

	Předmět:	RDF – Deformace a porušování materiálu		
	Jméno:	Ondřej Fučík		
	Datum měření:	11.4.2020	Číslo úlohy:	3
Ústav:	Ústav mechaniky těles mechatroniky a biomechaniky			
Název úlohy:	Lomová houževnatost			

Úloha 1.1

těleso 11

i)

Podle Obrázek 1 bylo zjištěna poloha protnutí tzv. 5% sečny (červená přímka) s křivkou průběhu zkoušky. Nejdříve byla určena tečna pro elastickou oblast průběhu zkoušky (modrá přímka), která svírá s osou x úhel 61° .

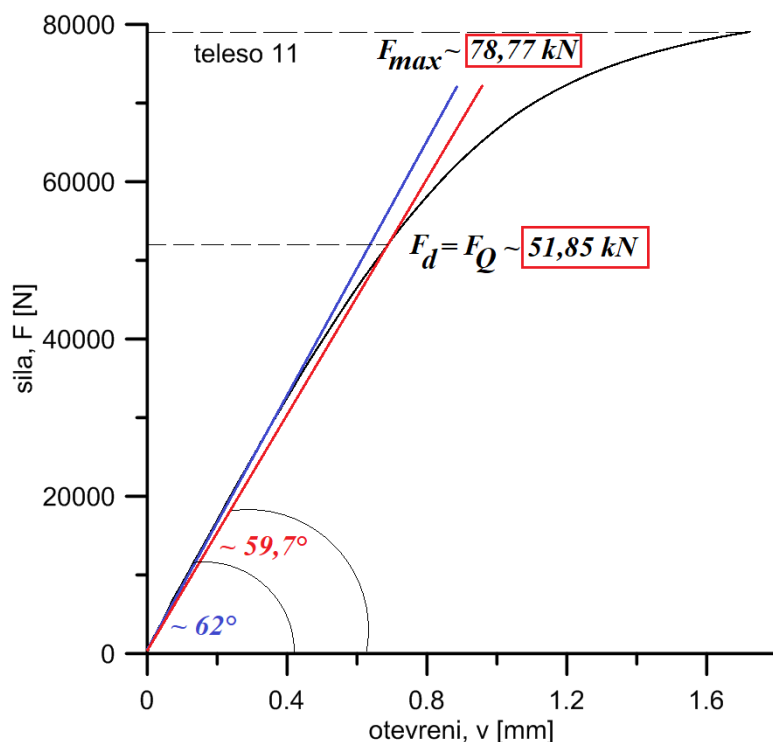
5% sečna (červená přímka) byla proložena na základě následujícího výpočtu

$$\operatorname{tg}(61) = 1,804;$$

$$1,804 \cdot 0,95 = 1,7138;$$

$$\operatorname{arctg}(1,7138) \cong 59,7^\circ$$

V místě protnutí tzv. 5% sečny s křivkou průběhu zkoušky byla zjištěna síla F_d , která je dle teorie totožná se silou F_Q , která je nutná pro výpočet prozatímní hodnoty faktoru intenzity napětí.



Obrázek 1: Zjištění síly F_d a F_Q pomocí 5 % sečny

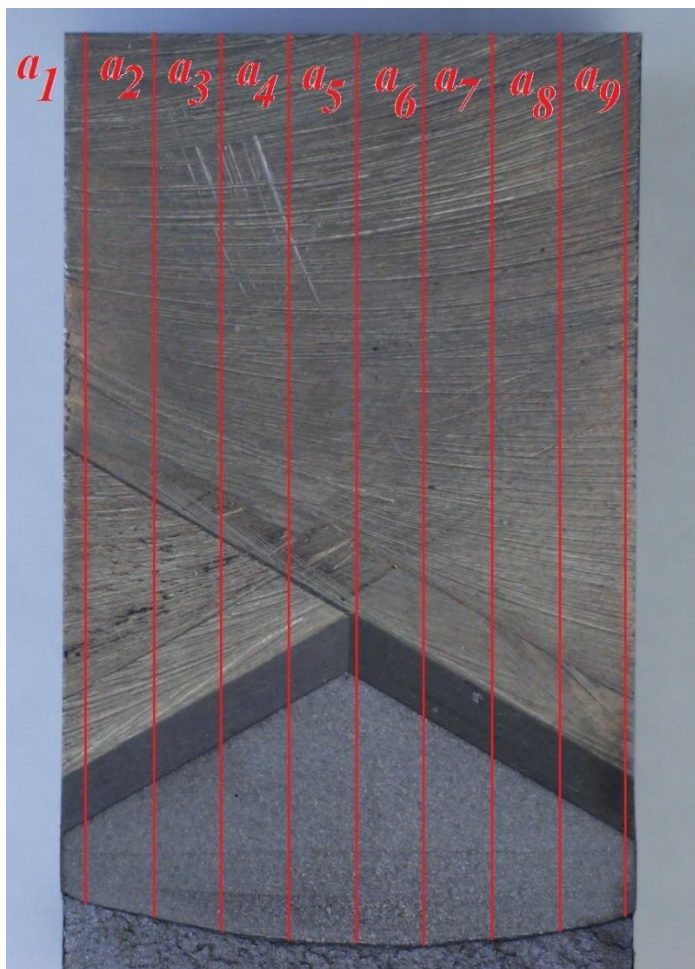
Síla $F_{\max}$ byla odečtena přímo z grafu na základě znalosti měřítka.

$$F_d = F_Q = 51,85 \text{ kN}$$

$$F_{\max} \cong 78,77 \text{ kN}.$$

ii)

Z dostupných fotografií zkušebního tělesa byly odečteny vzdálenosti čela trhliny od osy díry CT tělesa (Obrázek 1Obrázek 2). Pomocí dostupného měřítka byly vypočteny reálné hodnoty těchto vzdáleností.



Obrázek 2: Vzdálenosti čela trhliny od povrchu CT tělesa

$$a_1 = 35.55 \text{ mm}; a_2 = 38.28 \text{ mm}; a_3 = 39.06 \text{ mm}; a_4 = 39.45 \text{ mm}; a_5 = 39.45 \text{ mm};$$
$$a_6 = 39.45 \text{ mm}; a_7 = 39.06 \text{ mm}; a_8 = 38.67 \text{ mm}; a_9 = 38.28 \text{ mm};$$

Poté byla vypočtena reálná délka trhliny pomocí následujícího vztahu

$$a = \frac{1}{8} \left(\frac{a_1 + a_9}{2} + \sum_{i=2}^8 a_i \right) - 12,5$$
$$a = 26,294 \text{ mm} = 0,02629 \text{ m}$$

iii)

Pomocí následujících vztahů byla vypočtena prozatímní hodnota faktoru intenzity napětí K_Q .

$$g_2\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{\left(2 + \frac{a}{W}\right) \cdot \left[0,886 + 4,64 \cdot \frac{a}{W} - 13,32 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14,72 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5,6 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^4\right]}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{1,5}}$$

$$= \frac{(2 + 0,526) \cdot [0,886 + 4,64 \cdot 0,526 - 13,32 \cdot 0,526^2 + 14,72 \cdot 0,526^3 - 5,6 \cdot 0,526^4]}{(1 - 0,526)^{1,5}}$$

$$= \mathbf{10,48}$$

$$K_Q = \left(\frac{F_Q}{B \cdot \sqrt{W}}\right) \cdot g_2 = \left(\frac{0,05185}{24,97 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{50 \cdot 10^{-3}}}\right) \cdot 10,48 = \mathbf{97.32 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0,5}}$$

Abychom hodnotu K_Q mohli prohlásit za platnou hodnotu faktoru intenzity napětí K_{IC} , je nutné, aby byly splněny všechny následující podmínky:

$$F_{max} \leq 1,1 \cdot F_Q$$

$$a_0 \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_Q}{R_{p0,2}}\right)^2$$

$$B \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_Q}{R_{p0,2}}\right)^2$$

$$W - a \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_Q}{R_{p0,2}}\right)^2$$

Tyto podmínky nejsou splněny, proto je nutné přistoupit k vyhodnocení elasto-plastické lomové houževnatosti K_{Jc} .

Nejdříve je nutné spočítat hodnotu J-integrálu pomocí vztahu

$$J_c = \left[\frac{F_{max}}{B \cdot W^{0,5}} \cdot g_2\right]^2 \cdot \left[\frac{1 - \mu^2}{E}\right] + \frac{2,2 \cdot U_p}{B(W - a)}$$

Hodnotu plastické práce U_p zjistím jako plochu pod zatěžovací křivkou po odečtení elastické práce. Dle Obrázek 3 je práce

$$U_p \approx U_1 + U_2 + U_3 + U_4 - U_5,$$

kde pomocí vztahu pro výpočet obsahu obdélníků a trojúhelníků můžeme aproximovat

$$U_1 \approx \frac{0,5 \cdot 40}{2} = 10 \text{ J}$$

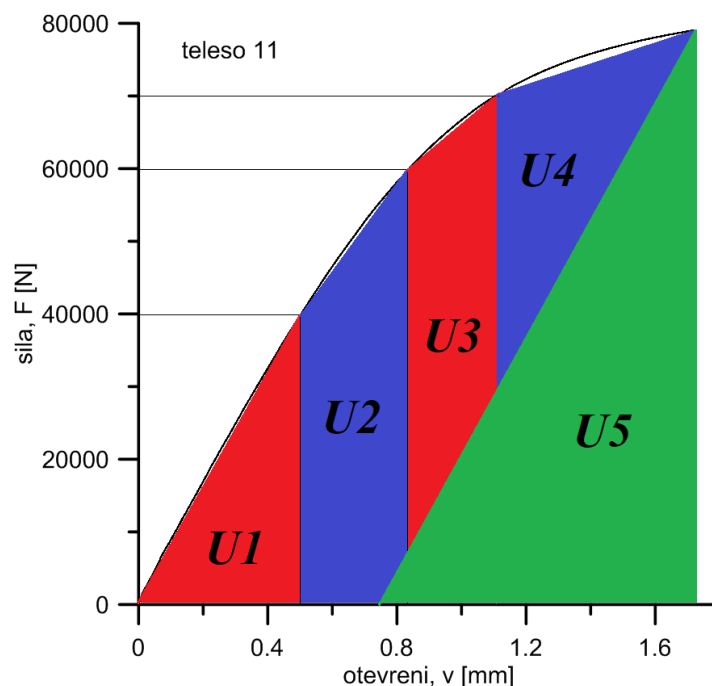
$$U_2 \approx (0,85 - 0,5) \cdot 40 + \frac{(0,85 - 0,5) \cdot 20}{2} = 17,5 \text{ J}$$

$$U_3 \approx (1,1 - 0,85) \cdot 60 + \frac{(1,1 - 0,85) \cdot 10}{2} = 16,25 \text{ J}$$

$$U_4 \approx (1,7 - 1,1) \cdot 70 + \frac{(1,7 - 1,1) \cdot 8,8}{2} = 44,64 \text{ J}$$

$$U_5 \approx \frac{(1,7 - 0,75) \cdot 78,8}{2} = 37,43 \text{ J}$$

$$U_p \approx 10 + 17,5 + 16,25 + 44,64 - 37,43 = \mathbf{50,96 \text{ J}}$$



Obrázek 3: Ilustrace výpočtu plochy pod zatěžovací křivkou

Potom

$$J_c = \left[\frac{0,07877}{24,97 \cdot 10^{-3} \cdot (50 \cdot 10^{-3})^{0,5}} \cdot 10,48 \right]^2 \cdot \left[\frac{1 - 0,3^2}{210\,000} \right] + \frac{2,2 \cdot 51,4}{24,97 \cdot 10^{-3} \cdot (50 - 26,3) \cdot 10^{-3}} = 0,2857 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0,5}$$

Jelikož platí

$$\Delta a < 0,2 + \left(\frac{J_c}{3,75 \cdot R_m} \right)$$

Ize hodnotu J-integrálu přepočítat na hodnotu elasto-plastické lomové houževnatosti K_{JC} podle vztahu

$$K_{JC} = \sqrt{\frac{E \cdot J_c}{1 - \mu^2}} = \sqrt{\frac{210\,000 \cdot 0,2857}{1 - 0,3^2}} = 256,78 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0,5}$$

těleso 1

i)

Podle Obrázek 4 bylo zjištěna poloha protnutí tzv. 5% sečny (červená přímka) s křivkou průběhu zkoušky. Nejdříve byla určena tečna pro elastickou oblast průběhu zkoušky (modrá přímka), která svírá s osou x úhel 61° .

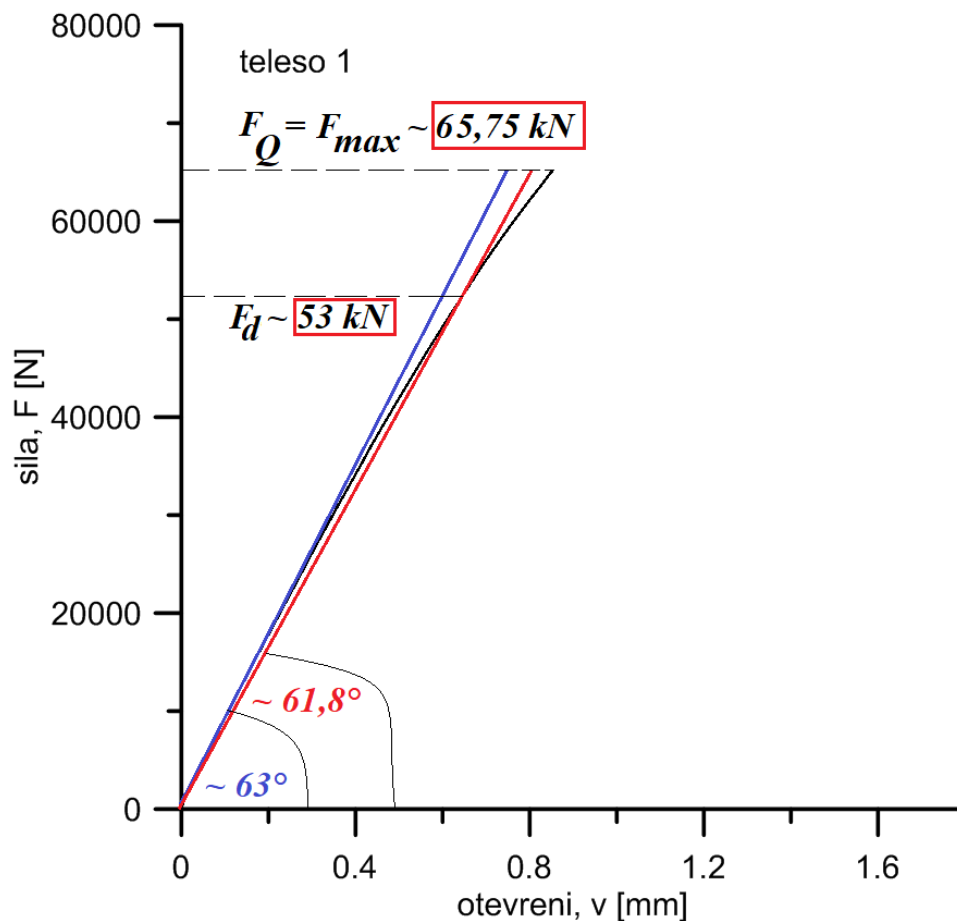
5% sečna (červená přímka) byla proložena na základě následujícího výpočtu.

$$\text{tg}(63^\circ) = 1,9626$$

$$1,9626 \cdot 0,95 = 1,8645$$

$$\text{arctg}(1,8645) = 61,8^\circ$$

V místě protnutí tzv. 5% sečny s křivkou průběhu zkoušky byla zjištěna síla F_d .



Obrázek 4: Zjištění síly F_d a F_Q pomocí 5 % sečny

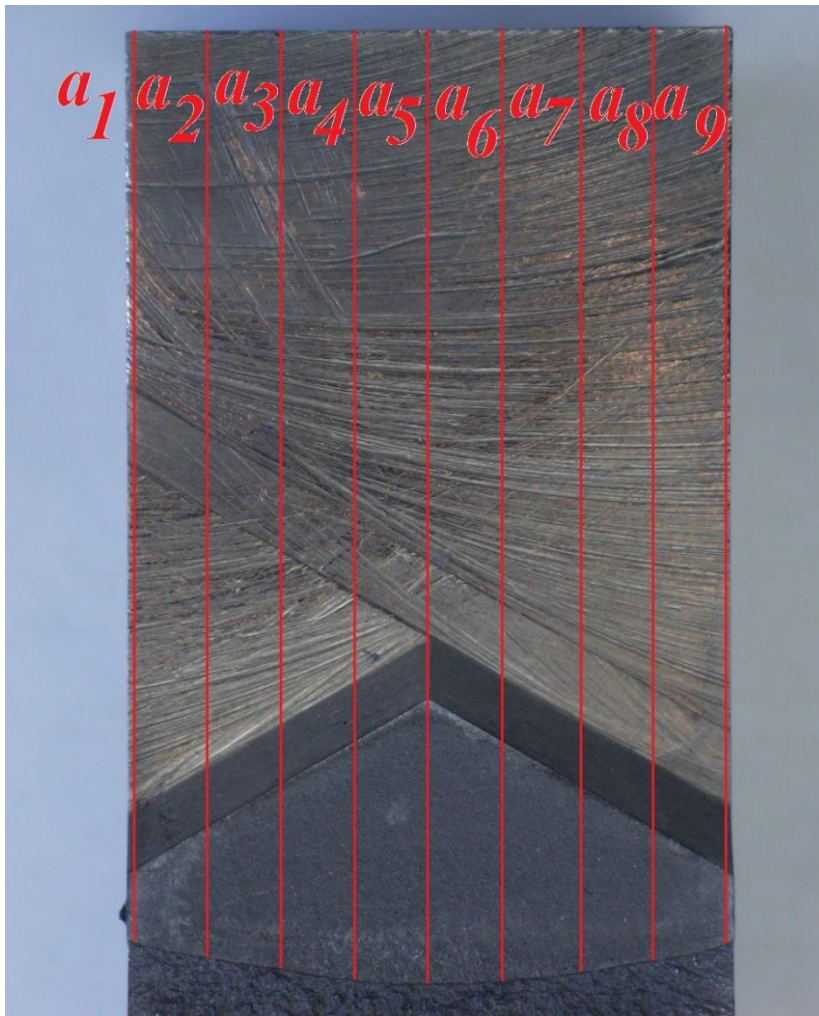
Síla F_{max} byla odečtena přímo z křivky na základě znalosti měřítka.

$$F_d \cong 53 \text{ kN}$$

$$F_{max} = F_Q \cong 65,75 \text{ kN}.$$

ii)

Z dostupných fotografií zkušebního tělesa byly odečteny vzdálenosti čela trhliny od osy díry CT tělesa (Obrázek 5). Pomocí dostupného měřítka byly vypočteny reálné hodnoty těchto vzdáleností.



Obrázek 5: Vzdálenosti čela trhliny od povrchu CT tělesa

$a_1 = 37,43 \text{ mm}$; $a_2 = 38,09 \text{ mm}$; $a_3 = 38,53 \text{ mm}$; $a_4 = 39,06 \text{ mm}$; $a_5 = 39,26 \text{ mm}$;
 $a_6 = 39,27 \text{ mm}$; $a_7 = 38,74 \text{ mm}$; $a_8 = 38,40 \text{ mm}$; $a_9 = 37,70 \text{ mm}$;

Poté byla vypočtena reálná délka trhliny pomocí následujícího vztahu

$$a = \frac{1}{8} \left(\frac{a_1 + a_9}{2} + \sum_{i=2}^8 a_i \right) - 12,5$$

$$a = 26,115 \text{ mm} = 0,02612 \text{ m}$$

iii)

Pomocí následujících vztahů byla vypočtena prozatímní hodnota faktoru intenzity napětí K_Q .

$$g_2 \left(\frac{a}{W} \right) = \frac{\left(2 + \frac{a}{W} \right) \cdot \left[0,886 + 4,64 \cdot \frac{a}{W} - 13,32 \cdot \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 14,72 \cdot \left(\frac{a}{W} \right)^3 - 5,6 \cdot \left(\frac{a}{W} \right)^4 \right]}{\left(1 - \frac{a}{W} \right)^{1,5}}$$

$$= \frac{(2 + 0,522) \cdot [0,886 + 4,64 \cdot 0,522 - 13,32 \cdot 0,522^2 + 14,72 \cdot 0,522^3 - 5,6 \cdot 0,522^4]}{(1 - 0,522)^{1,5}}$$

$$= 10,36$$

$$K_Q = \left(\frac{F_Q}{B \cdot \sqrt{W}} \right) \cdot g_2 = \left(\frac{0,06115}{25,01 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{50 \cdot 10^{-3}}} \right) \cdot 10,36 = 98,24 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0,5}$$

Abychom hodnotu K_Q mohli prohlásit za platnou hodnotu faktoru intenzity napětí K_{IC} , je nutné, aby byly splněny všechny následující podmínky:

$$F_{max} \leq 1,1 \cdot F_Q$$

$$a_0 \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_Q}{R_{p0,2}} \right)^2$$

$$B \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_Q}{R_{p0,2}} \right)^2$$

Podmínky nejsou splněny, proto je nutné přistoupit k vyhodnocení elasto-plastické lomové houževnatosti K_{JC} .

Nejdříve je nutné spočítat hodnotu J-integrálu pomocí vztahu

$$J_c = \left[\frac{F_{max}}{B \cdot W^{0,5}} \cdot g_2 \right]^2 \cdot \left[\frac{1 - \mu^2}{E} \right] + \frac{2,2 \cdot U_p}{B(W - a)}$$

$$= \left[\frac{0,0612}{0,025 \cdot 0,05^{0,5}} \cdot 10,36 \right]^2 \cdot \left[\frac{1 - 0,3^2}{210\,000} \right] + \frac{2,2 \cdot 4,45}{0,025(0,05 - 0,02612)}$$

$$= \mathbf{0,081\,MPa \cdot m}$$

Jelikož platí

$$\Delta a < 0,2 + \left(\frac{J_c}{3,75 \cdot R_m} \right)$$

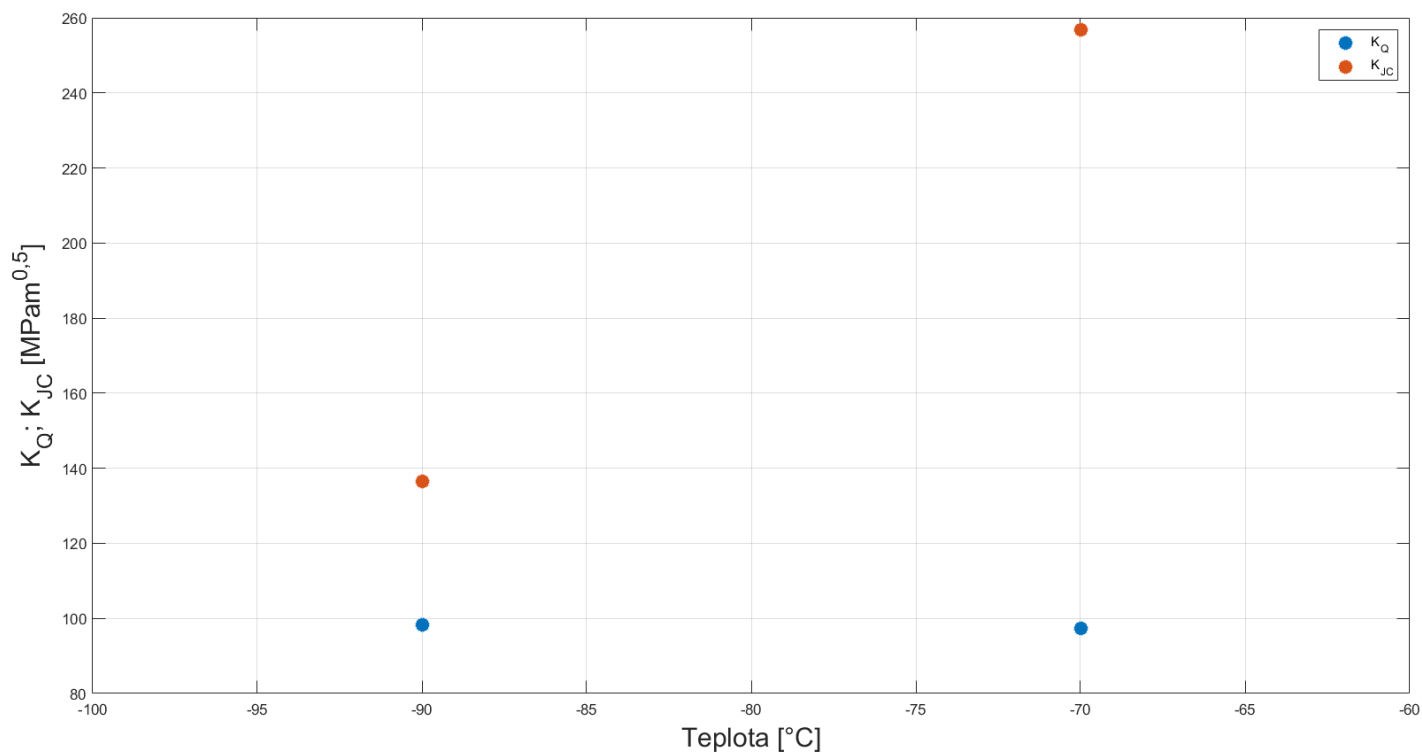
Ize hodnotu J-integrálu přepočítat na hodnotu elasto-plastické lomové houževnatosti K_{JC} podle vztahu

$$K_{JC} = \sqrt{\frac{E \cdot J_c}{1 - \mu^2}} = \sqrt{\frac{210\,000 \cdot 0,081}{1 - 0,3^2}} = \mathbf{136,51\,MPa \cdot m^{0,5}}$$

Úloha 1.2

		č.tělesa	1	19	8	3	11	21
teplota	T	[°C]	-90	-90	-90	-80	-70	-70
tloušťka tělesa	B	[mm]	25,01	25	24,98	24,99	24,97	24,99
šířka tělesa	W	[mm]	50	50	50	50	50	50
délka trhliny	a_0	[mm]	26,115	26,24	26,86	26,03	26,294	26
tvárné natržení	Δa	[mm]	0	0	0	0	0,17	0
síla z 5% sečny	F_Q	[kN]	53	54,21	51,6	56,52	51,85	49,68
lomová síla	F_C	[kN]	65,75	64,48	54,28	66,69	78,77	65,6
plastická práce	U_p	[J]	4,45	7,05	1,9	5,16	51,4	9
modul pružnosti	E	[GPa]	210	210	210	210	210	210
Poissonovo číslo	V	[-]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
mez kluzu	$R_{p0,2}$	[MPa]	672	672	672	637	626	626
mez pevnosti	R_m	[MPa]	842	842	842	821	804	804
lom.houževnatost	K_Q z F_Q	[MPa.m ^{0,5}]	98,24	101,3	103	105	97,32	95
Je splněna podmínka K_{IC} ?			NE	NE	NE	NE	NE	NE
lom.houževnatost	J_C z F_C a U_p	[MPa.m]	0,081	0,09	0,056	0,085	0,2857	0,097
Je splněna podmínka J_C ?			ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
K_{JC} z J_C		[MPa.m ^{0,5}]	136,51	144	114	140	256,78	150

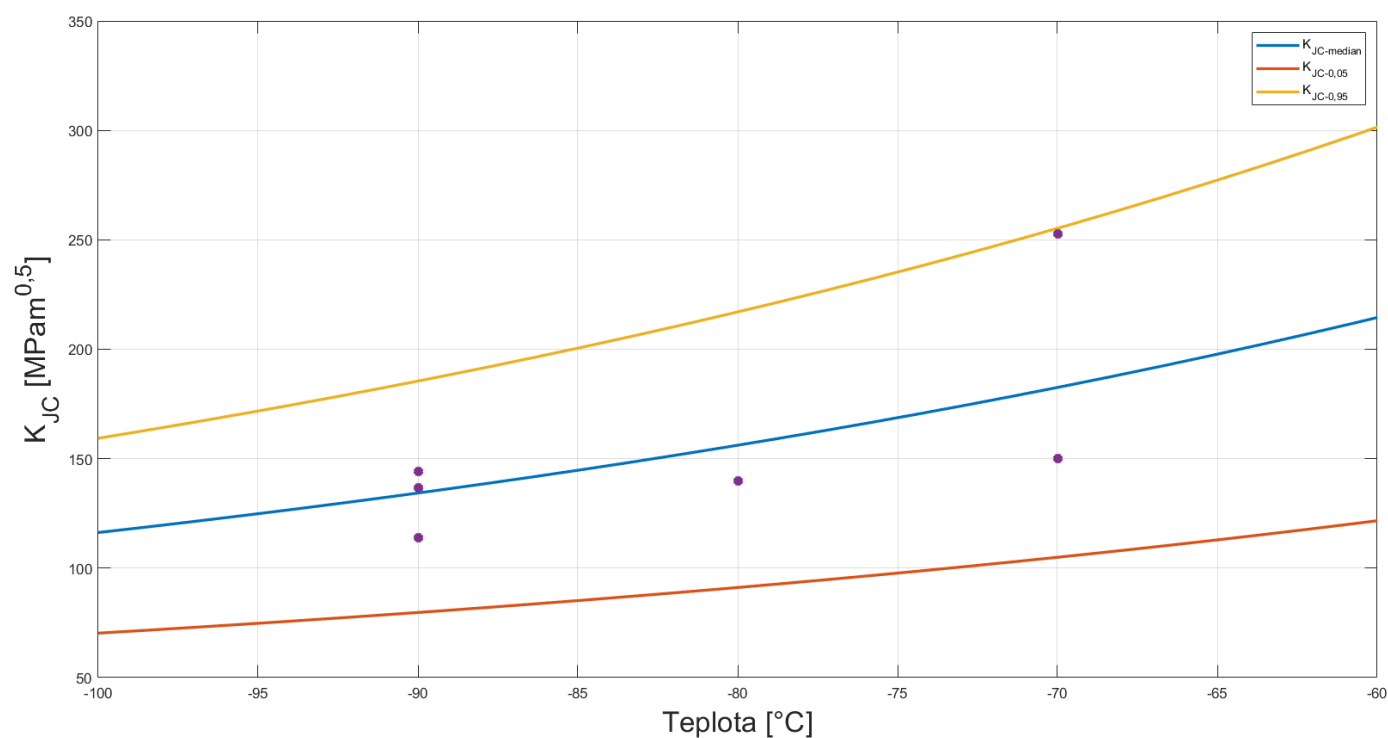
Na Obrázek 6 jsou pak vykresleny závislosti hodnot lineární elastické lomové houževnatosti (K_Q) a elasto-plastické lomové houževnatosti (K_{JC}) na teplotě.



Obrázek 6: Teplotní závislosti K_Q a K_{JC}

Úloha 1.3

Poslední úlohou je určení a vykreslení univerzální (Master) křivky a jejího rozptylového pásu. (Obrázek 7). Všechny námi zjištěné hodnoty K_{JC} v tomto rozptylovém pásu leží.



Obrázek 7: Univerzální křivka s rozptylovým pásem