

TN01000024/08-V005 LIBRARY OF CODES FOR PLASTICITY AND
CREEP MODELS IMPLEMENTATION

projekt: Národní centrum kompetence - Kybernetika a umělá inteligence

identifikační kód projektu: TN01000024

program: Národní centra kompetence 1 - TAČR

období řešení: 2019–2022

název dílčího projektu: Automatizace a optimalizace výrobních systémů

identifikační kód dílčího projektu: TN01000024/08

Dušan Gabriel, Jan Masák, Slavomír Parma, René Marek, Petr Pařík, Jiří Plešek
Ústav termomechaniky AV ČR, v. v. i.

31. prosince 2020

Kapitola 1

Stručný popis materiálové knihovny

V rámci dílčího projektu “TN01000024/08-Automatizace a optimalizace výrobních systémů” byla vyvíjena knihovna fortranských MKP procedur “TN01000024/08-V005-Library of codes for plasticity and creep models implementation” pro modelování elastoplastického a creepového chování 3D tištěných kovových materiálů. Knihovna je určena pro simulaci chování 3D tištěných kovových materiálů s cílem optimalizace jejich mechanických vlastností s ohledem na různé parametry výrobního procesu a vývoj zkušebních postupů. Knihovna je součástí MKP systému PMD (Package for Machine Design), který je dlouhodobě vyvíjen v ÚT AV ČR, v. v. i.

Do výpočtového systému PMD [1] byly formou nových knihovnických podprogramů implementovány modely plasticity a creepu, které umožňují simulovat nelineární odezvu materiálů 3D tištěných kovových materiálů. Konkrétně se jedná o modely:

- Nortonův–Baileyův model creepu
- Komplexní model creepu (navržený RNDr. V. Bínou, CSc. a kol. [2])
- Model creepu pro tranzientní zatížení (navržený RNDr. L. Klocem, CSc. a kol. [3])
- Dafalias–Feigenbaum model plasticity [4, 5]

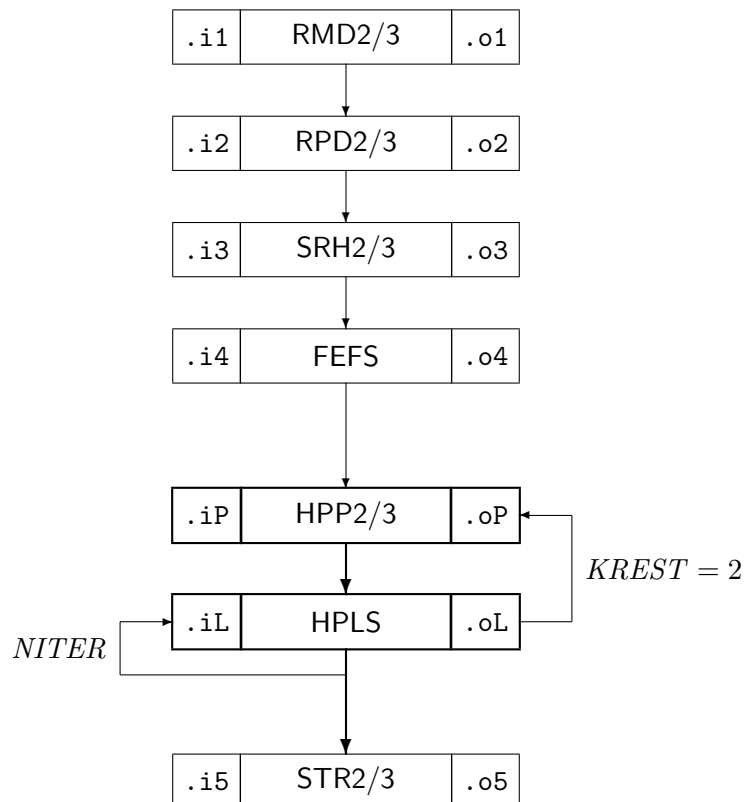
Podprogramy jsou napsány v programovacím jazyce **Fortran** a nevyužívají kromě vlastních knihoven systému PMD žádné další externí knihovny.

1.1 Postup výpočtu s materiálovými modely creepu a plasticity

Při výpočtu se postupuje podle schématu pro nelineární statickou úlohu podle manuálu systému PMD [1], který je dostupný na <http://www.pmd-fem.com/manualy.html>.

1. Lineární výpočet: Nejprve se standardním způsobem provede výpočet lineární elastostatické úlohy (posloupnost programů RMD2/3—RPD2/3—SRH2/3—FEFS).
2. Příprava vstupů pro nelineární výpočet (program HPP2/3): Ve vstupním souboru `name.iP` se definuje zvolený model creepu/plasticity. Materiálové parametry creepových modelů se zapíší do libovolně pojmenovaných textových souborů, jejichž přiřazení prvkům MKP sítě je specifikováno v souboru `name.DAT`.
3. Nelineární analýza (program HPLS): Nelineární řešič založený na kvazi-newtonovské metodě BFGS provede vlastní řešení úlohy podle zadaných parametrů v řídicím souboru `name.iL` s využitím nově implementovaných materiálových subroutin.
4. Vyhodnocení napětí a posuvů (program STR2/3): Výstupem nelineárního řešiče je pole napětí a posuvů v zadaném MKP modelu v textové/binární formě připravené pro další zpracování.

Výpočet probíhá voláním dílčích programů systému PMD z příkazové řádky operačního systému. Vyhodnocení vypočtených napětí a posuvů je možné provést v grafickém postprocesoru systému PMD (program GFEM).



1.1.1 Formát souboru name.iP

```

; řízení výpočtu
IP KREST NLC NCYC KMOD KCRP KLARG KCNT 0 KURHS 0 L1 L2 ... LNLC
RP 10*0 t1 t2 ... tNLC

```

```

; alternativní zadání zatěžovací posloupnosti
LC L1 t1
LC L2 t2
...
LC LNLC tNLC

```

```

; ukončení vstupních dat
EN
EN

```

Poznámka

- Model creepu se volí parametrem KCRP na IP řádku.
- Model plasticity se volí parametrem KMOD na IP řádku.

1.1.2 Formát souboru name.DAT

```

number N
jméno souboru (1)
jméno souboru (2)
...
jméno souboru (N)
material 2 kB(2) n(2)
seznam prvků (2)
...
material i kB(i) n(i)

```

```
seznam prvků (i)
...
material N kB(N) n(N)
seznam prvků (N)
```

Na první řádek se za klíčové slovo **number** zapíše počet použitých materiálů N . Na dalších N řádků se zapíše jména souborů, ve kterých jsou uloženy parametry materiálů. Pak následuje $N - 1$ bloků, kde se jednotlivé materiály přiřadí prvkům.

Každý blok začíná hlavičkou uvedenou klíčovým slovem **material**, kde i je pořadové číslo materiálu ($i \geq 2$), k_B udává způsob výpočtu počáteční deformace pro Bínův model (u jiných modelů se hodnota ignoruje) a n je počet prvků, kterým je i -tý materiál přiřazen. Na další řádky bloku se zapíše seznam prvků, kterým je i -tý materiál přiřazen (lze využít zkrácené notace s dvojtečkou).

Blok pro materiál $i = 1$ se *nezapíše*. Tento materiál je implicitně přiřazen všem prvkům, kterým nebyl v rámci bloků **material** přiřazen materiál $i \geq 2$. Hodnota $k_{B(1)}$ pro Bínův model se určí z druhé číslice klíče KCRP v souboru **name.iP**. Je-li v creepové úloze použit jen jeden materiál, obsahuje soubor **name.DAT** pouze dva řádky.

1.2 Nortonův–Baileyův model creepu

Nortonův–Baileyův model se aktivuje zadáním $KCRP = 3$ v souboru **name.iP**. Materiálové konstanty K , n a m se zadávají v samostatných vstupních souborech, které je nutné přiřadit jednotlivým prvkům sítě pomocí souboru **name.DAT**.

1.2.1 Formát souboru s materiálovými parametry

```
*
* Komentář
*

NB MODEL
PMD/ANSYS

POCET DAT
N

DATA - T K N M
T1 K1 N1 M1
...
TN KN NN MN
```

- Počet řádků úvodního komentáře není omezen.
- Před každým blokem musí být prázdný řádek.
- Blok NB MODEL obsahuje klíčové slovo buď PMD, nebo ANSYS (viz dále).
- Blok POCET DAT obsahuje hodnotu N , udávající počet řádků v bloku DATA.
- Blok DATA - T K N M obsahuje N řádků čtveřic hodnot $[T, K, n, m]$ pro model PMD, nebo $[T, C_1, C_2, C_3]$ pro model ANSYS. Teplota se zadává ve °C.

1.3 Komplexní model creepu

Komplexní model se aktivuje zadáním $KCRP = pqr$ v souboru **name.iP** na tříčíselnou hodnotu:

- první číslice (pozice stovek) je $p = 2$
- druhá číslice (pozice desítek) $q \in \{1, 2, 3\}$ udává způsob výpočtu počáteční deformace
 - typ 2a)

- typ 2b)
- typ 2c)
- třetí číslice (pozice jednotek) $r \in \{1, 2, 3, 4\}$ udává způsob přechodu mezi křivkami tečení
 - teorie Strain Hardening
 - teorie Time Hardening
 - teorie Life Fraction Rule
 - teorie Strain Fraction Rule

Materiálové konstanty E_1 až E_3 , A , B , Q , n , B_1 až B_3 , N_1 až N_5 , A_1 až A_6 , M_1 až M_5 , N , M , K_1 a K_2 se zadávají v samostatných vstupních souborech, které je nutné přiřadit jednotlivým prvkům sítě v souboru `name.DAT`.

1.3.1 Formát souboru s materiálovými parametry

*
* Komentář
*

POCATECNI DEFORMACE

E1
E2
E3

PEVNOST PRI TECENI

A1
A2
A3
A4
A5
A6

2B)

A
Q
B
n

2C)

A
Q
n
B1
B2
B3
N1
N2
N3
N4
N5

MEZNA DEFORMACE

M1
M2
M3

M4
M5

FUNKCE ZPEVNENI

N
M
K1
K2

- Počet řádků úvodního komentáře není omezen.
- Před každým blokem musí být prázdný řádek.
- Blok POCATECNI DEFORMACE obsahuje konstanty pro výpočet počáteční deformace.
- Blok 2B) obsahuje další konstanty pro výpočet počáteční deformace; je-li $k_B \in \{1, 3\}$, blok se úplně vynechá
- Blok 2C) obsahuje další konstanty pro výpočet počáteční deformace; je-li $k_B \in \{1, 2\}$, blok se úplně vynechá
- Blok PEVNOST PRI TECENI obsahuje konstanty pro výpočet doby do lomu.
- Blok MEZNA DEFORMACE obsahuje konstanty pro výpočet mezní deformace.
- Blok FUNKCE ZPEVNENI obsahuje konstanty pro výpočet funkce poškození.

1.4 Model creepu pro tranzientní zatížení

Model creepu pro přechodová zatížení se aktivuje zadáním $KCRP = 6$ v souboru `name.iP`. Materiálové konstanty se zadávají v samostatných vstupních souborech `material.dak`, které je nutné přiřadit jednotlivým prvkům sítě pomocí souboru `name.DAT`.

1.4.1 Formát souboru s materiálovými parametry

Soubor `material.dak` obsahuje deset parametrů creepového modelu, které jsou uvozeny klíčovým slovem KONSTANTY. Řádky začínající znakem hvězdička * obsahují komentář.

Příklad zadání materiálových konstant pro žárupevnou ocel P91 (EN: X10rMoVNbN 9-1)—soubor `P91.dak`

```
*****
*
*      IPM Kloc model - P91 (EN: X10rMoVNbN 9-1)
*
*      10 konstant
*      -----
*      sigma_t  MPa
*      sigma_r  MPa
*      r_i      -
*      b        1/s
*      p        1/MPa
*      Q_h      kJ/mol
*      Q_l      kJ/mol
*      g        1/s
*      h        MPa
*      c
*
*****
```

KONSTANTY

75
1.5
100

7.3E+24
0.03
580
150
7.79E+10
22200
1.95E-3

1.5 Dafalias–Feigenbaum model plasticity

Dafalias–Feigenbaum model směřového zpevnění se aktivuje zadáním $KMOD = 4$ v souboru `name.iP`. Materiálové konstanty k_0 , κ_1 , κ_2 , a_1 , a_2 a c se zadávají v souboru `name.i2` (RPD2/3) v příslušné MP dávce jako 9. až 14. hodnota za klíčovým písmenem V:

MP číslo.dávky T 1 V E α ν ρ σ_Y Q_Y $\dot{\epsilon}_c$ Φ k_0 κ_1 κ_2 a_1 a_2 c

Kapitola 2

Závěr

V této zprávě je popsána základní technická dokumentace knihovny “TN01000024/08-V005-Library of codes for plasticity and creep models implementation” obsahující fortranské MKP procedury pro modelování elastoplastického a creepového chování 3D tištěných kovových materiálů. Knihovna je součástí MKP systému PMD dlouhodobě vyvíjeného v ÚT AV ČR, v. v. i.

Po samotné implementaci materiálových modelů do systému PMD byla následně provedena základní verifikace srovnáním s analytickými vztahy pro případ jednoduchých stavů napjatosti a srovnáním se vztahy pro limitní stavy zatěžování. Vývoj knihovny byl zakončen verifikací kódu na typizovaných úlohách. U všech implementovaných materiálových modelů byla potvrzena jejich funkčnost.

Knihovna je registrována v knihovně ÚT AV ČR s interním číslem INV20-061 a je přístupná všem spoluřešitelům dílčího projektu “Automation and production system optimization”, případně i dalším zájemcům konsorcia NCK KUI prostřednictvím datového úložiště při výpočetním klusteru ÚT AV ČR či přímo na stránkách <http://www.pmd-fem.com/> systému PMD.

Knihovna pokročilých materiálových modelů umožní zpřesnění predikce stávajících simulačních nástrojů na bázi metody konečných prvků pro modelování elastoplastické a creepové odezvy 3D tištěných kovových materiálů a tím i přispěje většímu rozšíření těchto materiálů do průmyslové praxe.

Literatura

- [1] PMD verze f77.13, VAMET/Ústav termomechaniky ÚT AV ČR, v. v. i., 2020, <http://www.pmd-fem.com/>.
- [2] Bína, V., Hakl, J. (1994) Probabilistic approach to description of the creep strain characteristic and prediction for long life-time. In *Proc. Conf. Materials for Advanced Power Engineering*, D. Coustouradis et al. (eds). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (Boston), pp 601–610.
- [3] Kloc, L., Sklenička, V., Dymáček, P., Plešek, J. (2018) New creep constitutive equation for finite element modelling including transient effects. *Mechanics of Materials*, **119**, pp 49–55.
- [4] Feigenbaum, H. P., Dafalias, Y. F. (2008) Simple model for directional distortional hardening in metal plasticity within thermodynamics, *Journal of Engineering Mechanics*, **134**(9), pp 730–738.
- [5] Marek, R., Plešek, J., Hrubý, Z., Parma, S., Feigenbaum, H. P., Dafalias, Y.F. (2015) Numerical implementation of a model with directional distortional hardening *Journal of Engineering Mechanics-ASCE*, **141**(12), pp 04015048-1–04015048-10.