

## STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ ÚNAVOVÝCH ZKOUŠEK V L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X<sub>U</sub>

Miroslav BALDA<sup>1</sup>, Jaroslav SVOBODA<sup>2</sup>, Vladislav FRÖHLICH<sup>3</sup>

**Abstract:** STATISTICAL PROCESSING OF FATIGUE TESTS IN L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X

The paper deals with a problem of making up protocols on material fatigue tests containing measured data, their regression, 90% and 95% confidence intervals, a diagram of all these functions, and a table of the processing results. All these steps are done in one computer run in the L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X environment without any import of external graphics or results. New styles have been developed for the purpose. The system is fast and reliable.

**Key words:** fatigue tests, data processing, L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X

### 1. ÚVOD

Únava materiálů je vědní oblast, která je v ohnisku zájmu výzkumníků více jak 150 let. Za tuto dobu vznikla celá řada technik zkoušení i vyhodnocování a interpretace experimentálních dat. V současné době se sleduje únavová životnost nejrůznějších materiálů jak v režimu klasického harmonického zatěžování, tak i při zatěžování pseudo-náhodném, a to při jednoosém i kombinovaném namáhání.

Ve všech případech je nezávisle proměnnou intenzita zatěžování  $\sigma$  vyjadřovaná obvykle v jednotkách mechanického namáhání (MPa), ať již jde o amplitudu harmonických napěťových cyklů  $\sigma_a$  nebo o směrodatnou odchylku  $s_b$  jednoosé náhodné napjatosti  $\sigma(t)$  anebo o směrodatnou odchylku  $s_d$  poškozujícího napětí při kombinovaném náhodném namáhání o složkách  $\sigma(t)$  a  $\tau(t)$ . Závisle proměnnou je životnost  $N$  kterou je u harmonického zatěžování počet cyklů  $N_a$  do vzniku definovaného poškození nebo počet opakování  $N_b$  charakteristické realizace (bloku) náhodného procesu při jednoosém nebo kombinovaném namáhání. Definovaným poškozením je podle dohody se zadavatelem buď únavová trhlina smluvené délky anebo lom.

Experimentální data je třeba zpracovat do vhodné formy. Tou je protokol o měření vytvořený na základě zpracování dat do regresní funkce, výpočtu pásem spolehlivosti, a pod. Důležitou částí protokolu je diagram měřených hodnot a vypočtených funkcí a tabulka výsledků. Tyto práce lze zajistit v několika krocích, každý jiným programem. Přetržitost řešení není spolehlivá a tak bylo rozhodnuto vytvořit nový programový systém na základě L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X<sub>U</sub>, který by danou úlohu vyřešil v jednom běhu.

#### 1.1. Výpočty v L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X<sub>U</sub>

T<sub>E</sub>X je sázecí systém, který vyvinul před léty prof. D. Knuth [1]. Jeho použití je pro začátečníka obtížné. S ohledem na uživatele vytvořil L<sup>A</sup>Mport nadstavbu T<sub>E</sub>X<sub>U</sub> [2], kterou nazval L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X. Tu zvládne i začátečník vybavený vhodným návodem [3]. Cílem T<sub>E</sub>X<sub>U</sub> i L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X<sub>U</sub> je vysázení dokonalého dokumentu. Oba programy si nedělají žádné nároky na výpočetní schopnosti programu, takže ty jsou minimální.

Během času se objevila řada ne zcela úspěšných pokusů, jak doplnit arzenál obou programů efektivní aritmetikou. Příčiny neúspěchu byly buď ve značné časové náročnosti nebo v omezeném rozsahu zobrazení reálných čísel v paměti počítače. Obrat nastal až v poslední době, kdy rychlost procesorů umožnila používat relativně pomalou softwarovou aritmetiku v přijatelných výpočtových časech. Z řady implementací reálné aritmetiky do L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X<sub>U</sub> [4], [5], [6] se

<sup>1</sup>Prof. Ing. Miroslav Balda, DrSc., FEng., Ústav termomechaniky AVČR CDM, Veveřská 11, 301 14 Plzeň, balda@cdm.it.cas.cz

<sup>2</sup>Ing. Jaroslav Svoboda, tamtéž, svoboda@cdm.it.cas.cz

<sup>3</sup>Vladislav Fröhlich, Bc. tamtéž, frohlich@cdm.it.cas.cz

ukázala poslední jako nejlepší. Navzdory tomu, že jde také o aritmetiku v pevné řádové čárce, její dynamický rozsah je obdivuhodný – zpracovává reálná čísla z intervalu  $\pm 10^{18}$  s 18 místy za desetinnou čárkou! K dispozici jsou základní aritmetické operace, podmíněné příkazy, řada elementárních funkcí a makra pro řešení kořenů polynomů do 4. stupně. V poslední době byly jeho možnosti dále rozšířeny knihovnou nových maker `fp-contrib.sty` [10] s dalšími funkcemi, polynomy, cyklem a řešením kořene nelineární funkce.

## 1.2. Grafika v L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>Xu

Grafické výstupy v T<sub>E</sub>Xu nebyly řešeny vůbec. L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X rozšířil možnosti sázení i o ne příliš pokročilou grafiku. Občas se potom objevila makra, která rozšiřovala paletu realizovatelných grafických prací. Podstatné zlepšení situace však způsobil až balík `curves.sty` [7], který přidal kreslení spojitých čar procházejících zadanými body a měřtkování grafických objektů pomocí lineárních transformací v rovině diagramu.

S využitím `curves.sty` a `fp-contrib.sty` byla zpracována knihovna maker `diagram.sty`, která zjednodušuje zadávání měřítek, jejich ukládání a obnovování, rotaci a zrcadlení grafických objektů, umožňuje kreslení i po částech lineárních čar, jednoduchých grafických objektů, vynášení lineárních i logaritmických os s popisy, histogramů a koláčových diagramů a výpočty vektorů hodnot funkcí a náhodných procesů. Knihovna obsahuje i makra pro kreslení složitých grafických papírů a diagramů včetně popisů a to v krocích s možností přerušování v prezentacích.

## 2. STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ ÚNAVOVÝCH DAT

Výsledkem  $k$  té únavové zkoušky je dvojice hodnot  $\{\sigma_k, N_k\}$ . Ať takových zkoušek je  $n$ . Zde  $\sigma$  zastupuje některou z výše uvedených napětových hladin  $\{\sigma_a, s_b, s_d\}$  a podobně  $N$  dosaženou životnost  $\{N_a, N_b\}$ . Pro statistické zpracování únavových zkoušek existuje norma ČSN [8].

Dvojice  $\{\sigma_k, N_k\}$  se vynášejí do diagramů jako body spolu s výsledky statistického zpracování. V něm je zapotřebí určit parametry regresní funkce a stanovit pásma spolehlivosti. U ocelí je potom žádoucí určit charakteristický bod zlomu  $N_c$  regresní čáry jako její průsečík s mezí únavy  $\sigma_c$ . To ovšem jen při harmonickém zatěžování kdy se regresní funkce nazývá Wöhlerovou křivkou nebo také S-N křivkou. Není ani bez zajímavosti, že způsob vynášení diagramu je reliktem doby vzniku této problematiky, protože se nezávisle proměnná  $\sigma$  vynáší na vertikální osu a závisle proměnná  $N$  na osu horizontální.

### 2.1. Regresní funkce – křivka životnosti

Mnoha zkouškami bylo prokázáno, že mezi  $\sigma$  a  $N$  platí exponenciální závislost

$$N = c\sigma^b, \quad (1)$$

kteřá logaritmováním přejde do tvaru

$$\log N = a + b \log \sigma, \quad (2)$$

kde  $a = \log c$ . Neznámé koeficienty  $a$  a  $b$  regresní funkce dostaneme řešením maticové rovnice plynoucí z metody nejmenších čtverců

$$\begin{bmatrix} n & S_\sigma \\ S_\sigma & S_{\sigma\sigma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_N \\ S_{\sigma N} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

v níž použité symboly zastupují sumy  $S_x = \sum_{i=1}^n \log x_i$ , případně  $S_{xy} = \sum_{i=1}^n \log x_i \log y_i$ . Odtud plynou pro neznámé koeficienty regresní funkce formule

$$a = \frac{S_N - b S_\sigma}{n}, \quad (4)$$

$$b = \frac{n S_{\sigma N} - S_\sigma S_N}{n S_{\sigma\sigma} - (S_\sigma)^2}. \quad (5)$$

Potřebné jsou i výběrové statistiky pozorování – výběrový průměr logaritmu nezávisle proměnné (amplitudy napětí)

$$\mu(\log \sigma) = \frac{S_\sigma}{n} \quad (6)$$

a výběrový rozptyl logaritmu závisle proměnné (počtu cyklů do lomu). Ten se určí z formule

$$s^2(\log N) = \frac{S_{NN} - (aS_N + bS_{\sigma N})}{\nu}, \quad (7)$$

kde  $\nu = n - 2$ . Jemu odpovídající výběrová směrodatná odchylka je  $s(\log N) = \sqrt{s^2(\log N)}$ .

## 2.2. Pásmo spolehlivosti

Označme pro zjednodušení zápisu  $x = \log N$  a  $y = \log \sigma$ . Potom oboustranný konfidenční interval pro střední hodnotu  $E(x; y)$  v bodě  $y$  se vypočte z nerovnosti

$$x(a, b; y) - k(y) < E(x; y) < x(a, b; y) + k(y), \quad (8)$$

kde  $x(a, b; y)$  je bod regresní funkce,  $E(x; y)$  střední hodnota  $x$  na hladině  $y$  a  $k(y)$  polovina šířky pásma, která se vypočte z formule

$$k(y) = k(\log \sigma) = t_\alpha(\nu) s(\log N) \left[ \frac{1}{n} + \frac{n(\log \sigma - \mu(\log \sigma))^2}{n S_{\sigma\sigma} - S_\sigma^2} \right]^{1/2}. \quad (9)$$

Kritickou hodnotu  $t_\alpha(\nu)$  Studentova rozdělení  $t$  lze sice nalézt pro libovolný počet stupňů volnosti  $\nu = n - 2$  a vybrané hodnoty  $\alpha$  v tabulkách, ale to je pro automatizované zpracování dat nevhodné. Byly proto nalezeny funkční náhrady pro nejčastější šířky pásem spolehlivosti  $P = 90\%$  a  $P = 95\%$ , jimž odpovídají  $\alpha = 1 - (100 - P)/200$ , tedy  $\alpha = 0,95$  a  $\alpha = 0,975$ .

Regresní funkce pro  $t_\alpha(\nu)$  měly tvar polynomů v mocninách  $1/\nu$

$$t_\alpha(\nu) \doteq \sum_{k=0}^4 \frac{c_k}{\nu^k} \quad (10)$$

s koeficienty z vedlejší tabulky. Ty byly vypočteny Matlabem z tabulek publikovaných v knize [9].

$k$	$c_k; P = 90\%$	$c_k; P = 95\%$
0	1.64498489	1.96166717
1	1.51730932	2.31430561
2	1.50707503	3.42121967
3	0.58878795	0.25509826
4	1.05584280	4.75370697

## 3. PROGRAMOVÁ REALIZACE

Mějme za úkol zpracovat protokol z únavových zkoušek materiálů. Mělo by v něm být označení zkoušeného materiálu, diagram s měřenými body, regresní čarou a pásmem spolehlivosti a nakonec i tabulka naměřených a zpracovaných dat. Dále žádejme, aby dílčí výsledky bylo možno zobrazovat postupně při prezentacích. Již tato složitost zadání naznačuje, že úloha bude řešena v etapách sérií maker. Ty pak byly sdruženy do knihoven `SNcurv.sty` a `diagram.sty` ([10]).

Navenek jsou pro uživatele nutné pouze úkony – sestavit seznamy dat a vyvolat postupně dvě makra – `\SNcurv` a `\SNtable`. Tato makra jsou součástí speciálního stylu `SNcurv`, který je zapotřebí uvést v záhlaví dokumentu příkazem `\usepackage{SNcurv}`.

Aby se snížilo nebezpečí interakce výpočtů s přerušovanými grafickými výstupy je účelné, aby všechny výpočty byly provedeny jako první. To zajišťuje makro, které nese název `\SNcalc`. Jím se počítají koeficienty regresní funkce, pásma spolehlivosti a načítají tabulky pro grafické výstupy a závěrečnou tabulku výsledků. Dále `\SNcalc` vyvolává vnitřní makra pro odřezávání výstupů, které by ležely mimo plochu diagramu. Následuje posloupnost volání maker pro výstup pracovní plochy diagramu `\Dgrid` a vykreslení měřených bodů, regresní funkce a pásem spolehlivosti pomocí šestice maker `\Drawfun`. Tato volání jsou na vhodných místech proložena voláním uživatelského makra `\SNuser`, které podle uživatelského přání může při prezentacích zastavovat postup zobrazování výsledků.

Z popisu dat je patrna jejich skladba, a proto se jí nebudeme podrobně zabývat. Uvedme jen, že amplitudy napětí se vkládají v megapascalch v sestupné posloupnosti hodnot a počty harmonických cyklů do lomu v tisících, příp. počty bloků náhodného procesu v jednotkách. Data pro kreslení osnovy (mřížky) a popis os mohou využívat zápisu obvyklého u lineárních seznamů jako u cyklů ve tvaru (počátek:krok:konec).

Makro `\SNcurv` zanalyzuje své parametry a vytvoří z nich jiné pro makro `\SNcalc` a další makra pro kreslení. `\SNcalc` najde parametry  $a$  a  $b$  regresní funkce, jejíž hodnoty vypočte jak pro měřené napěťové úrovně, tak i pro dolní a horní mez pracovní plochy. Dále pro stejné úrovně vypočte hodnoty 90 a 95 procentních pásem spolehlivosti vypočteného odhadu. Z vypočtených hodnot se současně sestavují pracovní tabulky. U všech funkcí potom prověřuje jejich zobrazitelnost uvnitř pracovní plochy a případné přečnívající konce se oříznou makrem `\modtbl`. Za tím účelem se musí vyřešit průsečíky uvedených čar s levou a pravou mezí zobrazovaného intervalu pomocí makra `\solve`. Navíc je zapotřebí u harmonického zatěžování zalomit regresní čáru vytaženou silně na hladině meze únavy  $\sigma_c$ . Bod zlomu  $N_c$  se vypočte pomocí makra `\xsolve`. Ukončené zkoušky se vyznačují plnými tečkami a neukončené se vynesou na pravém okraji pracovní plochy prázdnými kroužky.

Vlastní diagram se kreslí z makra `\SNcurv` pomocí maker z knihovny `diagram.sty`, a to osnova pomocí `\Dgrid`, měřené body a funkce pomocí `\Drawfun` a hlavička diagramu pomocí `\Dtext`. Tímto makrem může uživatel vytvořit i legendu nebo pootočený popis vertikální osy. Tabulka zpracovaného měření vytvořená již v makru `\SNcalc` potom vystoupí vyvoláním `\SNtable`. Hlavička tabulky má v závislosti na jazyku dokumentu český anebo anglický text.

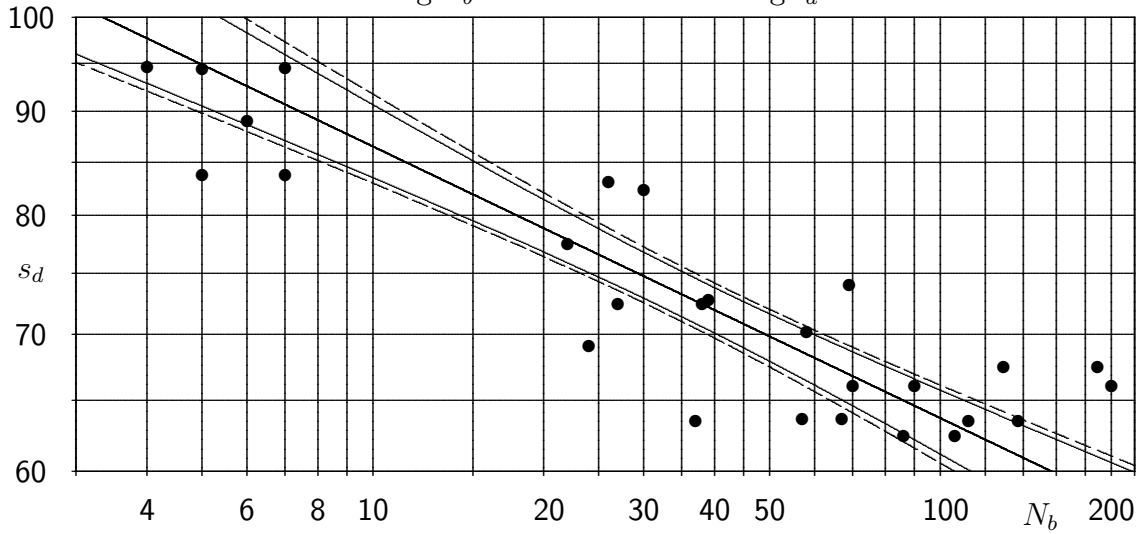
**Příklad 1:** Aplikace ukazuje použití uvedených maker na zpracování protokolu o rozsáhlých únavových zkouškách, o nichž se pojednává z pohledu šíření trhlin v jiném referátu [11].

```

\sffamily%
\SNcurv%      Nadpis diagramu, materiál, mez únavy u SN, nebo 0 u náhodného
(Životnosti trubkových vzorků v $N_b$, ČSN 41\,1523.1, 0)%
(140,80)%     rozměry plochy diagramu (horizontálně, vertikálně)
(10,8,12)%    odstupy pracovní plochy (vlevo, dole, nahoře)
(2.79, 94.5, 4,%   měřená data (zde kappa, s_d, N_b)
0.93, 94.4, 7,%
118.6, 94.3, 5,%   s      = směrodatná odchylka (std)
0, 88.93, 6,%
0, 83.67, 7,%     kappa = s_tau/s_sigma
0, 83.67, 5,%     s_d  = std poškozujícího napětí
0.48, 83.04, 26,% = [s_sigma^2 + (sigma_c/tau_c * s_tau)^2]^0,5
2.98, 82.31, 30,%
0.94, 77.4, 22,%
0.94, 73.91, 69,%
205.3, 72.66, 39,%
0.47, 72.4, 38,%
0.47, 72.4, 27,%
159, 70.13, 58,%
0, 69.03, 24,%
2.78, 67.42,189,%
2.78, 67.42,129,%
0.97, 66, 70,%
0.97, 66, 90,%
0.97, 66, 200,%
0.48, 63.6, 67,%
0.48, 63.6, 57,%
3.04, 63.4, 37,%
3.04, 63.4, 112,%
3.04, 63.4, 137,%
78.5, 62.4, 86,%
78.5, 62.4, 106)%
(3:1:10, 15:5:50, 60:10:100, 120:20:220)% osnova nad osou x      (N_b)
($N_b$,150,-5,4:2:10, 20:10:50, 100,200)% popis osy x
(60:5:100)% osnova vedle osy y      (s_d)
($s_d$,75,-6,60:10:100)% popis osy y
\lines{0.5}%
\nopagebreak%
\SNtable%      Tabulka výsledků

```

**Životnosti trubkových vzorků v  $N_b$  při šíření únavové trhliny**  
 Materiál: CSN 411523.1 13. října 2004  
 Kombinované náhodné zatěžování  
 $\log N_b = 15.5773 - 7.5257 \log s_d$



#	měření		regrese	$P = 90\%$		$P = 95\%$	
	$s_d$	$N_b$	$N_r$	$N_\ell$	$N_h$	$N_\ell$	$N_h$
2.79	94.5	4	5.139	3.436	7.685	3.163	8.349
0.93	94.4	7	5.180	3.468	7.736	3.194	8.402
118.6	94.3	5	5.222	3.501	7.788	3.224	8.457
0	88.93	6	8.118	5.831	11.302	5.447	12.098
0	83.67	7	12.844	9.842	16.761	9.317	17.705
0	83.67	5	12.844	9.842	16.761	9.317	17.705
0.48	83.04	26	13.596	10.494	17.614	9.949	18.578
2.98	82.31	30	14.530	11.308	18.670	10.739	19.659
0.94	77.4	22	23.082	18.810	28.326	18.034	29.545
0.94	73.91	69	32.665	27.053	39.441	26.023	41.002
205.3	72.66	39	37.139	30.784	44.805	29.618	46.570
0.47	72.4	38	38.154	31.620	46.039	30.420	47.855
0.47	72.4	27	38.154	31.620	46.039	30.420	47.855
159	70.13	58	48.491	39.896	58.937	38.325	61.352
0	69.03	24	54.617	44.621	66.853	42.803	69.693
2.78	67.42	189	65.232	52.544	80.985	50.255	84.672
2.78	67.42	129	65.232	52.544	80.985	50.255	84.672
0.97	66	70	76.566	60.698	96.583	57.864	101.312
0.97	66	90	76.566	60.698	96.583	57.864	101.312
0.97	66	200	76.566	60.698	96.583	57.864	101.312
0.48	63.6	67	101.181	77.593	131.939	73.467	139.349
0.48	63.6	57	101.181	77.593	131.939	73.467	139.349
3.04	63.4	37	103.608	79.210	135.521	74.951	143.222
3.04	63.4	112	103.608	79.210	135.521	74.951	143.222
3.04	63.4	137	103.608	79.210	135.521	74.951	143.222
78.5	62.4	86	116.776	87.858	155.213	82.860	164.576
78.5	62.4	106	116.776	87.858	155.213	82.860	164.576

Na diagramu je vynesena závislost životnosti v počtu opakování  $N_b$  bloku náhodného procesu na směrodatné odchylce  $s_d$ , pro níž platí

$$s_d = \sqrt{s_\sigma^2 + \left(\frac{\sigma_c}{\tau_c} s_\tau\right)^2},$$

kteřá je rozhodující pro proces poškozování. Počet  $N_b$  dvacetiminutových realizací kombinace zatěžovacích náhodných procesů vyvolávající napěťové složky  $\sigma(t)$  a  $\tau(t)$ , byl měřen od okamžiku vzniku únavové trhliny o délce 0,5 mm. Pro spolehlivou funkci zpracování a vynášení diagramu je *nutné* volit meze pracovní plochy diagramu tak, aby body všech ukončených zkoušek ležely *uvnitř*. Body na mezích a vně pracovní plochy totiž nevstupují do výpočtů.

Rovnice regresní čáry vynesené tučně je v záhlaví diagramu generována automaticky včetně správných symbolů. Totéž platí i pro sloupec „měření“ v tabulce konečných výsledků. Tato vlastnost je řízena ze vstupních dat – údaje pro mez únavy. Pro vyhodnocování měření při harmonickém zatěžování se zadá reálná mez únavy. Je-li však zatěžování jednoosé, náhodným procesem, uvede se -1 místo meze únavy. Při zkoušce s kombinovaným zatěžováním se udá číslo 0. Meze 90 % pásma spolehlivosti jsou vyneseny slabě plně a 95 % pásma čárkovaně.

Symbol # v záhlaví prvního sloupce tabulky je zkratkou pro označení vzorků. V našem případě jsou údaje v tomto sloupci poměrem směrodatných odchylek složek napětí  $\kappa = s_\sigma/s_\tau$ .

**Příklad 2:** Mějme dále za úkol zpracovat do Wöhlerovy křivky sérii obyčejných únavových zkoušek v tahu-tlaku vrubovaných vzorků z materiálu ČSN 411523.1 o mezní amplitudě napětí trvalé pevnosti 130 MPa. Data této úlohy jsou tentokrát zadaná v poněkud jiné formě.

```

\sfamily%
\noindent%
\edef\matdata%           Nadpis protokolu, materiál, mez únavy
  {Křivka životnosti -- obvodový vrub s  $\alpha=2.4$ , ČSN 41\,1523.1, 130}%
\edef\diaglen%          Rozměry os diagramu
  {90,65}%              xlen, ylen
\edef\diagdxy%          Odsazení diagramu od počátku
  {10,8,12}%            dx, dy, prostor na záhlaví
\edef\expdata%          Experimentální data s klesajícím napětím
  {A,240,23.360,%
   B,200,145.000,%
   C,180,55.380,%
   D,170,118.300,%
   E,160,760.300,%
   F,150,1605.000,%
   G,140,677.700,%
   H,130,5000.000,%      neukončená zkouška
   I,120,5000.000)%      neukončená zkouška
\edef\xgrid%            Seznam souřadnic x mřížky v tisících cyklů
  {20:10:100, 200:100:1000, 1500,2000:3000}%
\edef\xlabels%          Popis osy x
  { $N_a$ ,1800,-5, 20,40,60,100,200,400,600,1000,3000}%
\edef\ygrid%            Seznam souřadnic y mřížky v [MPa]
  {110:10:250}%
\edef\ylabels%          Popis osy y
  { $\sigma_a$ ,170,-5, 110,150:50:250}%
%
\begin{center}%
  \SNcurv%              Výpočty a diagram
  (\matdata)(\diaglen)(\diagdxy)%
  (\expdata)%
  (\xgrid)(\xlabels)%
  (\ygrid)(\ylabels)%
  \lines0%

  \SNtable%            Tabulka výsledků
  \rmfamily%
\end{center}%
}%

```

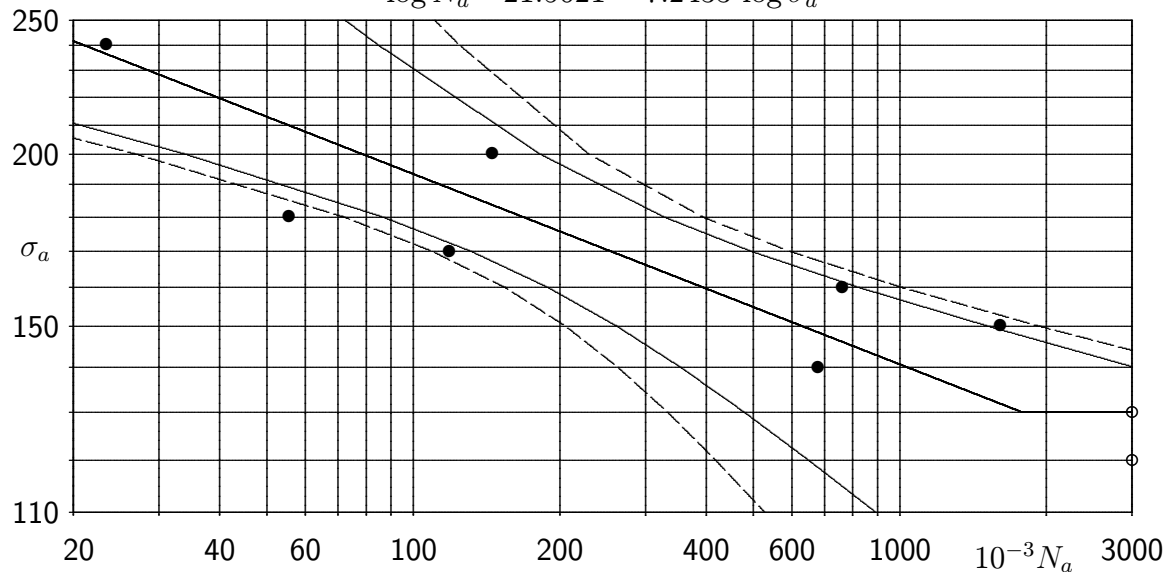
**Křivka životnosti – obvodový vrub s  $\alpha = 2.4$**

Materiál: ČSN 41 1523.1

13. října 2004

$$\sigma_c = 130 \text{ MPa}, \quad N_c = 1779132 \text{ cyklů}$$

$$\log N_a = 21.5621 - 7.2433 \log \sigma_a$$



Tabulka měřených dat, hodnot regresní funkce a pásem spolehlivosti:

#	měření		regrese	$P = 90\%$		$P = 95\%$	
	$\sigma_a$	$N_a$	$N_r$	$N_\ell$	$N_h$	$N_\ell$	$N_h$
A	240	23.360	20.968	5.197	84.597	3.537	124.300
B	200	145.000	78.540	33.895	181.986	26.882	229.463
C	180	55.380	168.470	86.583	327.805	72.058	393.880
D	170	118.300	254.875	131.363	494.519	109.412	593.733
E	160	760.300	395.398	189.355	825.646	154.549	1011.586
F	150	1605.000	631.036	262.054	1519.563	205.638	1936.443
G	140	677.700	1040.126	354.898	3048.374	263.804	4101.003
H	130	5000.000	1779.132	478.031	6621.568	332.665	9515.001
I	120	5000.000	3176.870	647.799	15579.681	417.775	24157.751

Z diagramu je patrné, že i nedokončené zkoušky se vynášejí jako prázdné kroužky na pravém okraji pracovní plochy diagramu, i když ta nemusí být shodná se skutečně provedeným počtem cyklů. V našich dvou případech byly zkoušky ukončeny při  $N_a = 5 \cdot 10^5$ , ale vyneseny jsou na  $N_a = 3 \cdot 10^5$  jako právě mezi diagramu.

Z obrázku vyplývá, že se proti předešlé úloze změnilo i jeho záhlaví, které nyní obsahuje jak informaci o zadané „mezi únavě“, tak i o vypočteném počtu cyklů  $N_c$  na zlomu Wöhlerovy křivky. Rovněž v hlavičce tabulky je ve sloupcích „měření“ jiný popis odpovídající řešené úloze. Počet cyklů  $N_c$  se počítá jako průsečík regresní přímky s čarou kritické amplitudy – „mezi únavy“ vrubovaného vzorku.

#### 4. ZÁVĚRY

Existuje řada dobrých důvodů proč pro jednodušší práce spojené s výpočty a grafikou použít sázecí systém L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X. Je to především dokonalé splnění požadavků uživatele na vzhled výsledného dokumentu. Nezanedbatelným rysem je rovněž kompaktnost zdrojové formy dokumentu – není zapotřebí nic importovat, protože vše se odehraje v rámci jednoho běhu programu L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X. Tato vlastnost má především význam u protokolů, které tím, že nejsou zhotovovány po etapách v různých programech a nakonec pospojovány, mohou být certifikovány jako celek bez nebezpečí záměny částí dokumentu s jinou úlohou.

Využití  $\LaTeX$ u pro zpracování únavových zkoušek se velmi osvědčilo, takže v současnosti se jím v Ústavu termomechaniky zpracovávají všechny zkoušky životnosti materiálů jak při harmonickém tak i náhodném jednoosovém i kombinovaném namáhání. Tuto pružnost umožňuje systém maker pro  $\LaTeX$  shrnutých do stylu `SNcurv.sty`, které spolupracují se styly pro aritmetiku `fp.sty` a `fp-contrib.sty` a pro kreslení – `diagram.sty` – za pomoci knihovny obecných maker `support.sty`. Navzdory této vnitřní složitosti je pro uživatele jejich ovládání velmi jednoduché. Volá totiž maximálně dvě makra – `\SNcurv` s parametry pro výpočet a kreslení diagramu a fakultativně i `\SNtable` (bez parametrů) pro tabulkový výstup výsledků.

Uvedené příklady ukázaly, že  $\LaTeX$  je vhodný nástroj pro sázení dokumentů doprovázených neimportovanými diagramy, které byly vypočteny během zpracování dokumentu. Výhodou tohoto řešení je snadnost navrhování pracovní plochy diagramu s jejím plným využitím a doplňování příp. editace dat, která se zpracovávají, ovšem za cenu dalšího běhu překladu. Další výhodou je možnost postupného zobrazování diagramů při prezentacích. Nevýhodou však je, že u nové úlohy jiného druhu, než pro který jsou připravena speciální makra, je zapotřebí tato makra naprogramovat. Uživatel však při využívání výše uvedených maker není zcela bezmocný. Může totiž, aniž by editoval připravená makra, měnit popis osy  $y$  na pootočený o  $90^\circ$  tím, že v datech zadá popis vertikální osy jako prázdný a potom pro popis použije makro `\Dtext` s požadovaným pootočeným textem umístěným na vybraném místě (viz [10]).

S ohledem na poměrně malou rychlost výpočtů není  $\LaTeX$  vhodným prostředkem pro složité výpočty. Snad nejsložitější úlohou by mohlo být řešení kořene nelineární rovnice makrem z knihovny `fp-contrib.sty`. Jinak je systém vybaven možností číst soubory dat vygenerované jinými programy. Tuto možnost však má smysl využít jen tehdy, chceme-li tato data dále zpracovávat a případně doplňovat, anebo zlepšit rozlišitelnost jejich zobrazení v diagramu.

**Poděkování:** Práce je jedním z výstupů grantového projektu č. 101/02/0043 Grantové agentury ČR a výzkumného záměru Ústavu termomechaniky AV ČR č. AVEZ 2076919.

## LITERATURA

- [1] D. E. Knuth: *The  $\TeX$ book*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1994
- [2] L. Lamport:  *$\LaTeX$ : A document preparation system*, 2nd ed. Addison-Wesley, Boston, 1994
- [3] J. Rybička:  *$\LaTeX$  pro začátečníky*, 3. vyd.. Konvoj &  $\zeta$ TUG, Brno, 2003
- [4] F. Buchholz: `realcalc.tex` – Real arithmetic with big values and high precision. DANTE, 1993
- [5] M. Balda: *Uživatelské nadstavby sázečního systému  $\LaTeX$  2.09* Západočeská univerzita, Fakulta aplikovaných věd, Plzeň, 1997; viz i <http://www.cdm.cas.cz> pod publikacemi autora.
- [6] M. Mehlich: *Fixed point arithmetic for  $\TeX$  – fp-package*. In: `texmf\source\latex\fp\readme.fp`, 1996
- [7] Ian Maclaine-cross: *Curves in  $\LaTeX$  Pictures. A manual for `curves.sty` and `curves1s.sty`*. Sydney, 2000, In: A subdirectory `texmf\source\latex\curves`
- [8] ČSN 42 0368: *Zkoušení kovů. Zkoušky únavy kovů. Statistické vyhodnocování výsledků zkoušek únavy kovů. Československá státní norma*, Vyd. ÚNM, Praha, 1974
- [9] J. Antoch, D. Vorlíčková: *Vybrané metody statistické analýzy dat*. Academia, Praha, 1992
- [10] M. Balda: *Výpočty a diagramy v  $\LaTeX$ u*. In: *Zpravodaj  $\zeta$ TUG*, v tisku, 2004.
- [11] J. Svoboda, M. Balda, V. Fröhlich: *Porovnání přístupů k hodnocení šíření únavových trhlin*. Konf. Computational Mechanics 2004, Nečtiny, 2004