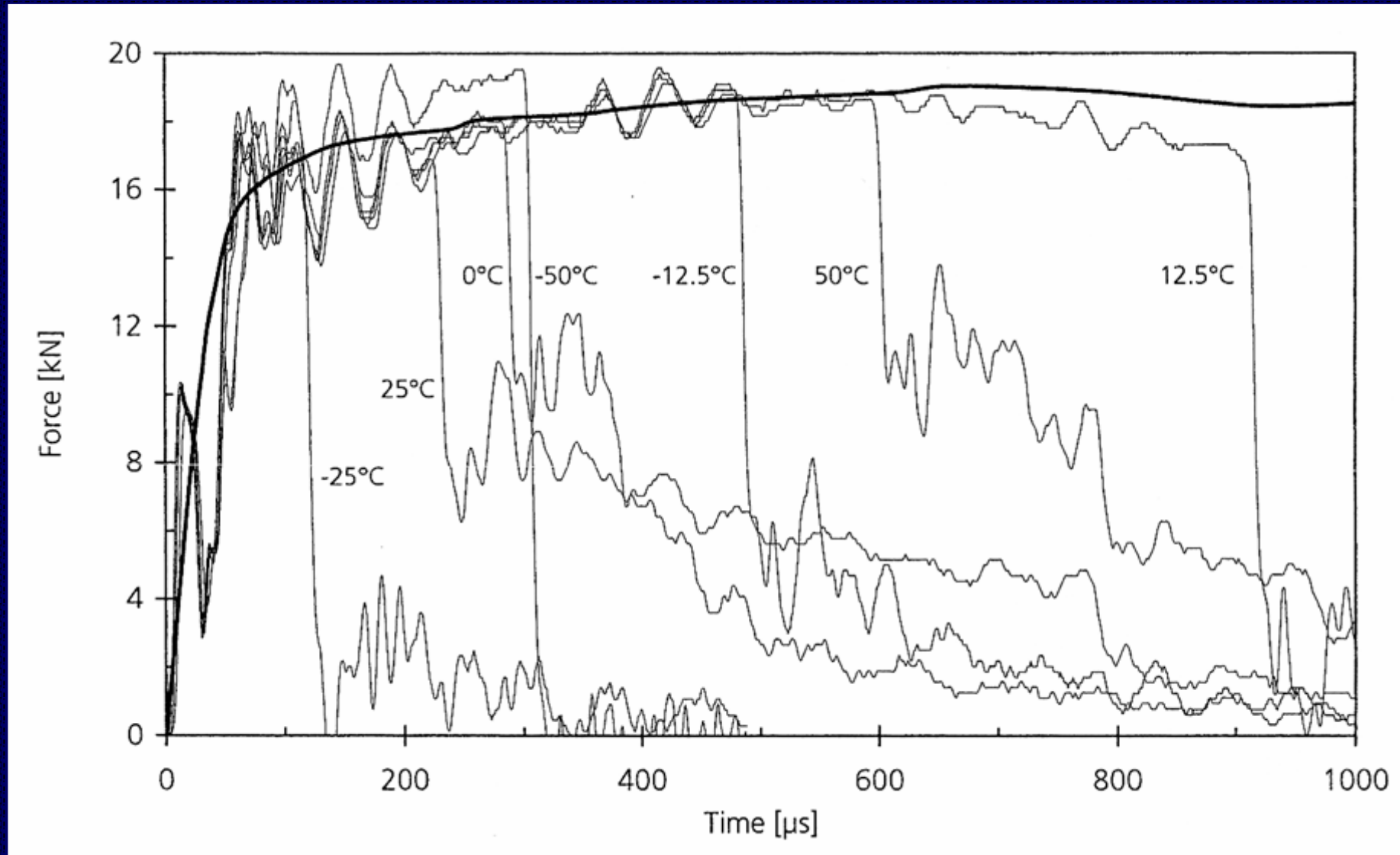
Zkouška rázem v ohybu instrumentovaná

Stejná KV

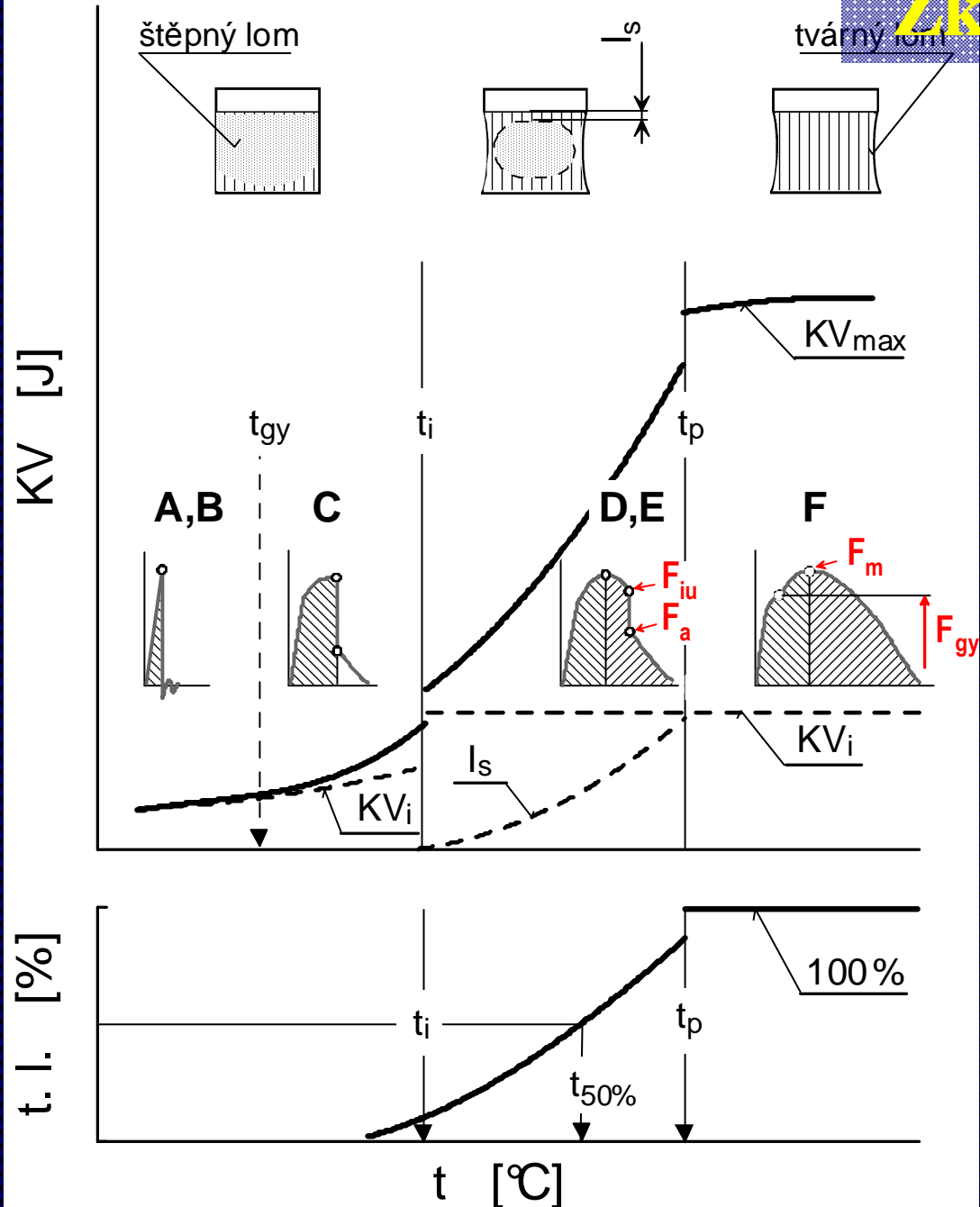
- různé lomové síly
- různé energie na iniciaci



Zkouška rázem v ohybu instrumentovaná



Zkouška rázem v ohybu instrumentovaná

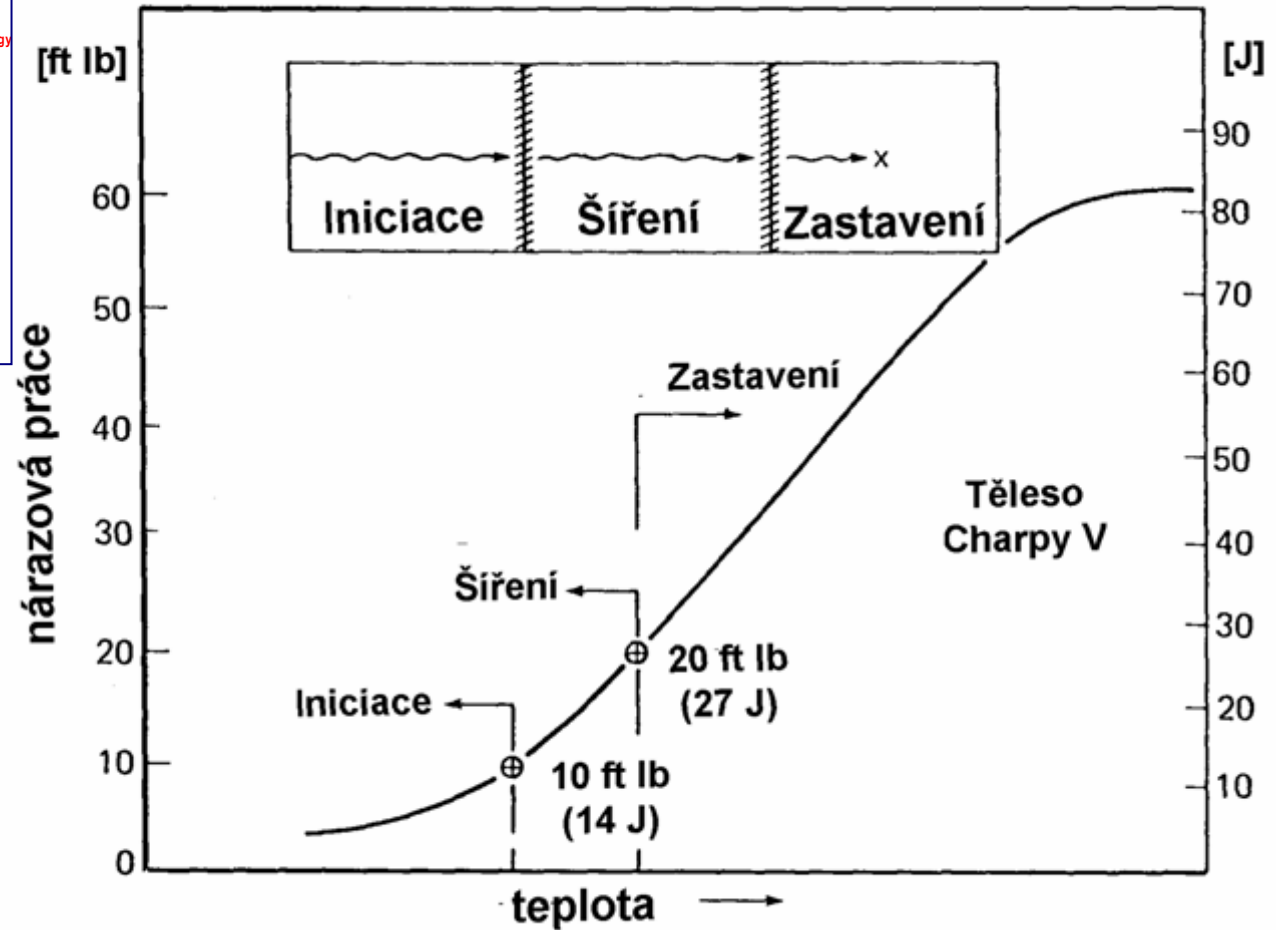
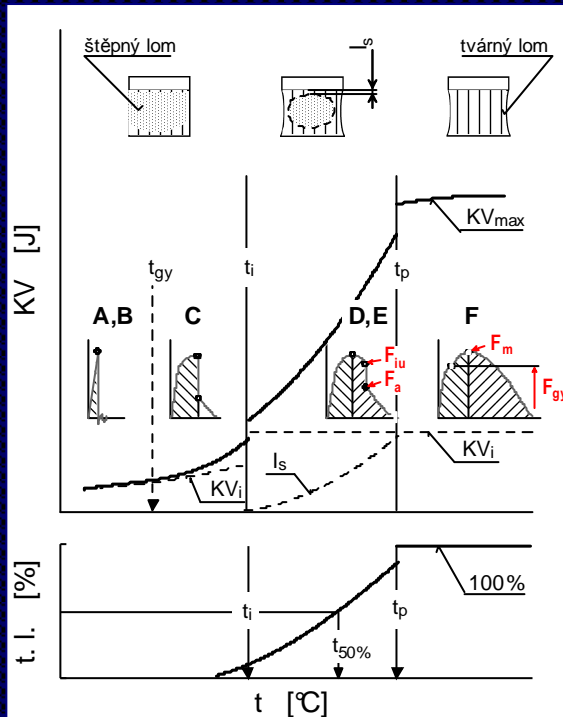


Zkouška rázem v ohybu

$$KV = 20 \text{ ft.lb} = 27 \text{ Joule}$$

$$KCV = 27 / 0,8 \approx 35 \text{ J/cm}^2$$

ouška



Zkouška rázem v ohybu

Co je to vrubová houževnatost?

V národní předmluvě k ČSN EN 10 045-1 je uvedeno pro materiálové listy ocelí, že

ČR má výjimku jednak v hloubce U-vrubu a jednak materiálové charakteristice měřené na Charpyho kladivu - vrubová houževnatost

$$KCV(KCU) = \frac{KV}{S_n} \left(\frac{KU}{S_n} \right) [\text{J.cm}^{-2}]$$

KCU 5, KCU 3

Oceli ČSN 41 6220; ČSN 41 7254

Zkouška rázem v ohybu

využití srovnávací zkoušky
pro označení kvality materiálu

Norma ISO 630/2000

FeE 235 (27 J); FeE 275 (27 J); FeE 355 (40 J)

Stupně jakosti: A/bez; B/+20°C; C/0°C; D/-20°C; E/-50°C

Norma ČSN EN 10 025: *Výrobky válcované za tepla z nelegovaných konstrukčních ocelí*

S 182; S 235; S 275; S355

Stupně jakosti: (nárazová práce) J / 27J; K / 40J; L / 60J
(teplota) R/+20; 0/0°C; 1/-10°... 5/-50°C

Zkouška rázem v ohybu

využití srovnávací zkoušky
pro označení kvality materiálu

Ušlechtilé S275, S355 a jakostní oceli S420 a 460

ČSN EN 10 113 *Výrobky válcované za tepla ze
svařitelných jemnozrnných konstrukčních ocelí*

N – normalizačně žíhané; M – řízeně válcované,
garance KV za teplot (20, 0, -10, -20)°C

NL – normalizačně žíhané; ML – řízeně válcované,
garance KV za teplot (20, 0, -10, -20, -50)°C

Zkouška rázem v ohybu

využití srovnávací zkoušky
pro označení kvality materiálu

Jakostní oceli S460 až S920

ČSN EN 10 137 *Plechý a široká ocel s vyšší mezí kluzu v
zušlechtěném nebo vytvrzeném stavu*

QL – zušlechtěno; AL – vytvrzeno,

garance KV za teplot (20, 0, -10, -20)°C

QL1 – zušlechtěno; AL1 – vytvrzeno,

garance KV za teplot (20, 0, -10, -20, -50)°C

Zkouška rázem v ohybu

**jak se určí hodnota KV při dané teplotě
např. KV = 27 J**

- rozptyl absorbované energie v tranzitní oblasti
- na 3 tělesech při dané teplotě se určí KV,
dvě tělesa musí $KV \geq 27 \text{ J}$,
pouze jedno může $KV < 27 \text{ J}$, ale $> 19 \text{ J}$ (70% z 27 J),
pokud střední hodnota ze tří zkoušek $KV \geq 27 \text{ J}$,
materiál vyhovuje (KV 27 J).
- není-li splněno, pak další 3 tělesa při dané teplotě
- hodnotit všech 6 hodnot, pro 4 musí $KV \geq 27 \text{ J}$
jedno může mít $27 \text{ J} > KV > 19 \text{ J}$
a jedno těleso $KV < 19 \text{ J}$.
střední hodnota ze všech 6 musí $KV \geq 27 \text{ J}$

Zkouška rázem v ohybu

využití srovnávací zkoušky
pro volbu materiálu – starší normy

Svařované nádoby ČSN 69 0010 – materiál

Pro tloušťku stěny >21 mm je pro provozní teplotu t_{pr}
předepsána hodnota KCV v závislosti na $R_{p0,2}$

R_{eH} [MPa]	do 250	250/300	300/350	350/400	400/450	nad 450
KCV(t_{pr}) [J.cm ⁻²]	30	40	50	60	75	90

Zkouška rázem v ohybu

využití srovnávací zkoušky
pro volbu materiálu – starší normy

Svařované konstrukce - mosty – pr ENV 1993 do roku
1997

Určení selekčního čísla S_0 podle kterého se stanoví teplota
při níž materiál musí vykazovat hodnotu $KV=27\text{ J}$

$$S_0 = (t_{prov} + 55) + k_{tl.st.} + k_{dyn. zat} + k_{svař} + k_{žih}$$

S_0	> 40	40 až 32	31 až 20	19 až 15	14 až 1	0
$t_{27J} [^{\circ}C]$	+20	0	-15	-30	-50	zvl.uj.

Zkouška rázem v ohybu

využití srovnávací zkoušky
pro volbu materiálu – nové normy

Svařované konstrukce - mosty – pr ENV 1993

Určení tranzitní teploty materiálu

$$T_{CD} = T_{100} + \Delta T_f + \Delta T_a + \Delta T_s$$

V případě mostu tato tranzitní teplota pro naše klimatické podmínky musí být nižší nebo rovna -30°C

Zkouška rázem v ohybu

využití srovnávací zkoušky pro volbu materiálu – nové normy

Netopené tlakové nádoby ČSN EN 13 445

3 úrovně

- 1 - materiál musí mít zaručenou hodnotu KV za RT nebo při provozní teplotě
- 2 - podle provozních podmínek na základě nomogramu z normy se určí teplota, při které musí materiál vykazovat danou hodnotu KV
- 3 - nádoba má defekty – použije se přístup LM

Zkouška rázem v ohybu

využití srovnávací zkoušky

závěr



Hodnoty KV nelze použít přímo pro volbu materiálu případně k výpočtu konstrukce.

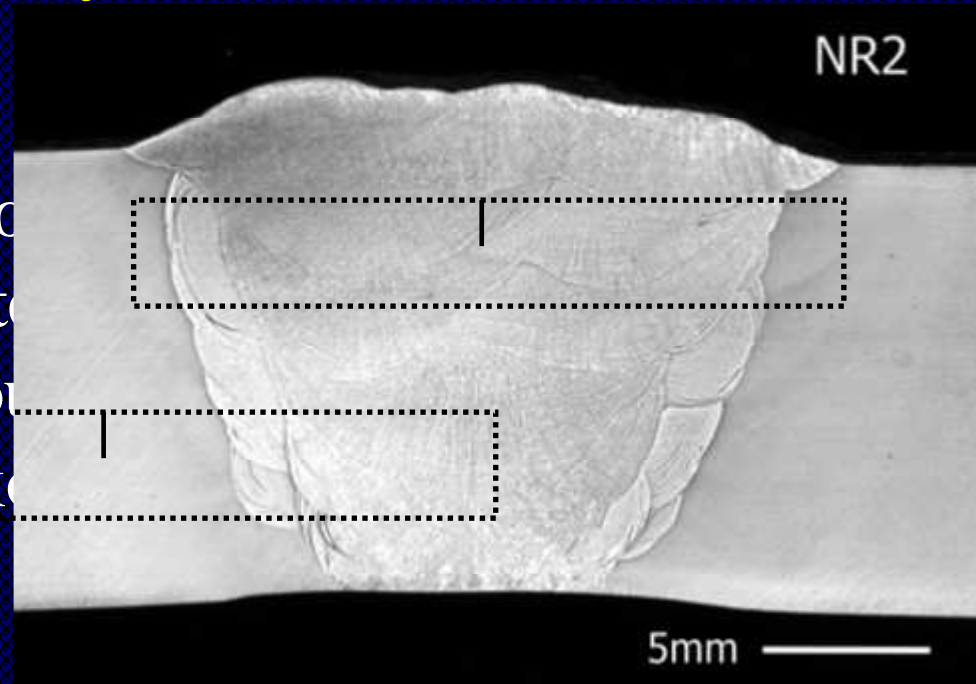
Využívají se zkušenosti z praxe.

Nové standardy jsou postaveny na korelaci mezi T_{27J} a hodnotou K_{Ic}

Zkouška rázem v ohybu

využití srovnávací zkoušky zkoušky svarů

ČSN ISO 15614-1 Standardní postupy pro svařování kovových materiálů - Část 1: Obloukové svařování ocelí a ocelových nikelů



ČSN EN 875 Destruktivní zkoušky svarových spojů kovových materiálů - Zkoušky rázem v ohybu - Umístění zkušebních tyčí, orientace vrubu a zkoušení

Lomový diagram podle Pelliniho

Specifická zkouška - Robertsonova

Tranzitní teplotu oceli ovlivňuje

$TT = f(\text{tvar defektu, tloušťka plechu, rychlost zatěžování})$

Plzeň Bolevec – škoda JS - Robertsonova zkouška

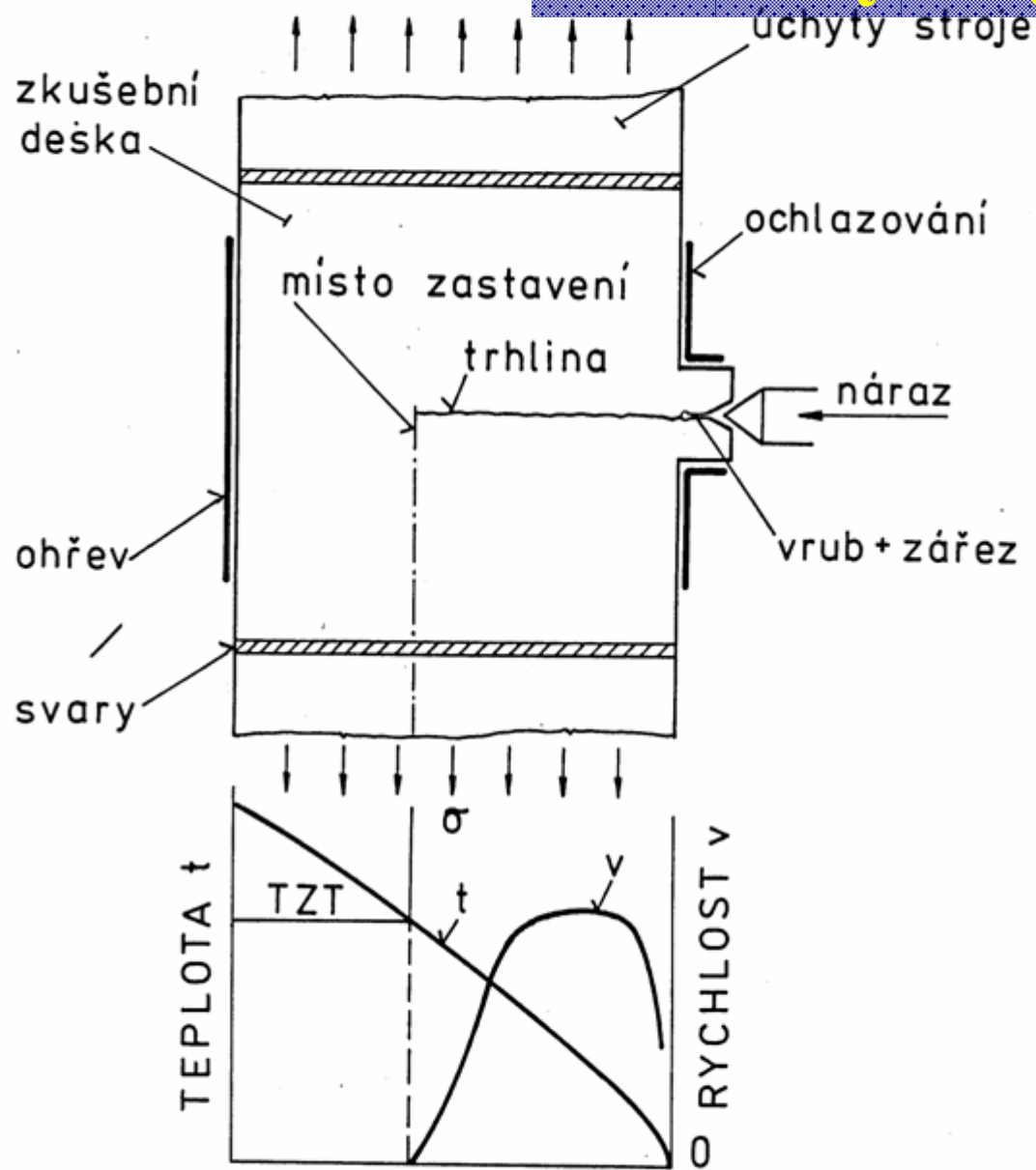
zkušební stroj 80 GN (8 000 tun)

zkušební tělesa o průřezu (0,25 x 1,2) m

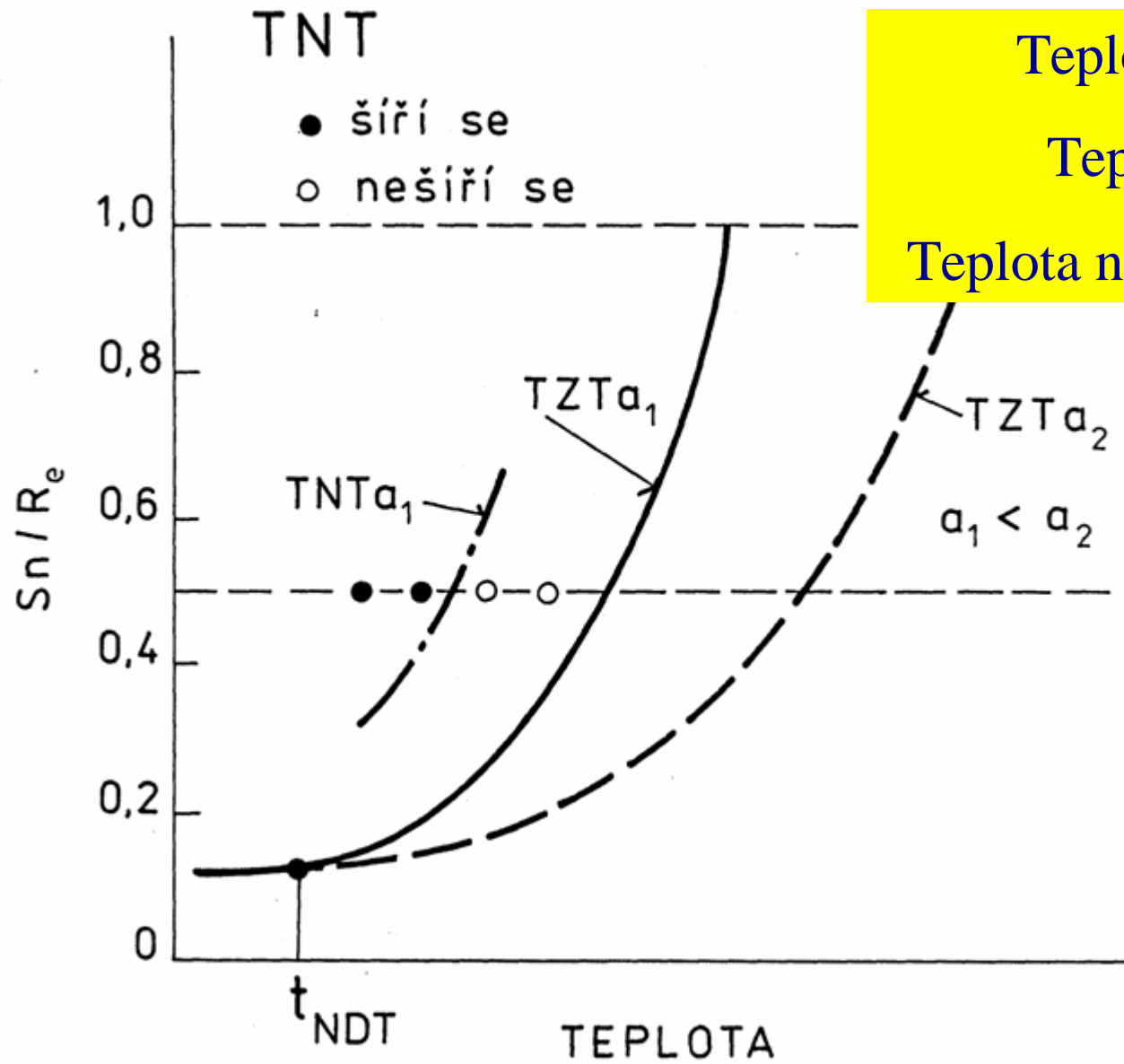
Cíl: podmínky zkoušky přiblížit reálným podmínkám a stanovit

- a) Zkouška s gradientem teplot – teplotu zastavení trhliny
- b) Zkouška při konstantní teplotě – teplotu nešíření trhliny

Lomový diagram podle Pelliniho



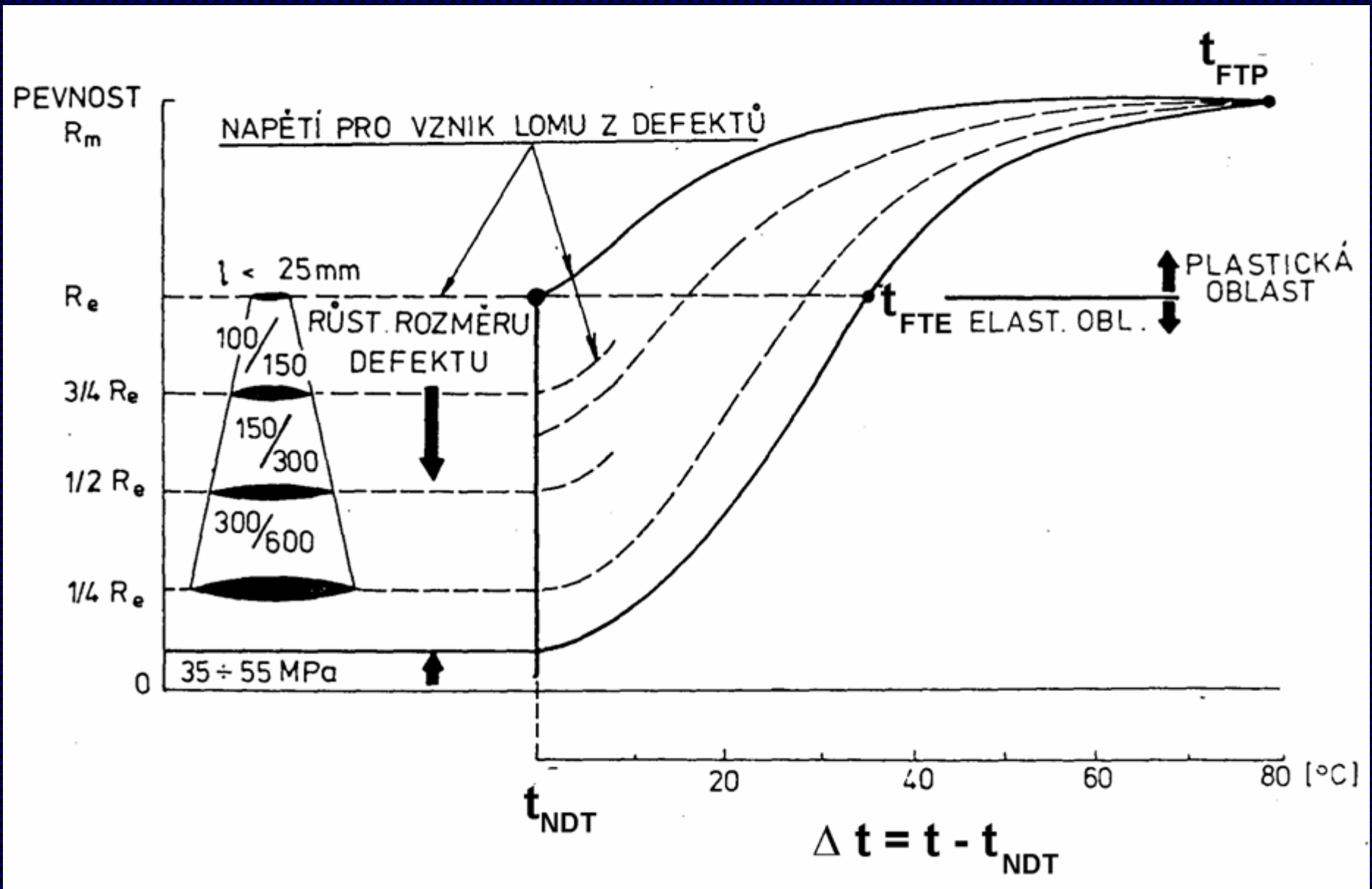
Lomový diagram podle Pelliniho



Teplota zastavení trhliny
Teplota nešíření trhliny
Teplota nulové houževnatosti

35 – 55 MPa

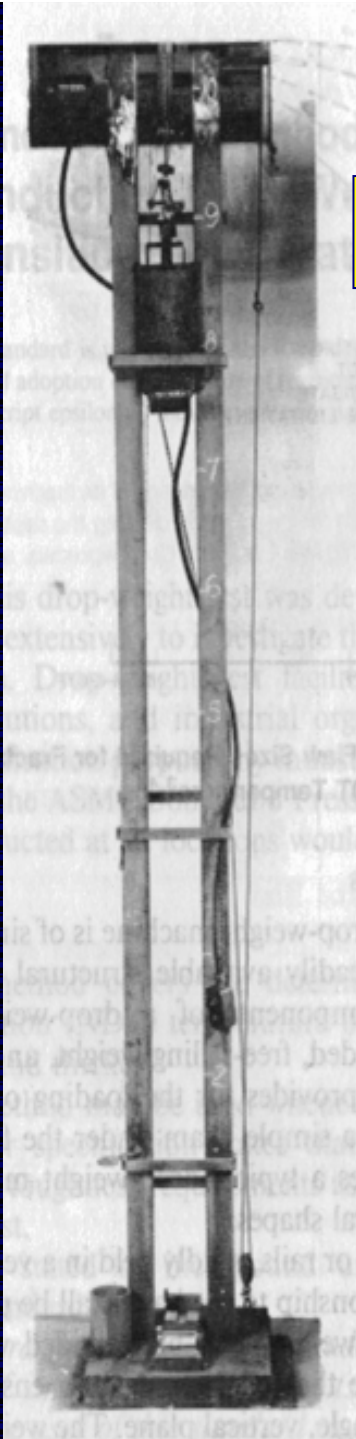
Lomový diagram podle Pelliniho



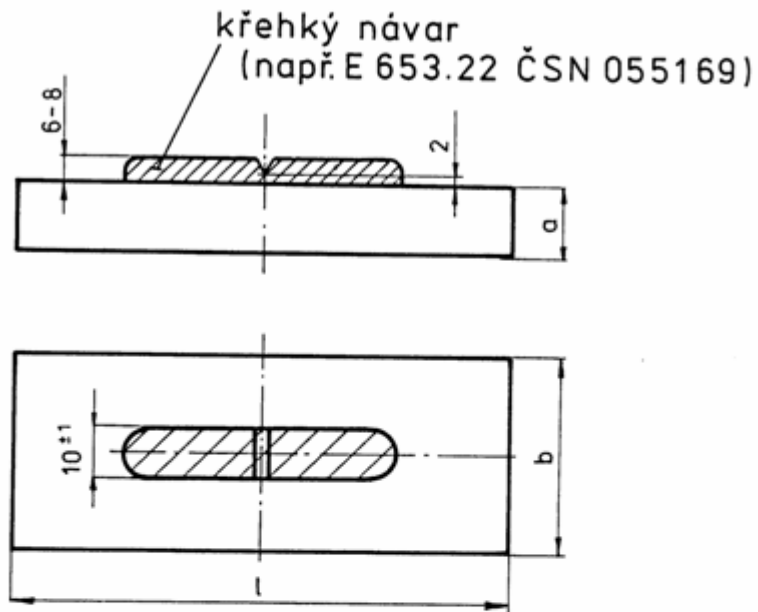
Zkouška padajícím závažím

ČSN 42 0349 (*DWT drop weight test*)

Zkušební zařízení je padostroj
 t_{NDT} - teplota nulové houževnatosti

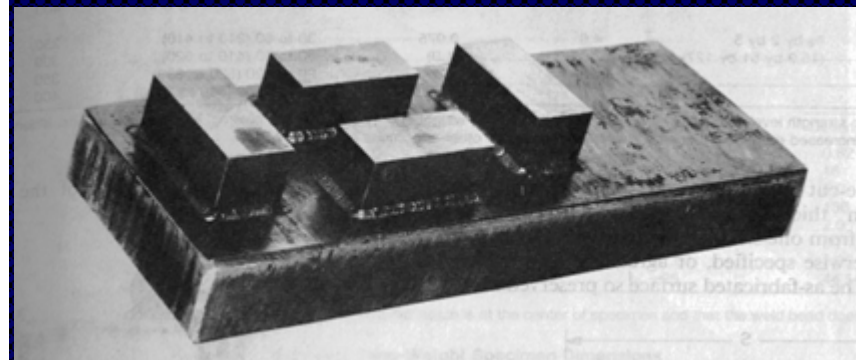
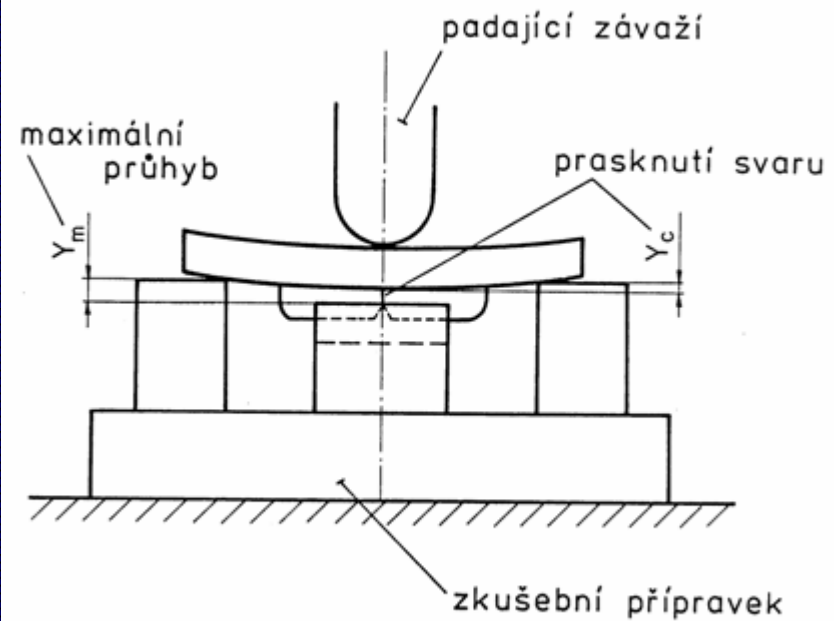


Zkouška padajícím závažím



OZNAČENÍ	a	b	l
16	16	50	130
19	19	50	130
25	25	90	360

Zkušební těleso a ČSN 42 0349



Zkouška padajícím závažím

Cíl zkoušky – stanovení teploty t_{NDT}

limitní teplota nad níž nedojde k nestabilnímu lomu z malého defektu do základního materiálu při dynamickém namáhání napětím kolem meze kluzu

t_{NDT} - nejvyšší teplota při které ještě dojde k porušení zkušebního tělesa (určuje se s přesností $\pm 5^{\circ}\text{C}$)

Použití – $t_{\text{prov}} = t_{\text{NDT}} + \Delta t$ ($\Delta t \cong 17^{\circ}\text{C}$)

dynamicky namáhané svařované konstrukce – rám žel. vagonů..... rotory TG

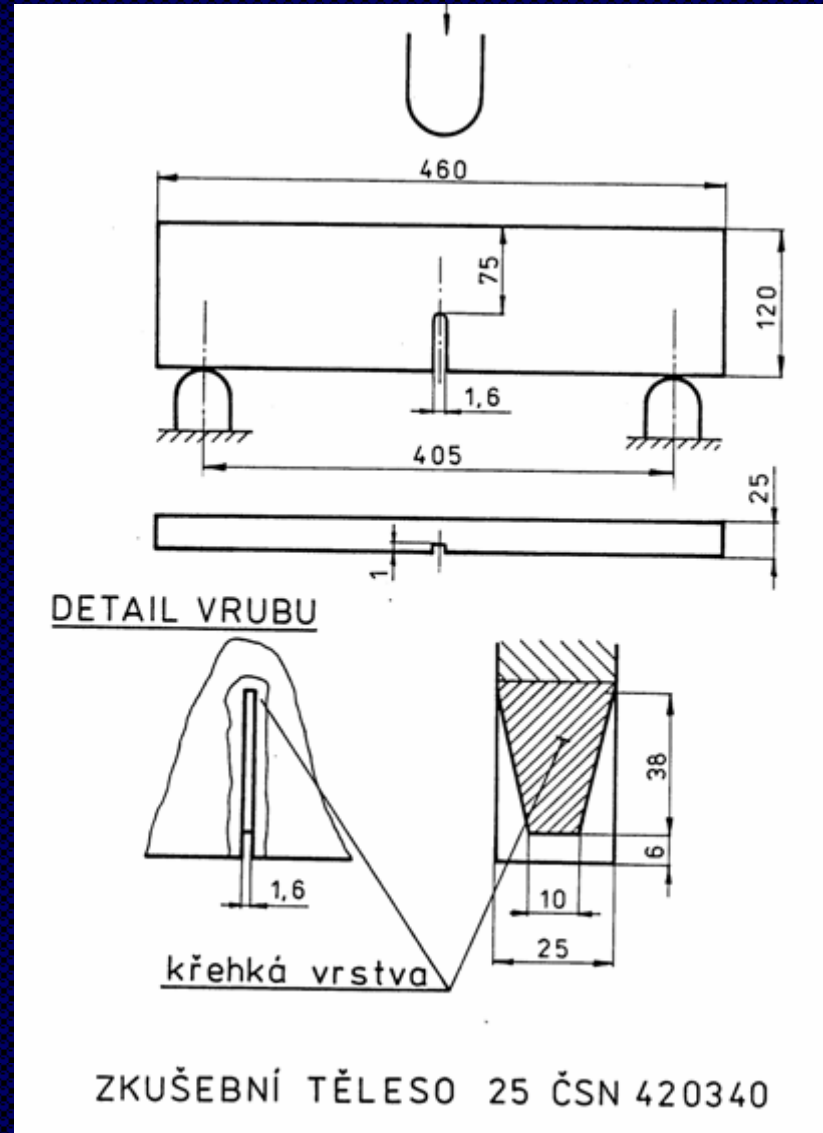
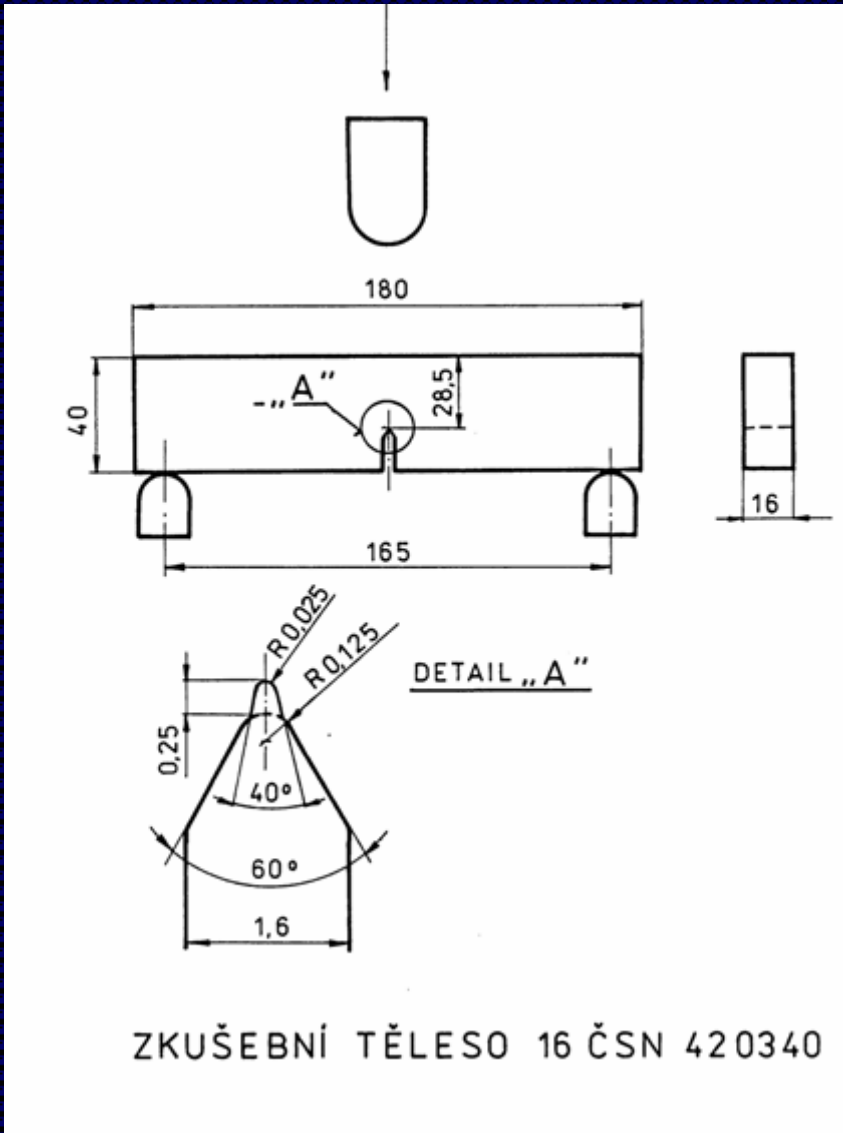
Zkouška rázem v ohybu velkých těles

ČSN 42 0340 (*DT dynamic tear*)

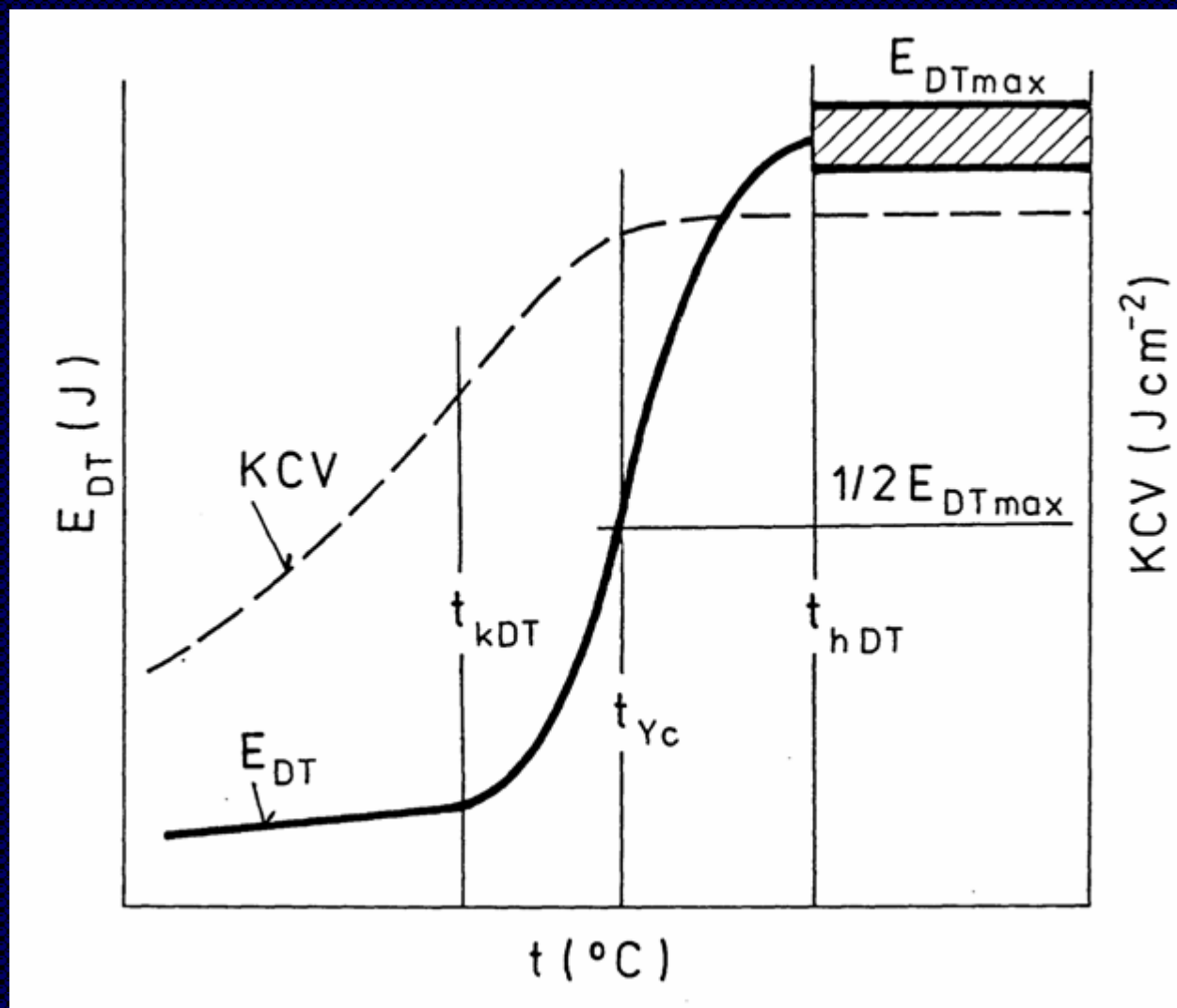
Zkušební zařízení : obří rázové kladivo 10kJ

Měří se nárazová práce DT energie – práce spotřebovaná na šíření lomu

Zkouška rázem v ohybu velkých těles



Zkouška rázem v ohybu velkých těles



Zkouška rázem v ohybu velkých těles

Existuje korelace mezi t_{yc} a t_{FTE}

Podle této TT se volila teplota vody při zkoušce tlakových nádob v KPS.

Zkouška rázem v ohybu velkých těles původní tloušťky

ČSN 42 0346 (*DWTT drop weight tear test*)

zkoušku zavedla „American Gas Association“

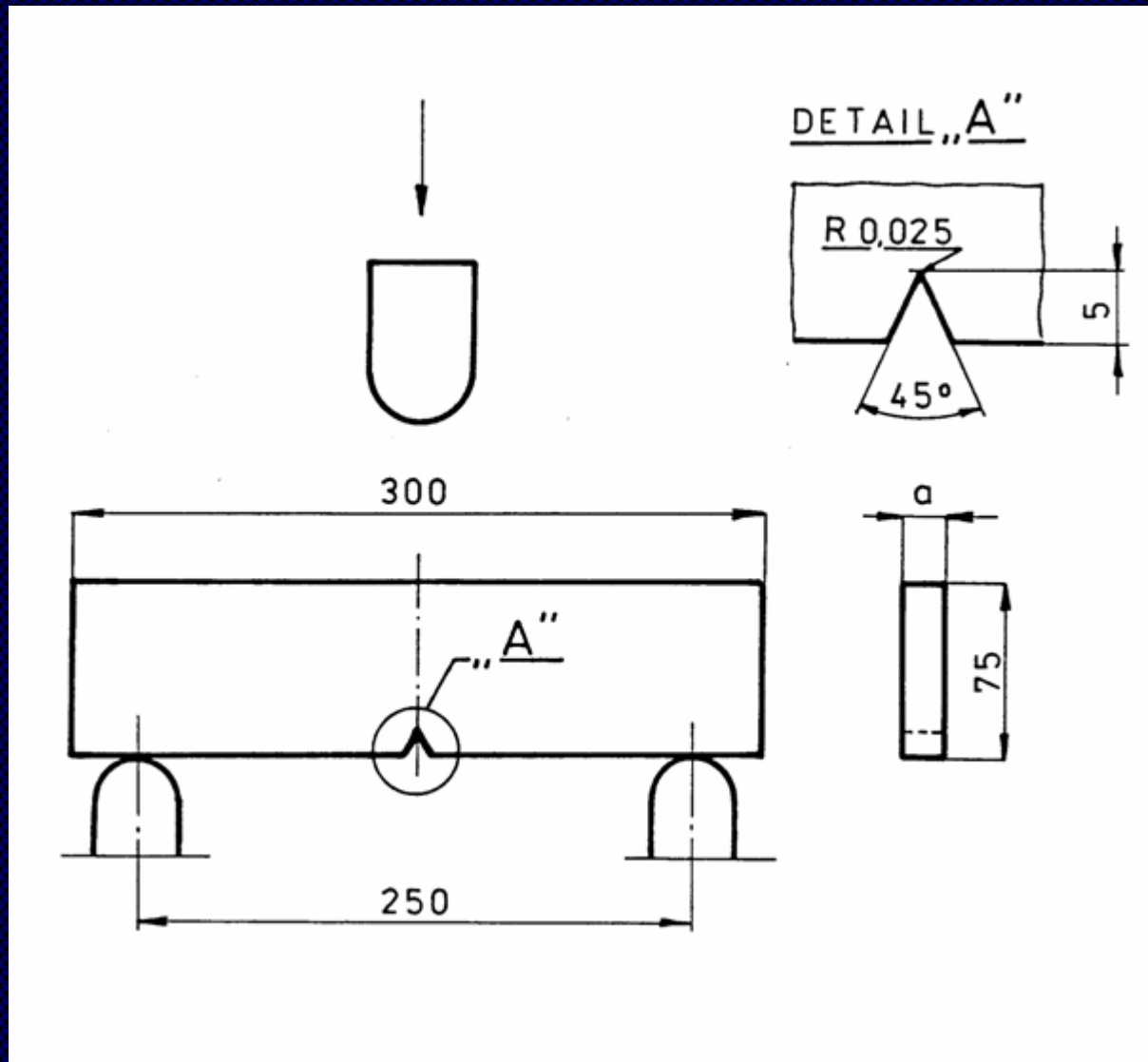
cílem zkoušky je stanovit přechodovou teplotu ocelových plechů na výrobu tlakových potrubí (nádob) ve kterých je plyn

zkušební zařízení – kyvadlové kladivo nebo padostroj,

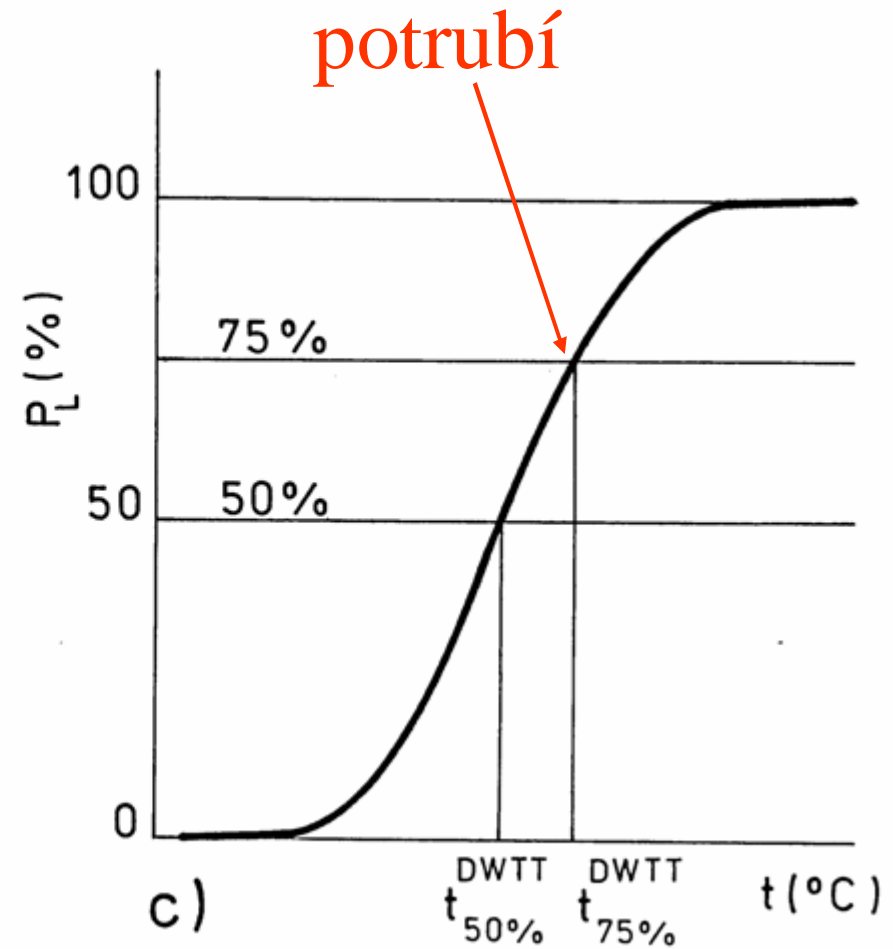
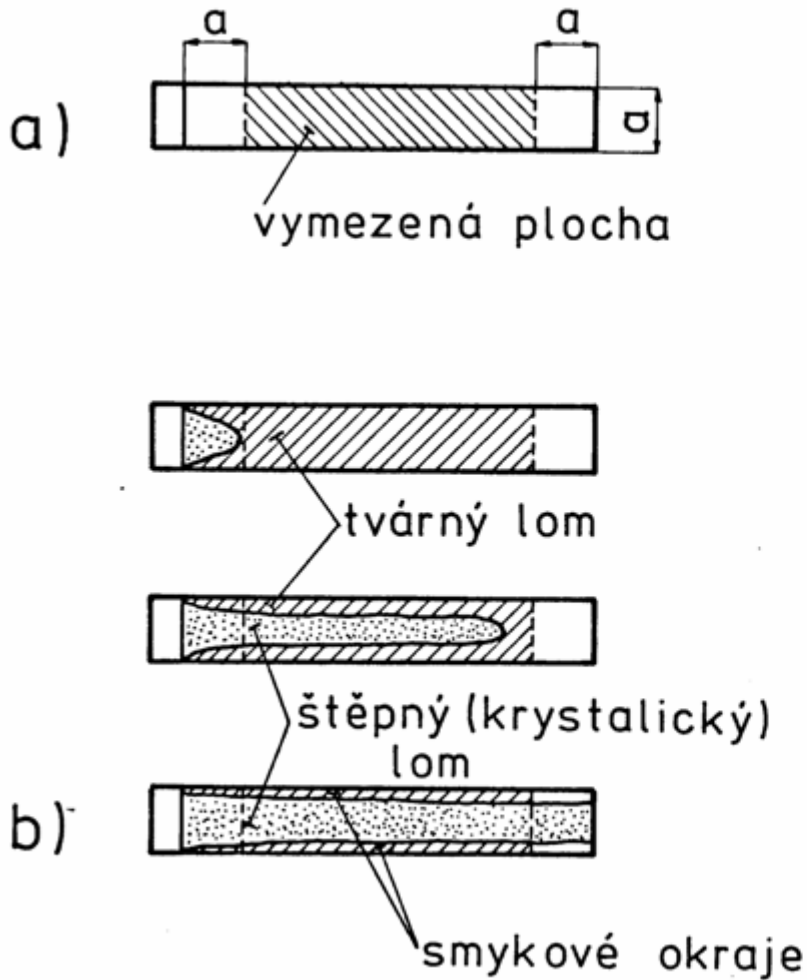
tloušťka tělesa odpovídá tloušťce stěny výrobku.

hodnotí se vzhled lomové plochy

Zkouška rázem v ohybu velkých těles původní tloušťky



Zkouška rázem v ohybu velkých těles původní tloušťky




Rozdělení zkoušek podle účelu

Zkoušky

- ❖ Zkouška rázem v ohybu
- *Srovnávací*  $t_{50\%}$ - FATT, t_{27J} , DBTT atd.
- ❖ Instrumentovaná zkouška rázem v ohybu
- *Specifické* KV_i , KV_p , t_{GY} , atd.
- ❖ Tranzitně teplotní koncepce

Rozdělení zkoušek podle účelu

Zkoušky

- *Srovnávací*
 - ❖ Zkouška Robertsonova
TZT, TNT
 - ❖ Pelliniho diagram - t_{NDT} , t_{FTE}
- *Specifické* 
 - ❖ Zkouška padajícím závažím DWT
- t_{NDT}
 - ❖ Zkouška rázem v ohybu
velkých těles DT - t_{Yc}
 - ❖ Zkouška rázem v ohybu těles
původní tloušťky DWTT - t_{50}^{DWTT}



- TT vyjadřuje odolnost materiálu vůči KL z hlediska šíření (zastavení) lomu. Nic neříká o iniciaci lomu !!!
- Materiály, které nevykazují tranzitní lomové chování (hliníkové slitiny, keramika, vysokopevné oceli) nelze hodnotit pomocí TT.

Houževnatost

- i.** Základní pojmy (tranzitní lomové chování ocelí, teplotní závislost pevnostních vlastností, fraktografie)
- ii.** (Empirické) zkoušky houževnatosti (Charpy, TNDT)
- iii.** Lineárně-elastická lomová mechanika (Irwin, zkoušky lomové houževnatosti)
- iv.** Elasto-plastická lomová mechanika (zkoušky, interpretace, podmínky šíření trhliny)