

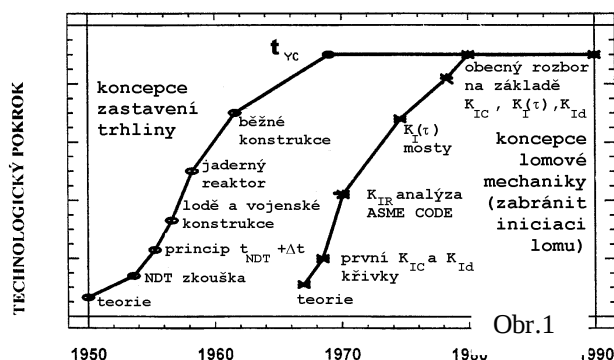


Metody zkoušení odolnosti ocelí proti vzniku křehkého lomu

Zkoušení odolnosti materiálu vůči křehkému lomu může mít různý účel:

1. Posouzení pravděpodobnosti výskytu křehkého lomu daného materiálu namáhaného za určitých podmínek (zvonovina, revolver).
2. Výběr nejvhodnějšího materiálu z materiálů, které jsou k dispozici pro určité použití (klasifikace ocelí, BAM).
3. Kontrola kvality při výrobě a při přejímce (dodací podmínky konstrukčních ocelí, most ČKD Blansko)
4. Vyšetřování příčin lomů, které se vyskytly v provozu.
5. Získání údajů, které mohou být použity přímo pro potřeby konstrukce (např. nejnižší provozní teplota, maximální přípustná délka trhliny a podobně).

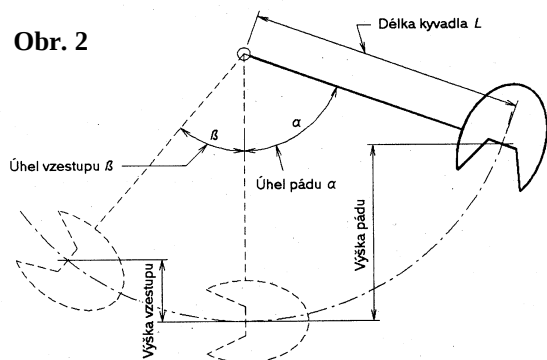
K těmto účelům bylo vyvinuto velké množství zkoušek, které můžeme rozdělit na:



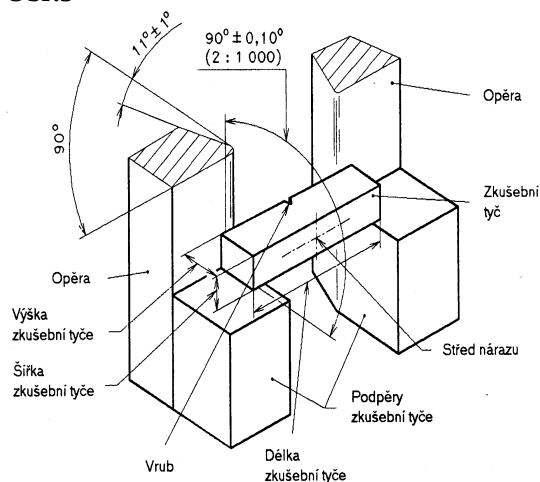
- Srovnávací zkoušky – plní účel podle bodů 1-3 $\Rightarrow$ základní požadavek kladený na tento typ zkoušek je, že zkouška musí být a) laciná b) jednoduchá c) reprodukovatelná * k tomuto účelu se nejčastěji používá zkouška rázem v ohybu
- Specifické zkoušky – pro potřeby konstruktéra vybrat vhodnou ocel pro konstrukci bezpečnou z hlediska křehkého lomu. Vývoj základních filozofií jak zabránit vzniku havárie konstrukce křehkým lomu a z nich plynoucí typy zkoušek jsou uvedeny na obr. 1

Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho ČSN EN 10 045-1 (v knihovně hledáme pod číslem 42 0381) a její přesný název je *Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho – Část 1: Zkušební metoda (V a U vruby)*.

Obr. 2



Obr.3



Podstata zkoušky spočívá v přeražení zkušební tyče jedním rázem kyvadlového kladiva za podmínek stanovených normou, přičemž zkušební tyč má uprostřed vrub a je podepřena na obou koncích. Měřená veličina - nárazová práce je měřítkem odolnosti materiálu proti rázovému namáhání a stanovuje se v Joulech. Princip kyvadlového kladiva je na obr. 2. Energie kyvadlového kladiva je dána součinem výšky pádu a hmotnosti beranu kladiva – jmenovitá hodnota počáteční potenciální energie kladiva. V laboratořích pro zkoušení kovových materiálů se nejčastěji používají kladiva o energii 300 Joule. Nárazová práce (K) - práce spotřebovaná na přeražení zkušebního tělesa (obr. 3) umístěného ve spodní úvratí kladiva – je jednoznačnou funkcí rozdílu výšek pádu a vzestupu. Technicky je jednodušší místo výšky měřit úhel vzestupu a z něj určovat hodnotu nárazové práce. Na kyvadlových kladivech je v místě zavěšení kyvadla vlečná ručička, pomocí které se měří úhel vzestupu. Stupnice pod ručičkou je cejchována jak ve stupních tak i v joulech. Modernější kladiva jsou vybavena elektronickými snímači úhlu a číslicovým ukazatelem nárazové práce.

Zkušební tyče

Základní zkušební tyč musí být dlouhá 55 mm a čtvercového průřezu s délkou strany 10 mm. Uprostřed její délky je vrub. Jsou předepsány dva typy vrubů:

- a) V-vrub, s úhlem 45°, hloubkou 2mm a poloměrem zaoblení u dna (kořene) vrubu 0,25 mm. Není-li možno ze zkoušeného materiálu zhotovit základní



zkušební tyče, musí se použít zkušební tyč menších rozměrů o šířce 7,5 mm nebo 5 mm. Vrub je pak na jedné z užších ploch. (S těmito tělesy se hodnotí např. plechy pro výrobu kabin traktorů viz. norma ISO 3471 Earth-moving machinery – Roll-over protective structures – Laboratory tests and performance requirements, mechanismy pro zemní práce – Ochrané konstrukce pro případ převrnutí – Laboratorní zkoušky a prováděcí požadavky).

b) U- vrub nebo vrub ve tvaru klíčového otvoru má hloubku 5 mm a poloměr zaoblení dna vrubu 1 mm.

Rozměry zkušebních tyčí a jejich mezní úchytky jsou uvedeny v následující tabulce.

Označení	Zkušební tyč s U vrubem		Zkušební tyč s V vrubem	
	Jmenovitý rozměr	Mezní úchytky	Jmenovitý rozměr	Mezní úchytky
Délka	55 mm	$\pm 0,60$ mm	55 mm	$\pm 0,60$ mm
Výška	10 mm	$\pm 0,11$ mm	10 mm	$\pm 0,11$ mm
Šířka:				
- základní zkušební tyč	10 mm	$\pm 0,11$ mm	10 mm	$\pm 0,11$ mm
- zkušební tyč menších rozměrů	-	-	7,5 mm	$\pm 0,11$ mm
- zkušební tyč menších rozměrů	-	-	5 mm	$\pm 0,06$ mm
Úhel vrubu	-	-	45°	$\pm 2^\circ$
Výška zkušební tyče v místě vrubu	5 mm	$\pm 0,09$ mm	8 mm	$\pm 0,06$ mm
Poloměr zaoblení dna vrubu	1 mm	$\pm 0,07$ mm	0,25 mm	$\pm 0,025$ mm
Vzdálenost mezi rovinou souměrnosti vrubu a konců zkušební tyče				
- při ručním vkládání zkušební tyče na podpěry	27,5 mm	$\pm 0,42$ mm	27,5 mm	$\pm 0,42$ mm
- při automatickém vkládání zkušební tyče na podpěry	27,5 mm	$\pm 0,165$ mm	27,5 mm	$\pm 0,165$ mm
Úhel mezi rovinou souměrnosti vrubu a podélnou osou zkušební tyče	90°	$\pm 2^\circ$	90°	$\pm 2^\circ$
Úhel mezi sousedními podélnými plochami zkušební tyče	90°	$\pm 2^\circ$	90°	$\pm 2^\circ$

Při výrobě zkušebních tyčí je třeba dbát na to, aby ovlivnění materiálu např. tvářením za studena nebo ohřevem bylo co nejmenší. V případě výroby vrubu je třeba, aby ve vrubu nebyly pouhým okem viditelné rýhy rovnoběžné se dnem (kořenem) vrubu. Tato zásada platí i při označování zkušebních tyčí. Označení zkušební tyče může být provedeno na kterékoliv ploše, která nepřijde do styku s podpěrami nebo opěrami a to ve vzdálenosti alespoň 5mm od vrubu.

Materiálová charakteristika

Zkouškou rázem v ohybu podle Charpyho se v případě kovových materiálů určuje jediná materiálová charakteristika a tou je nárazová práce. Základní zkušební podmínky odpovídají jednak použití kladiva o energii 300 joule a použití zkušební tyče základních rozměrů.

Nárazová práce se označuje symbolem - KU pro zkušební tyč s U-vrubem

- KV pro zkušební tyč s V-vrubem

Například KV = 121 J znamená, že nárazová práce 121 joule byla určena na kladivu s počáteční energií 300 J na základní zkušební tyči s V-vrubem. V případě, že je použito rázového kladiva s počáteční energií jinou než 300 J a nestandardní zkušební tyče s V-vrubem, pak se tyto skutečnosti projeví v symbolice.

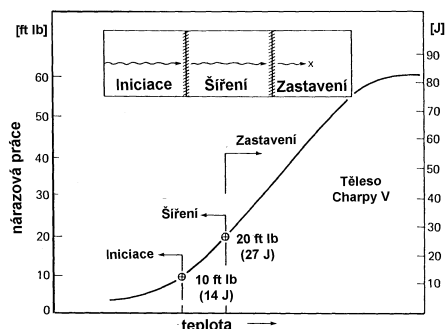
Například KV 150/7,5 = 83 J znamená, že nárazová práce 83 joule byla určena na kladivu s počáteční energií 150 J na zkušební tyči s V vrubem, která měla tloušťku 7,5 mm.

Norma ČSN EN 10045-1 má národní přílohu (informativní) ve které se říká, že v České republice se zkouška rázem v ohybu provádí na zkušebních tyčích s U- vrubem s jinou hloubkou vrubu než je 5mm (např. 2mm a 3mm) a jiných šířkách tyčí než je 10 mm (například 7,5mm a 5 mm), viz materiálové listy např. 416220, 417254, 417346. Další,

pouze naší národní specialitou, je stanovení hodnoty vrubové houževnatosti jako podílu nárazové práce k ploše průřezu pod vrubem a to v nestandardních jednotkách Joule/cm². Tyto dvě dříve běžné věci, nestandardní tyč s U-vrubem a pojem vrubová houževnatost, nejsou v souladu s platnou normou ČSN EN 10045-1.

← Obr. 4

Použití zkoušky rázem v ohybu





Zkouška rázem v ohybu je nejstarší, nejjednodušší a v praxi stále nejrozšířenější zkouškou hodnocení odolnosti oceli proti křehkému lomu. Při zkoušce se určuje jediná veličina – nárazová práce, u oceli má význam závislost této nárazové práce na teplotě.

□ *Použití zkoušky rázem v ohybu při výběru materiálu pro konstrukci bezpečnou z hlediska křehkého lomu.*

Původně se mělo za to, že tato zkouška umožní posoudit vhodnost dané oceli k použití pro danou konstrukci. Prvé pokusy o nalezení „kritériální hodnoty“ nárazové práce byly provedeny v souvislosti s rozbořem havárií lodí Liberty. Výsledky těchto studií jsou schematicky uvedeny na obr. 4. Přepočtem hodnoty nárazové práce $KV = 20$ ft lb na evropské jednotky dostáváme hodnotu 27,11636 J, kterou je třeba zaokrouhlit. V našich starších normách se objevilo kritérium $KCV = 35 \text{ J.cm}^{-2}$ (což odpovídá $28 \text{ J}/0,8 \text{ cm}^2$), současné evropské normy používají kritériální hodnotu 27 J. Později se ukázalo, že kritériální hodnota 27 J platí pouze pro C-Mn oceli s mezí kluzu (230-270) MPa, tloušťku stěny (10-38) mm a podmínky namáhání spojené s provozem lodě. Neplatí např. pro oceli s vyšší mezí kluzu. Na druhé straně ona hodnota 27 J leží zpravidla v ohybu tranzitní křivky, nad touto hodnotou nárazová práce s teplotou prudce vzrůstá. Tak se stalo, že se kritériální hodnota nárazové práce začala používat jak v normativních nebo doporučeních pro volbu materiálu tak i při posuzování jakosti materiálu (dodací podmínky materiálů). Ukažme si pro ilustraci dva starší postupy pro volbu materiálu založené na kritériální hodnotě nárazové práce:

a) Svařované nádoby – postup podle ČSN 690010, hlava VIII

Nejprve je třeba stanovit zkušební teplotu t_z ; obecně $t_z = f(\text{provozní teplota, tloušťka stěny a tepelné zpracování})$. Při tloušťce stěny ≥ 21 mm je $t_z = \text{provozní teplotě}$.

Druhý krok je určení $KCV^{t_z} = f(R_e)$ podle následující tabulky.

$R_{eH} [\text{MPa}] \Rightarrow$	Do 250	250 – 300	300 – 350	350 – 400	400 – 450	od 450
$KCV^{t_z} [\text{J.cm}^{-2}]$	30	40	50	60	75	90

b) Svařované konstrukce

Volba materiálu na základě selekčního čísla S_c . Selekční číslo se určuje podle vztahu

$$S_c = (t_f + 55) + k_t + k_n + k_z + k_{tz} + k_s$$

$t_f = \text{provozní teplota}$

$k_t = \text{korekce na tloušťku stěny s podle tabulky}$

s [mm]	12,5	20	25	38	50	75
k_t	10	0	-15	-25	-35	-55

$k_n = \text{korekce na úroveň napětí}$

$\sigma_o [\text{MPa}]$	110	160	240
k_n	0	-10	-15

$k_z = \text{korekce na dynamické zatěžování } D_z$

D_z	žádné	Mírné	silné
k_z	0	-10	-40

$k_{tz} = \text{korekce na tepelné zpracování}$

	žiháno	nežiháno
k_{tz}	60	0

$k_s = \text{korekce na svařování}$

	Konstr.	svařovaná	nesvař
k_s	0	0	60

Na základě stanoveného selekčního čísla určíme teplotu (tranzitní teplotu $t_{35 \text{ J/cm}^2}$), při níž musí mít zvolený materiál hodnotu nárazové práce 27 J (hodnotu vrubové houževnatosti 35 J/cm^2)

S_c	víc než 40	32-40	20-31	15-19	1-14	0
$t_{35} [^\circ\text{C}]$	20	0	-15	-30	-50	Zvláštní ujednání

V současné době se hledají metody volby materiálu z hlediska odolnosti vůči křehkému lomu založené na charakteristikách zavedených jednou z filozofií uvedených na obr. 1 (koncepte zastavení trhliny a koncepte zabránění iniciace lomu) a tedy hledají se korelace mezi kritériálními hodnotami nárazové práce (např. 27 J) a tranzitními teplotami určenými na velkých tělesech (např. t_{NDT} , t_{FTE} , t_{FTP}) nebo lomovou houževnatostí (např. K_{IC} , J_{IC}), jak je tomu např. v normě ČSN 73 1401 (březen 1998, navrhování ocelových konstrukcí).

□ *Zkouška rázem v ohybu a dodací podmínky materiálů podle EN norem*

V prvé přednášce jsme hovořili obecně o novém systému značení ocelí, které se zavádí v rámci harmonizace norem ČSN s normami EN. Vedle číselného značení se zavádí i značky vytvořené na základě použití mechanických nebo fyzikálních vlastností. V těchto značkách se vyskytuje zpravidla, u ocelí jež se používají ke svařování, hodnota nárazové práce při jedné teplotě nebo celá teplotní závislost veličiny KV.

Připomeňme si

(G)Snnn – základní označení ocelí pro svařované konstrukce, v případě značky **GSnnn** víme, že je to ocel na odlitky a značka **Snnn** se používá pro tvářené materiály; **nnn** je číslo které vyjadřuje minimální hodnotu meze kluzu R_e v MPa pro nejmenší tloušťku výrobku - do této skupiny patří především oceli, jejichž dodací podmínky jsou shrnuty v normách

➤ ČSN EN 10 025+A1 (červenec 1996; v knihovně hledáme pod číslem 42 0904). Výrobky válcované za tepla z nelegovaných konstrukčních ocelí. Oceli uvedené v této normě jsou určeny pro použití ve svařovaných, šroubovaných a nýtovaných konstrukcích při teplotách okolního vzduchu. Norma specifikuje čtyři značky



svařitelných ocelí S182, S235, S275 a S 355. O zařazení těchto ocelí do jakostních tříd rozhoduje hodnota KV zjištěná při různých teplotách. Oceli, které jsou označeny JR, tj. S235JR, S275JR a S355JR jsou v podstatě oceli obvyklých jakostí (číselné označení podle tabulky má za tečku na prvních dvou místech nuly 1.0037, 1.0036 a 1.0038. V případě, že výrobce zaručuje tvařitelnost, pak se v označení objevuje písmenko C např. S275JRC a jde již o ocel jakostní, číselné označení je 1.0128 (z našich ocelí této značky odpovídá 11 373). Záruka KV při nižších teplotách než je teplota pokojová již zařazuje oceli podle této normy jako oceli jakostní. Oceli S235 a S275 mohou mít jakosti J0 a J2, v případě S355 mohou být stupně J0, J2 a K2.

teplota $\Rightarrow$ [°C] Nárazová práce $\Downarrow$	+20	0	-20	-30	-40	-50	-60
27 J	JR	J0	J2	J3	J4	J5	J6
40 J	KR	K0	K2	K3	K4	K5	K6
60 J	LR	L0	L2	L3	L4	L5	L6

Pozn. Z tabulky vidíme, že nejnižší kritériální hodnota KV se uvádí 27 Joule, další hodnoty již jsou zaokrouhleny na desítky

Na rozdíl od tahové zkoušky, kde zpravidla vystačíme s jediným zkušebním tělesem, ke stanovení jedné hodnoty KV pro potřebu hodnocení jakosti materiálu je potřeba tři případně šest zkušebních těles. Vlastní stanovení hodnoty KV pak probíhá takto:

Průměrná hodnota výsledků tří zkoušek musí splňovat předepsané požadavky. Jedna hodnota může být nižší než předepsaná minimální průměrná hodnota ze předpokladu, že nebude nižší než 70% této hodnoty. Tři další zkušební tělesa musí být odebrána ze stejného zkušebního vzorku a zkoušena v každém z následujících případů:

- pokud je průměrná hodnota ze tří zkoušek rázem v ohybu nižší než předepsaná minimální průměrná hodnota,
- pokud vyhovuje průměrná hodnota předepsanému požadavku, avšak dvě jednotlivé hodnoty jsou nižší než předepsaná minimální průměrná hodnota,
- pokud je kterákoliv jednotlivá hodnota nižší než 70% předepsané minimální průměrné hodnoty.

Průměrná hodnota výsledků šesti zkoušek nesmí být nižší než předepsaná minimální průměrná hodnota. Nejvýše dvě z jednotlivých hodnot mohou být nižší než předepsaná minimální průměrná hodnota, přičemž jedna může být nižší než 70 % této hodnoty.

- ČSN EN 10113 Část 1 až 3 (duben 1995, v knihovně hledáme 42 0934) Výrobky válcované za tepla ze svařitelných jemnozrnných konstrukčních ocelí. Tato evropská norma stanoví požadavky na dlouhé a ploché výrobky válcované za tepla ze svařitelných jemnozrnných konstrukčních ocelí jakostních a ušlechtilých. Jedná se o oceli určené k použití za normálních a nízkých teplot pro vysoce namáhané svařované konstrukce, např. mosty, vrata plavebních komor, zásobníky, nádrže na vodu a pod. Jemnozrnnosti je zde dosahováno buďto normalizačním válcováním (ozn. N – *jedná se o válcování, při němž se provádí konečná deformace v určité teplotní oblasti, což vede ke stavu materiálu ekvivalentnímu stavu získanému po normalizačním žhání tak, že požadované hodnoty mechanických vlastností zůstávají zachovány i po následném normalizačním žhání*), nebo termomechanickým válcováním (ozn. M – *válcování, při němž se provádí konečná deformace v určité teplotní oblasti, což vede ke stavu materiálu s určitými vlastnostmi, které nelze dosáhnout samotným tepelným zpracováním*). Opět jsou zde specifikovány čtyři značky S275, S355, S420 a S460. Prvé dvě jsou zařazeny mezi jakostní oceli a zbývající mezi ušlechtilé. Značky S275N až S460N a S275M až S460M mají zaručenou minimální hodnotu nárazové práce při teplotách (20, 0, -10 a -20)°C. Vyšší jakostní stupeň je ve značení doplněn symbolem L – např. S460ML – a v tomto případě je garantována hodnota nárazové práce 27 Joule ještě při -50°C.
- ČSN EN 10137 Část 1 až 3 (srpen 1998, v knihovně hledáme 42 1086) Plechy a široká ocel s vyšší mezí kluzu v zušlechťeném nebo vytvrzeném stavu (dodávaný stav se označuje zušlechťený Q a vytvrzený A). Jedná se o svařitelné oceli s nevyšší mezí kluzu – rozmezí 460 až 920 MPa, které jsou určeny k použití za normálních a nízkých teplot pro vysoce namáhané konstrukce (např. mosty, vrata plavebních komor, zásobníky, budovy, jeřáby a pod.). Tyto oceli jsou zařazeny mezi legované jakostní, tedy mají číselné označení 1.89**). Z hlediska záruky minimální nárazové práce jsou zde tři jakostní stupně, nic, L a L1.
- ČSN EN 10210 Část 1 a 2 (září 1995, v knihovně hledáme 42 1051) Duté profily tvářené za tepla z nelegovaných a jemnozrnných konstrukčních ocelí. Nelegované oceli mají specifikovány tři značky z hlediska meze kluzu S2345JR, S275J0H (S275J2H), S355J0H, (S355J2H) a jemnozrnné oceli také tři značky S275NH, (S275NLH), S355NH, (S355NLH), S460NH, (S 460NLH). Zde jako nové se objevuje písmenko H – to je značka těch dutých profilů, ostatní značky již známe.

(G)Pnnn – základní označení pro oceli na tlakové nádoby

ČSN EN 10028 - 1 (srpen 1995, v knihovně hledáme 42 0937) stanoví všeobecně platné technické dodací podmínky pro ploché výrobky, převážně používané pro konstrukci tlakových nádob

Část 2 – ze svařitelných nelegovaných a legovaných ocelí pro vyšší teploty (zde zvýšené teploty H)

Sem patří nelegované jakostní oceli P235GH (11 368), P265GH (11 418), P295GH (13 030) a P355GH (zde je předepsána minimální hodnota nárazové práce 27 Joule předepsána při teplotě 0°C) a legované ušlechtilé oceli



16Mo3(15 020), 13CrMo4-5 (15 121), 10CrMo9-10(15 313) (zde je předepsána minimální hodnota KV 27 Joule při +20°C).

Část 3 – z normalizačně žíhaných jemnozrnných konstrukčních ocelí vhodných ke svařování

Oceli obsažené v této části normy jsou nelegované jakostní oceli P275N, P275NH, P275NL1, nelegované ušlechtilé oceli P275NL2, P355NL2 a legované ušlechtilé oceli P460N, P460NH, P460NL1 a P460NL2

Z hlediska nárazové práce můžeme rozdělit do tří řad

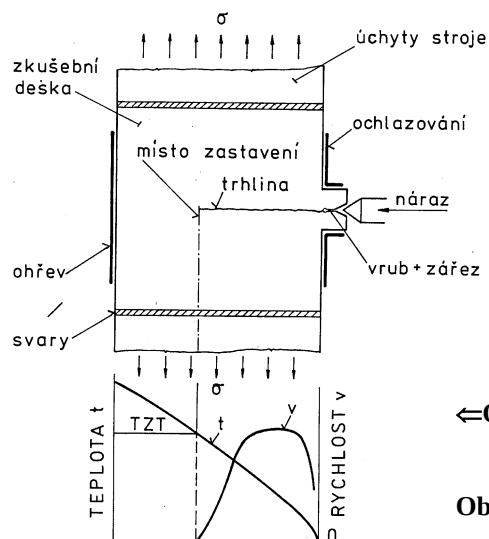
- základní řada (P....N) – jedná se o normalizačně žíhaný stav, minimální hodnoty KV v rozmezí teplot +20 až -20°C
- žáropevná řada (P....NH) – totéž jako a)
- řada se zaručenou hodnotou KV při nízkých teplotách (P....NL1), zadána teplotní závislost minimálních hodnot KV v intervalu teplot +20 až -50°C, při -50°C $KV_{\min} = 27$ Joule
- zvláštní řada se zaručenou hodnotou KV při nízkých teplotách (P....NL2), zadána teplotní závislost minimálních hodnot KV v intervalu teplot +20 až -50°C, při -50°C $KV_{\min} = 30$ Joule

Část 4 – z ocelí legovaných niklem se zaručenými vlastnostmi při nízkých teplotách, jedná se o sedm ocelí, tři nízkolegované (s obsahem Ni od 0,3 až 5%), kde je minimální hodnota KV zaručena ještě při teplotě -60°C až -120°C a dvě oceli s obsahem Ni 9%. Např. u oceli X7Ni9 je předepsána minimální hodnota $KV_{\min} = 120$ J v intervalu teplot od +20 do -150°C a při teplotě -196°C ještě musí být splněno $KV_{\min} = 100$ Joule.

Uvedené normy slouží jako příklady, které dokumentují nezastupitelný význam zkoušky rázem v ohybu a na základě této zkoušky určené hodnoty nárazové práce při hodnocení jakosti materiálu, pro přejímací zkoušky a pod. Dále má zkouška rázem v ohybu nezastupitelný význam při kontrole technologických procesů např. svařování – Čabelkova zkouška

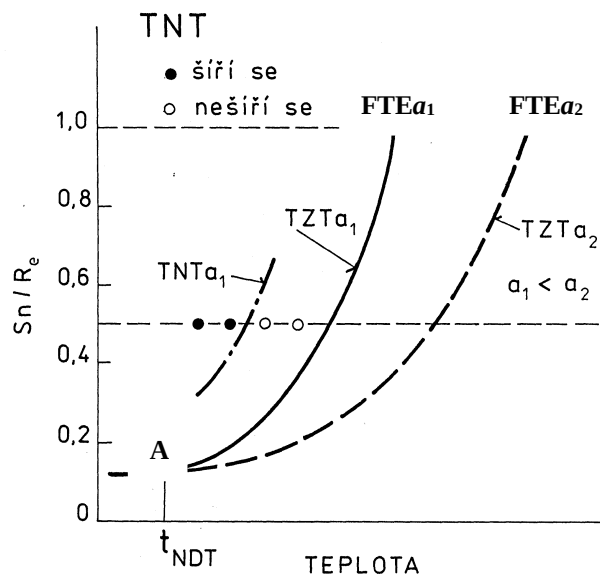
Zkoušky na velkých tělesech – měření tranzitních teplot

Zkoušky na rozměrných zkušebních tělesech mají za cíl co nejvíce přiblížit podmínky zkoušení oceli podmínkám funkce součástí. Dalším přínosem těchto zkoušek bylo zavedení defektu jako iniciátoru křehkého porušení.



⇐ Obr. 5

Obr.6 ⇒



První z těchto zkoušek byla v Plzni zavedena zkouška podle Robertsona. Zkušebním strojem pro tuto zkoušku byl hydraulický zkušební stroj o maximální síle 80 000 kN. Stroj pracoval v horizontálním uspořádání a zkušební vzorek se k čelistem stroje přivařoval. Průřez vzorku byl až (250 x 1200) mm. Princip zkoušky je na obr. 5. Ploché zkušební těleso o tloušťce stejné jako tloušťka konstrukce je zatěžované tahovým napětím σ . Na jedné straně zkušebního tělesa je vrub, tato strana je ochlazována kapalným dusíkem a protější strana je ohřívána plynovými hořáky. Tak vzniká napříč tělesa teplotní gradient, který je naznačený v dolní části obrázku. Trhlina se vyvolá úderem na klín vložený do vrubu a šíří se kolmo na směr tahového napětí. V objemu, kde je nízká teplota, se šíří štěpná trhlina velice rychle, v závislosti na růstu teploty postupně rychlost trhliny klesá až se trhlina úplně zastaví. Teplota místa zastavení trhliny se označuje jako TZT – teplota zastavení trhliny (původní

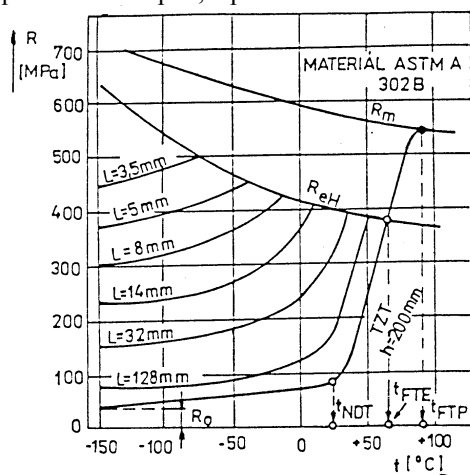


anglický název je CAT – crack arrest temperature), která při daném nominálním napětí S_n charakterizuje schopnost materiálu zastavit šířící se trhlínu.

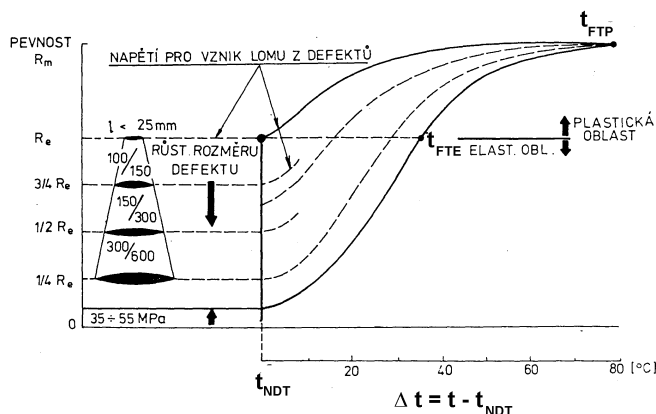
Na obr. 6 je vynesena závislost TZT v závislosti na poměru S_n/R_e . Závislost napětí – TZT má tranzitní charakter a podle autora se jmenuje Robertsonova přechodová křivka teploty zastavení trhliny. Křivka má dva charakteristické body – bod A spodní prahová hodnota křivky TZT, existuje zde určitá teplota ozn. t_{NDT} , pod kterou tato křivka nezáleží na tloušťce tělesa a je zde jisté prahové napětí R_0 . Pod pojmem prahové napětí rozumíme napětí, které i při velice nízkých teplotách musí být přítomno, aby došlo k šíření trhliny v materiálu. Druhým charakteristickým bodem Robertsonové křivky je její průsečík s úrovní napětí odpovídající hodnotě napětí na mezi kluzu. Tento bod představuje tranzitní teplotu lomu v elastické oblasti deformace. Označuje se zkratkou t_{FTE} (z angličtiny fracture transition elastic). Teplota t_{FTE} výrazně závisí na tloušťce materiálu, čím větší tloušťka, tím vyšší teplota TZT. Experimentálně bylo ukázáno, že zvětšováním tloušťky tělesa se Robertsonova křivka posouvá doprava – směrem k vyšším teplotám – pouze do určité tloušťky, která je u konstrukčních ocelí kolem 75 mm. V případě, že tloušťka stěny $a > 75$ mm, je možné křivku TZT považovat za hranici rozsahu tranzitních teplot zastavení trhliny LTTR (z angličtiny limiting transition temperature range). Při teplotách a napětích ležících napravo od křivky LTTR doprava již nejsou splněny podmínky pro nestabilní šíření trhliny. Další křivka v obr. 6 má označení TNT a znamená teplotu nešíření trhliny. Teplota TNT se určuje podobnou zkouškou jako TZT s tím rozdílem, že ve zkušebním tělese není gradient teplot, ale teplota je konstantní. Cílem této zkoušky je najít maximální napětí, při kterém se za dané teploty trhlina nešíří.

Lomový diagram podle Pelliniho

Z výsledků zkoušek měření TZT a TNT je možné sestavit sumární digram, který zobrazuje závislost charakteru porušení na napětí, teplotě a velikosti defektu.



Obr. 7



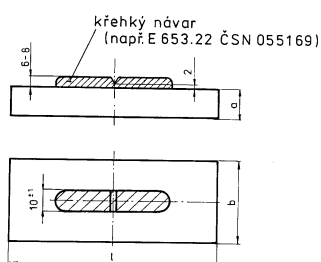
Obr. 8

Takovýto diagram analyzuje podmínky vzniku lomu. Navrhl jej S.W. Pellini v roce 1960 a označil jej jako diagram analýzy porušení FAD (fracture analysis diagram). Diagram platí pro jeden materiál a sestavuje se z Robertsonových přechodových křivek určených jak na tělesech bez i s gradientem teplot. Na obr. 7 je uveden FAD diagram pro americkou reaktorovou ocel A302 B a na obr. 8 je schema tohoto diagramu. Teplotní osa platí pro tloušťku 25 mm.

Určování diagramu FAD pomocí Robertsonových zkoušek je velice pracné. Proto také zkouška podle Robertsona nebyla normována. Lomový diagram podle Pelliniho se však v praxi používá s tím, že charakteristické teploty z tohoto diagramu (teploty t_{NDT} , t_{FTE} , $t_{DWT}^{75\%}$) se určují normovanými postupy – existují v podstatě jak v našich, tak i v amerických normách tyto zkoušky:

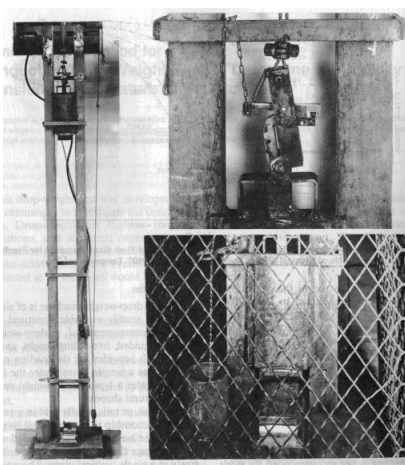
➤ Zkouška padajícím závažím ČSN 42 0349 (DWT drop weight test)

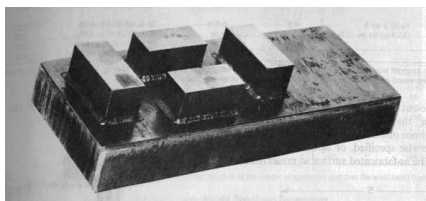
Cílem této zkoušky je stanovení limitní teploty t_{NDT} , nad níž nedojde k nestabilnímu šíření lomu z malého, uměle vyvolaného defektu do základního materiálu a to při dynamickém namáhání a při napětí kolem meze kluzu.



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

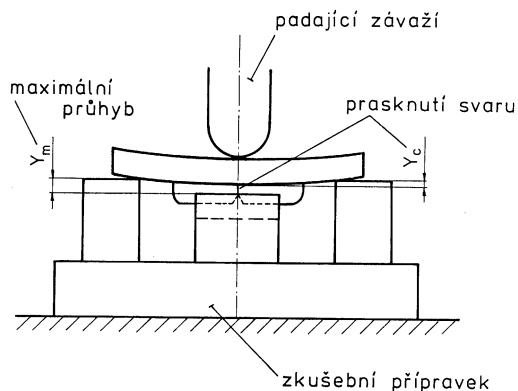
Zkušební těleso a ČSN 42 0349





←←Obr. 9 ← Obr. 10 ↑Obr.11

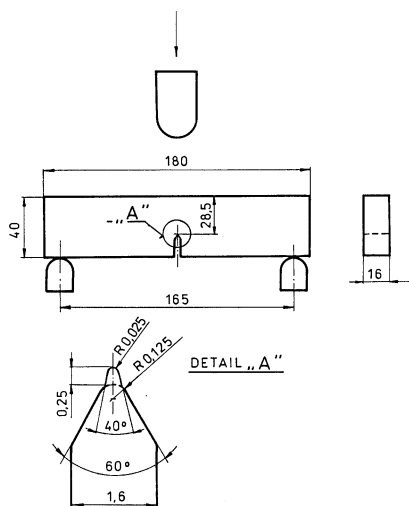
Na obr. 9 je tvar zkušební tělesa – zkoušeného materiálu, na kterém je v němž je vybroušený vrub; obr. 10 zařízení – padostroj, obr. 11 přípravek, na pokládá a obr. 12 schéma porušení tělesa přípravek umožní pouze omezený průhyb tělesa při kterém dojde k prasknutí návaru a tepelně ovlivněné zóny; napětí, které odpovídá napětí na mezi kluzu; teplota t_{NDT} je nejvyšší které ještě dojde k porušení zkušební



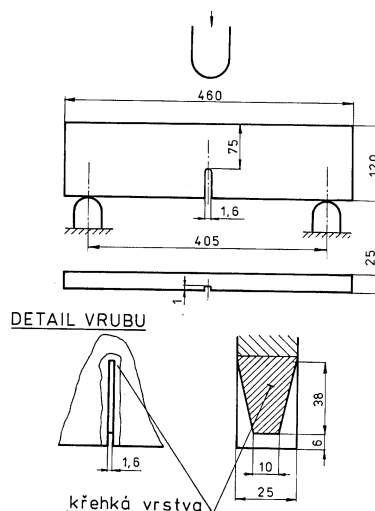
← Obr. 12
hranol ze
křehký návar,
zkušební
něž se těleso
při zkoušce,
zkušební
křehkého
v materiálu je
dynamické
teplota, při
tělesa.

➤ Zkouška rázem v ohybu velkých těles, ČSN 42 0340 (DT dynamic tear)

Tato zkouška se provádí zpravidla na obřím rázovém kladivu. Energie kladiva používaného v KPS Brno byla 10 000 Joulů. Ke zkouškám se používají tělesa o tloušťce 16 mm – u těchto těles se kořen vrubu zaostřoval



ZKOUŠEBNÍ TĚLESO 16 ČSN 420340

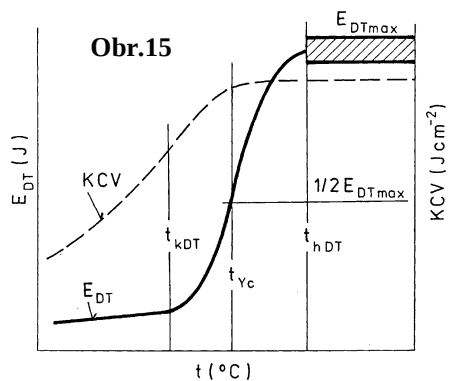


Obr. 13

Obr. 14

ZKOUŠEBNÍ TĚLESO 25 ČSN 420340

lisováním ostrý nástrojem- a tělesa tloušťky 25 mm, u nichž je vrub vyvařen elektronovým paprskem tak, aby ve vrubu vznikla křehká vrstva. Oba tyto zásahy mají za cíl usnadnit iniciaci lomu. Cílem zkoušky je určit velikost energie spojené s lomovým procesem za mezních podmínek namáhání. Ke zkoušce se používají zkušební tělesa upravená tak, aby iniciace trhliny nastala v počáteční fázi zatěžování a tedy energie spotřebovaná k iniciaci lomu byla zanedbatelná. Zkouška se provádí při rázovém zatěžování, zjištěná nárazová práce E_{DT} představuje energii pro šíření trhliny. Teplotní průběh nárazové práce v závislosti na teplotě je uveden schematicky na obr. 15 (pro srovnání je na obr. 15 ukázána poloha teplotní závislosti vrubové houževnatosti na malých Charpy tělesech). Z této závislosti se určují tři charakteristické teploty t_{kDT} , t_{YC} a t_{hDT} . Z praktického hlediska má největší význam tranzitní teplota t_{YC} . Na základě této tranzitní



teploty se v době slávy KPS Brno určovala teplota vody pro zkoušky tlakových nádob, které měly opustit továrnu. Dále existuje řada prací, na základě kterých je možné z teplotní závislosti nárazové práce E_{DT} stanovit

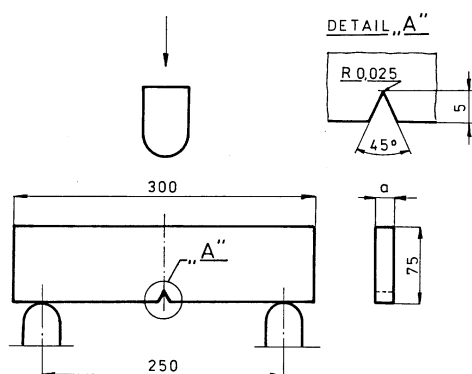


teplotní závislost dynamické lomové houževnatosti K_{Id} , což je materiálová charakteristika, o níž budeme hovořit později.

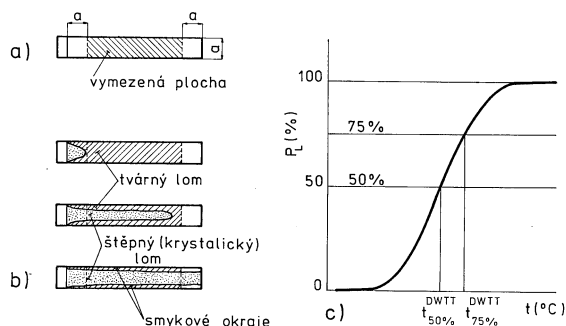
➤ **Zkouška rázem v ohybu velkých těles původní tloušťky, ČSN 42 0346 (DWTT – drop weight tear test)**

Tato zkouška se může provádět jak na padostroj, tak i na obřím rázovém kladivu. Cílem zkoušky je stanovit přechodovou teplotu ocelových plechů na tlaková potrubí. Při této zkoušce se z plechů odebírají zkušební tělesa, která mají tloušťku stejnou jako plechy použité v konstrukci. Podle této normy lze zkoušet plechy z konstrukční svařitelné oceli o tloušťce 3 až 200 mm s mezi kluzu do 700 MPa. Tvar zkušebních těles je ukázán na obr. 16.

Obr. 16 ↓



↓ Obr. 17



Zkušební těleso opatřené ostrým lisovaným V vrubem se zatěžuje rázově tříbodovým ohybem do úplného zlomení. Zkouška se provádí buďto na padostroji, nebo obřím kyvadlovém kladivu. Na zkušební zařízení je pouze požadavek, aby energie nárazu zařízení byla schopna přerazit zkušební těleso jediným úderem. Po zkoušce se vyhodnocuje na lomové ploše zkušebních těles procento tvárného lomu. Tato měření se pak vynášejí ve formě přechodových křivek procento tvárného lomu – teplota a na základě nich se pak stanoví tranzitní teploty – viz obr. 17.

Výsledky zkoušky DWTT mají význam zvláště pro volbu materiálu ke stavbě plynovodů. Byly ověřované destrukčními zkouškami na plynových potrubích skutečné velikosti firmou American Gas Association. Na 180 m dlouhém zkušebním úseku potrubí bylo lokálním snížením teploty v blízkosti vrubu a natlakováním potrubí vzduchem vyvolán křehký lom. Ukázalo se, že křehký lom se šíří větší rychlostí (asi 1000m/s), než je rychlost dekomprese plynu (asi 400 m/s) při porušení potrubí. To však znamená, že vznik a následné šíření křehké trhliny v plynovodu způsobí značné škody na potrubí. Prakticky nedojde k zastavení lomu. Proto je nutné vyloučit u této konstrukce možnost iniciace štěpného lomu. Tvárný lom je energeticky velice náročný, v tomto případě se pouze udělá v potrubí díra a tou plyn uniká. Plynovod je z hlediska křehkého lomu bezpečný, pokud jeho provozní teplota je nad teplotou $t_{DWTT}^{75\%}$.

Podobné zkoušky se v současné době vyvíjejí pro plasty, které se používají na stavbu potrubí – test S 4.