

# DLOUHODOBÁ ŽÁRUPEVNOST KOTLOVÝCH TRUBEK Z CrMoV ŽÁRUPEVNÉ OCELI SE ZVÝŠENOU ŽÁRUPEVNOSTÍ

*Jaromír SOBOTKA VÍTKOVICE – Výzkum a vývoj, spol. s r.o., Ostrava*

*Vladimír BÍNA, Ondrej BIELAK, BiSAFE, s.r.o., Praha*

*Mechanismy zpevnění nízkolegovaných CrMoV žárupevných ocelí pro trubkové systémy parních kotlů. Predikce dlouhodobé žárupevnosti kotlových trubek z ocelí 15 128 a 15 229 v závislosti na chemickém složení a mechanických vlastnostech za normální teploty. Kvantifikace vlivu meze kluzu a poměru obsahů vanadu a uhlíku na hodnoty meze pevnosti při tečení v závislosti na teplotě a době creepové exploatace.*

**Klíčová slova:** *Kotlová trubka, nízkolegovaná CrMoV ocel, mez pevnosti při tečení, poměr obsahů vanadu a uhlíku, mez kluzu.*

## 1. Úvod

Významnou část hutní produkce tvoří výrobky, určené pro aplikaci za zvýšených teplot a tlaků, které jsou v provozních podmínkách energetických a chemických zařízení vystaveny dlouhodobému namáhání v oblasti creepu. Jedná se zejména o trubky, plechy, výkovky a odlitky z uhlíkových, nízkolegovaných i vysocelegovaných ocelí, přičemž volba použitého konstrukčního materiálu závisí na jmenovitých provozních parametrech zamýšlené aplikace. Z hlediska provozní životnosti a funkční spolehlivosti těchto výrobků jsou výrobcem garantovány nejdůležitější charakteristiky životnosti v závislosti na teplotě a aplikovaném napětí, tj. hodnoty meze pevnosti při tečení. Tyto hodnoty jsou základními parametry, ze kterých konstruktér vychází při designu a dimenzaci součástí pracujících v oblasti creepu a jsou proto jednoznačně specifikovány v příslušných materiálových listech a normách žárupevných ocelí.

Přes závažnost a praktický význam hodnot meze pevnosti při tečení nemůže být tato veličina předmětem zkoušení a atestace při běžných přejímkách hutního materiálu. Pro konstrukční výpočty jsou směrodatné hodnoty meze pevnosti při tečení za  $10^5$  případně  $2 \cdot 10^5$  hodin, přičemž pro jejich stanovení je nutno vyhodnotit teplotně-napěťové závislosti doby do lomu u souboru provozních taveb reprezentujících posuzovanou jakost žárupevné oceli.

V rámci tohoto hodnocení je nutno provést řadu časově náročných creepových zkoušek, přičemž např. pro formálně spolehlivé stanovení hodnoty meze pevnosti při tečení za  $2 \cdot 10^5$  h musí doba do lomu nejdéle ukončené zkoušky dosáhnout při dané teplotě nejméně  $7 \cdot 10^4$  h, tj. zhruba 8 let [1]. Za této situace vystupuje do popředí otázka, jakým způsobem lze získat alespoň předběžný odhad dlouhodobé pevnosti při tečení bez nutnosti provedení neúměrně časově náročných creepových

zkoušek a extrapolace jejich výsledků k době výpočtové životnosti daného výrobku. Přístup k této problematice může být dvojitý – v první řadě lze provést predikci dlouhodobé žárupevnosti ze strukturních charakteristik, případně krátkodobých mechanických vlastností materiálu ve výchozím stavu, v druhé řadě pak provést odhad životnosti na základě měření rychlosti stacionárního creepu při aplikovaném napětí, totožném s hodnotou meze pevnosti při tečení za dané teploty. V obou případech je však nutné mít k dispozici statisticky významné závislosti

- charakteristik dlouhodobé žárupevnosti na parametrech mikrostruktury, chemického složení nebo krátkodobých mechanických vlastností oceli
- doby do lomu na hodnotách minimální rychlosti creepu, které můžeme naměřit v podstatně kratších časech v porovnání s creepovou životností při dané kombinaci teploty a aplikovaného napětí.

Z koncepčního hlediska nabývá tato problematika zásadního významu při odhadu celkové, případně reziduální životnosti součástí trubkových systémů parních kotlů, dlouhodobě exploatovaných v oblasti teplot nad zhruba 500°C. V kategorii nízkolegovaných svařitelných žárupevných ocelí se týká především kotlových trubek z CrMoV ocelí se zvýšenou žárupevností, garantovanou výrobcem v teplotní oblasti do 600°C, tj. typu

- 0,5%Cr - 0,5%Mo - 0,3%V (15 128.5 nebo 15 128.9 podle ČSN 41 5128 [2])
- 0,8%Cr - 0,5%Mo - 0,6%V (15 229.5 podle VN 41 5229 [3]).

V této práci soustředíme pozornost ke kritickému rozboru možností odhadu žárupevnosti na základě specifikace výchozího stavu uvedených ocelí z hlediska jejich chemického složení a hodnoty meze kluzu při statické zkoušce tahem za normální teploty.

Z rozboru dosavadních poznatků je zřejmé, že kombinaci krátkodobých pevnostních vlastností a dlouhodobé žárupevnosti ovlivňuje u obou ocelí zásadním způsobem vzájemný poměr mezi jednotlivými příspěvky zpevnění, a to již ve stavu po výchozím tepelném zpracování [4-8]. Z tohoto pohledu má stěžejní význam precipitační zpevnění oceli částicemi disperzní fáze  $M_4C_3$ , omezujícími pohyblivost dislokací jak při deformaci za normální teploty, tak při plastické deformaci a souběžném zotavení deformované struktury v oblasti creepu. Rozsah tohoto příspěvku závisí na střední vzájemné vzdálenosti částic  $M_4C_3$ , určené zejména

- rychlostí ochlazování trubky z teploty austenitizace a teplotně-časovým parametrem následného popouštění
- obsahy vanadu a uhlíku v oceli, charakteristickými maximem precipitačního zpevnění při dosažení stechiometrického poměru obou prvků pro vznik karbidu vanadu, tj. při poměru V/C zhruba 4 až 5 [9].

Poměrně závažnou se jeví rovněž přísada 0,5% molybdenu, a to jak z hlediska příspěvku substitučního zpevnění oceli a odpovídajícího přírůstku meze kluzu [6], tak v důsledku zvýšení žárupevnosti feritické matrice [10-13]. Ukázalo se zde, že vzrůst dlouhodobé pevnosti při tečení kotlových trubek jakosti 15 229.5 (v porovnání s ocelí 15 128 s identickou mezí kluzu nebo vzájemnou vzdáleností částic  $M_4C_3$ ) souvisí právě se zvýšeným a dlouhodobě stabilnějším obsahem molybdenu v tuhém roztoku v průběhu creepové exploatace, dosažitelným díky vyššímu obsahu vanadu (a poměru V/C) u této oceli [8].

Za do značné míry kontroverzní však můžeme považovat efekt zvýšené hustoty dislokací a odpovídajícího příspěvku dislokačního zpevnění. Jednoznačně příznivý vliv dislokačního zpevnění na vzrůst meze kluzu [4-6] se na druhé straně z hlediska zpevnění při creepu jeví jako problematický, neli spíše negativní. Při tepelném zpracování trubek se vyšší hustota dislokací může projevit zvětšením množství potenciálních nukleačních center pro vznik karbidu vanadu, zjemněním disperze této fáze a přírůstkem precipitačního zpevnění. Současně však lze očekávat pokles žárupevnosti (zejména při vzrůstu meze kluzu nad zhruba 550 MPa) následkem :

- vlivu dislokací na akceleraci difuzních pochodů a odpovídající pokles aktivační energie creepu a lomu při creepu [4, 14]
- efektivního uplatnění mechanismu „particle cutting“ při překonávání jemnější frakce částic disperzní fáze pohybujícími se dislokacemi [4, 7].

Z provedeného rozboru je zřejmé, že při interpretaci úrovně žárupevnosti nízkolegovaných CrMoV ocelí můžeme na mez kluzu ve výchozím stavu a poměr obsahů vanadu k uhlíku nahlížet jako na nezávisle proměnné veličiny stěžejního významu. Současně je však nutno připustit také uplatnění dalších faktorů, jejichž variabilita může oslabit statistickou významnost uvedených veličin. Kromě již

diskutovaných – obsahu molybdenu a hustoty dislokací – se jedná především o parametry ovlivňující průběh poškozovacích procesů při creepu bez prokazatelné modifikace hodnot meze kluzu, jako jsou např. obsahy nežádoucích příměsových prvků, nekovových inkluzí apod. Jako zcela logický pak můžeme očekávat určitý reziduální rozptyl závislosti hodnot meze pevnosti při tečení na mezi kluzu a obsazích vanadu a uhlíku v nízkolegovaných CrMoV žárupevných ocelích.

## 2. Experimentální materiál

Pro vyhodnocení vlivu meze kluzu a obsahu vanadu na žárupevnosti nízkolegované CrMoV oceli byl sestaven soubor 16ti provozních taveb, zpracovaných na bezešvé parovodní a přehřívákové kotlové trubky [8, 15]. Uvedené kotlové trubky byly v hodnoceném stavu provozně tepelně zpracovány normalizačním žiháním nebo kalením a popouštěním na jakost 15 128.5, 15 128.9 a 15 229.5 [2, 3], přičemž spektrum aplikovaných režimů úplného tepelného zpracování, volených rovněž s ohledem na rozměry jednotlivých kotlových trubek, umožnil dosáhnout žádoucího širokého rozmezí mechanických vlastností a především hodnot meze kluzu za normální teploty [4, 8, 15]. Soubor hodnocených kotlových trubek tedy zahrnuje :

- 7 taveb, odpovídajících svými jakostními parametry požadavkům na oceli 15 128.5 a
- 15 128.9 a vyznačujících se hodnotami poměru obsahů vanadu a uhlíku (v hm. %) v rozmezí 1,67 až 2,33 a meze kluzu 398 až 634 MPa
- 9 taveb jakosti 15 229.5 s rozmezím poměru V/C = 3,06 až 4,73 a hodnotami meze kluzu od 400 do 605 MPa.

## 3. Výsledková část

Matematicko-statistické vyhodnocení dosažených výsledků dlouhodobých creepových zkoušek, realizovaných v teplotním rozmezí 525 až 600°C, bylo provedeno odděleně pro každou hodnocenou tavbu, přičemž meze pevnosti při tečení za 10<sup>3</sup>, 10<sup>4</sup>, 10<sup>5</sup>h byly stanoveny výpočtem podle Seifertovy parametrické rovnice [16]. Tento vztah deklaruje aplikované napětí (mez pevnosti při tečení) jako kvadratickou funkci teplotně-časového parametru P ve tvaru :

$$\log R_{mT} = A_0 + A_1P + A_2P^2, \quad P = T(\log t_r + A_3) \quad (1)$$

kde  $R_{mT}$  je mez pevnosti při tečení (MPa),  $T$  – absolutní teplota (K),  $t_r$  – doba do lomu (h) a  $A_0$ -  $A_3$  jsou optimalizované konstanty.

Příklad teplotně-napěťové závislosti doby do lomu kotlové trubky  $\varnothing 273/25$  mm jakosti 15 229.5 je uveden na obr.1. Uvedená parovodní trubka obsahuje 0,16%C, 0,98%Cr, 0,55%Mo a 0,73%V ( $V/C = 4,56$ ) a byla tepelně zpracována normalizačním žiháním a popouštěním na mez kluzu 441 MPa.

V souladu se závěry provedeného rozboru studované problematiky byly sestaveny mnohonásobné lineární regresní vztahy, popisující mez pevnosti při tečení  $R_{mT}$  hodnocených ocelí v závislosti na vypočteném poměru obsahů vanadu a uhlíku V/C a zjištěné hodnotě meze kluzu za normální teploty ( $R_e$ ) ve tvaru :

$$R_{mT} = a.V/C + b.R_e + c, \quad (2)$$

v níž hodnoty  $R_{mT}$  a regresních parametrů  $a$ ,  $b$ ,  $c$  jsou funkcí teploty a časového horizontu creepové expozice.

V tab. I je uvedena specifikace parametrů regresního vztahu (1) pro hodnoty meze pevnosti při tečení za 10<sup>5</sup>h, stanovené pro soubor hodnocených taveb v teplotním rozmezí teplot 525 až 600°C. Uvedené závislosti jsou charakteristické převažujícím poklesem lineárních regresních parametrů  $a$ ,  $b$  s rostoucí teplotou a dále pak poměrně vysokými hodnotami indexu korelace 0,893 až 0,936, které jsou vysoce významné i na hladině významnosti 0,001. Ukazuje se tedy, že variabilita hodnot  $R_{mT}/10^5$  může být zhruba z 80 a 87% změnami obou zvolených nezávisle proměnných veličin, přičemž reziduální rozptyl souvisí jak s kolísáním jiných faktorů, jako např. obsahu molybdenu nebo hustoty dislokací, tak i s obvyklými experimentálními nepřesnostmi při stanovení obsahu vanadu, uhlíku, meze kluzu i při extrapolacím vyhodnocení meze pevnosti při tečení.

Tab. I – Specifikace parametrů lineárního regresního vztahu (2) pro popis hodnot $R_{mT}/10^5$				
Zkušební teplota (°C)	$a$	$b$	$c$	Index korelace
525	9,77	0,271	-2,02	0,893
550	12,66	0,186	-14,46	0,921
575	11,71	0,094	-2,92	0,936
600	8,61	0,021	14,18	0,895

Na základě dosažených výsledků můžeme potvrdit původní předpoklady o příznivém vlivu rostoucí meze kluzu a poměru  $V/C$  na žárupevnost hodnocených ocelí v sledovaném rozmezí creepové životnosti  $10^3$  až  $10^5$  h (obr.2). V důsledku poklesu hodnoty regresního parametru  $b$  s rostoucí teplotou nebo vypočtenou hodnotou Larson-Millerova parametru (obr.3) lze sice usuzovat na postupné oslabování příznivého vlivu meze kluzu na žárupevnost hodnocených ocelí, při souběžném poklesu meze pevnosti při tečení je však nutno považovat tento příspěvek (alespoň v oblasti realistických provozních životností trubkových systémů parních kotlů) za stále významný.

Poněkud složitějším průběhem se vyznačuje teplotně-časová závislost parametru  $a$ , vyjadřujícího míru vlivu poměru  $V/C$  na zvýšení hodnot dlouhodobých mezí pevnosti při tečení (obr.3). V technicky atraktivní oblasti mezí pevnosti při tečení od  $10^4$  h se maxima působení zmíněné veličiny dosahuje při úrovni Larson-Millerova parametru

$$P = T(15 + \log t_r) = 1,66 \cdot 10^4,$$

což odpovídá časovému horizontu zhruba  $1,5 \cdot 10^5$  h při  $550^\circ\text{C}$  nebo  $4 \cdot 10^4$  h při  $575^\circ\text{C}$ . Následný pokles intenzity příznivého působení tohoto příspěvku zpevnění, pozorovaný při vyšších teplotách a delších dobách do lomu, s největší pravděpodobností souvisí s účinnějším uplatněním tepelně aktivovaných procesů hrubnutí části disperzní fáze  $M_4C_3$ , a to zvláště u taveb s vyšší hustotou dislokací ve výchozím stavu.

#### 4. Závěr

V předloženém příspěvku jsou diskutovány mechanismy zpevnění CrMoV žárupevných ocelí 15 128 a 15 229 pro trubkové systémy parních kotlů z hlediska predikce jejich dlouhodobé žárupevnosti v oblasti teplot 525 až  $600^\circ\text{C}$ . S poměrně vysokými hodnotami indexu korelace jsou specifikovány lineární regresní vztahy, popisující mez pevnosti při tečení jako funkci hodnot meze kluzu za normální teploty a poměru hmotnostních obsahů vanadu a uhlíku v oceli (v rozmezí 1,67 až 4,73) a to v závislosti na creepové životnosti  $10^3$  až  $10^5$  h.

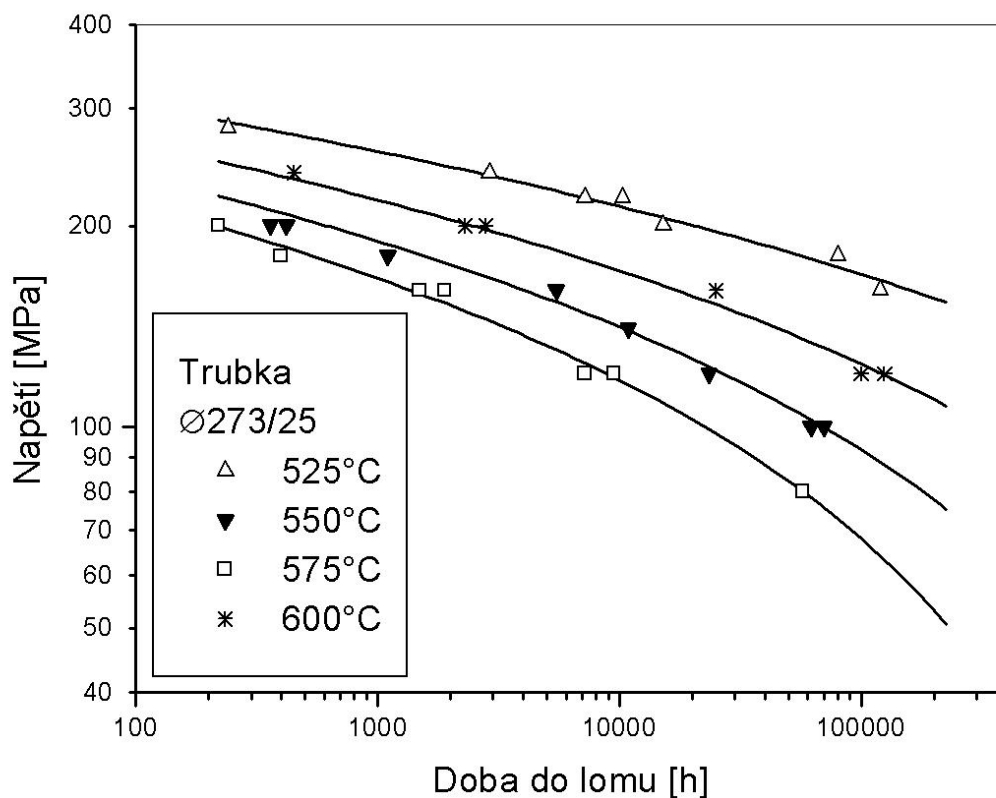
#### 5. Literatura

- [1] International Standard ISO 6303: Derivation of long time stress rupture properties, 1979
- [2] Norma ČSN 41 5128, účinnost od 1.3.1986
- [3] Norma VN 41 5229, účinnost od 1.8.1984
- [4] Sobotka, J. – Foldyna V.: Hutnické listy, 37, 1982, s. 484.
- [5] Prnka, T. – Foldyna, V. – Sobotka, J.: Archiv Eisenhüttenwesen, 44, 1973, s. 321.
- [6] Prnka, T. – Sobotka, J.: Kovové materiály, 15, 1977, s. 718.
- [7] Sobotka, J. – Foldyna, V. – Prnka, T.: Informationen ORGREB – Institut für Kraftwerke, 105, 1980, s. 61.
- [8] Sobotka, J. – Foldyna, V.: Hutnické listy 40, 1985, s. 248.
- [9] Sobotka, J. – Prnka, T. – Gladiš, R.: Hutnické listy, 32, 1977, s. 786.
- [10] Argent, B.B. – Van Niekerk, M.N. – Redfern, G.A.: JISI, 208, 1970, s. 830.
- [11] Baird, J.D. – Jamieson, A.: JISI, 210, 1972, s. 847.
- [12] Fuchs, A. – Ischner, B.: Acta Metall, 17, 1969, s. 201.
- [13] Pont, G. – Bastien, P.: Mem. Sci. Revue de Metallurgie, 67, 1970, s. 629.

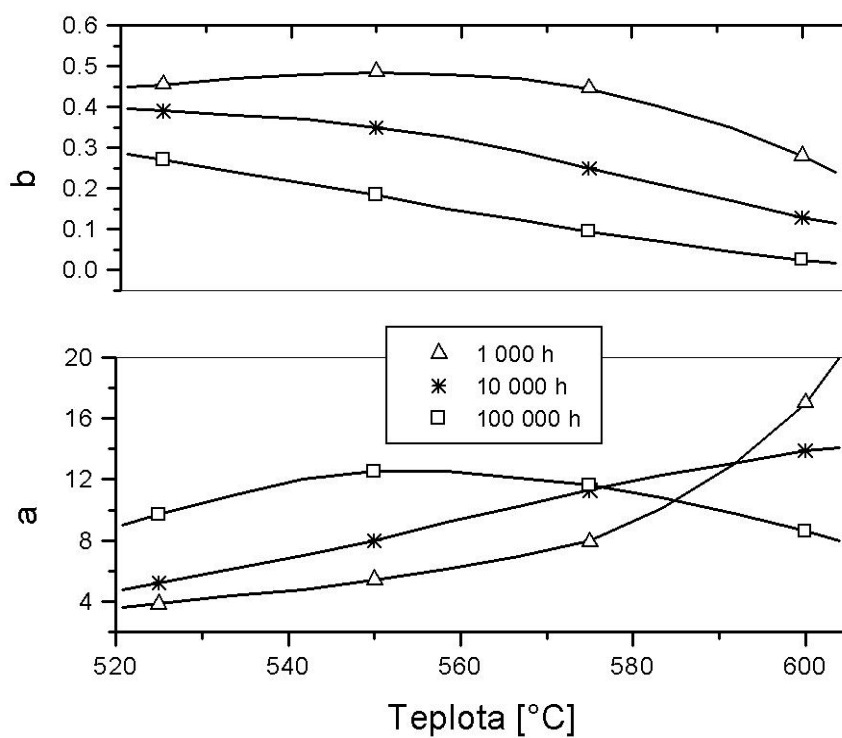
- [14] Foldyna, V. – Sobotka, J. – Million, B.: In: Difuze a termodynamika kovů a slitin, ÚFM Brno, 1984, s.230
- [15] Sobotka, J. et al.: Ověření dlouhodobých žárupevných vlastností hutních výrobků pro energetiku, závěrečná zpráva R-11-123-408, VÚ Vítkovice, Ostrava 1990.
- [16] Seifert W.: Warmfeste metallische Werkstoffe, Kammer der Technik, Zittau 1977, s. 23.

Adresní údaje o autorech:

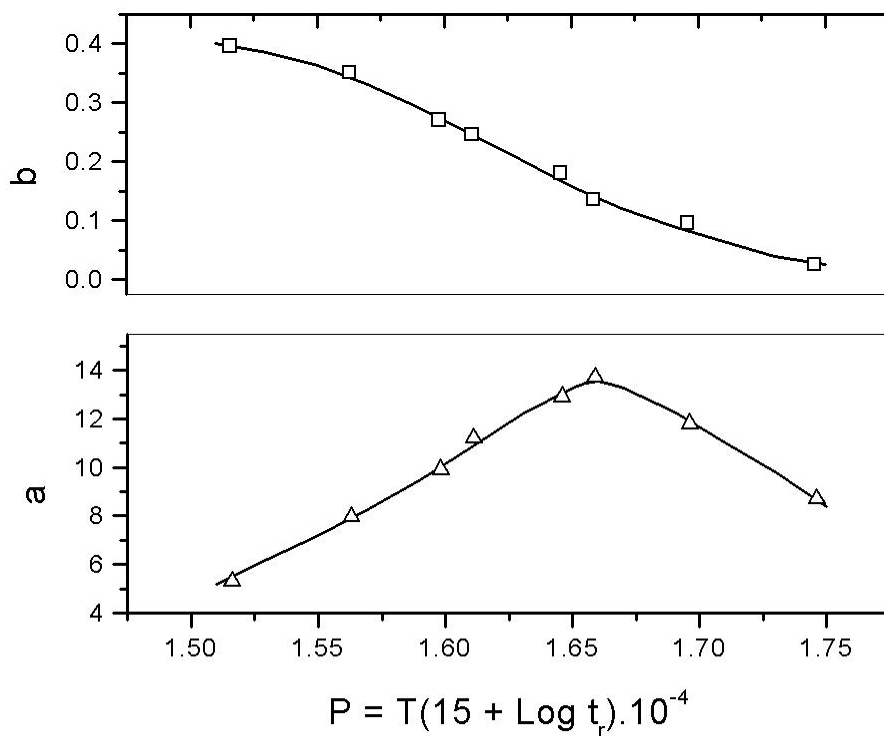
<i>Plné jméno s tituly:</i>	Ing. Jaromír Sobotka, CSc.
<i>Pracoviště a jeho začlenění do instituce/firmy:</i>	VÍTKOVICE – Výzkum a vývoj, spol. s r.o. Ústav materiálového inženýrství
<i>Adresa pro korespondenci:</i>	706 02 Ostrava, Pohraniční 31
<i>E-mail:</i>	
<i>Fax:</i>	069-2928927
<i>Telefon:</i>	069-2928914



Obr. 1: Teplotně – napěťová závislost doby do lomu trubky  $\varnothing 273/25$  mm jakosti 15 229.5



Obr. 2: Závislost regresních parametrů ve vztahu (2) na teplotě



Obr. 3: Závislost regresních parametrů ve vztahu (2) na Larson – Millerově parametru