

5. SKLEPI

S preizkusom smo skušali dognati, ali lahko pri uparjanju s prostim padom uporabimo iste matematične modele za čiste snovi in zmesi. Ugotovili smo, da so modeli Huhn, Papendieck, Blangetti - Krebs in Mostofizadeh - Stephan primerni za preračun uparjanja solnih vodnih raztopin. Modeli dokaj dobro sledijo izmerjenim vrednostim.

Sklepamo, da je ujemanje izmerjenih in izračunanih vrednosti zadovoljivo. Modeli bi lahko dobro rabili kot podlaga za dimenzioniranje uparjalnikov s prostim padom.

6. LITERATURA

- [1] Perpar, M.: Primerjava modelov uparjanja s prostim padom. Strojniški vestnik, 1987/10-12.
- [2] Huhn, J.: Zur Auslegung von Fallfilmapparaten. Chem. Techn., 39. (1987), štev. 1. 11-13.
- [3] Papendieck, H.: Strömung und Wärmeübergangsverhältnisse bei der Verdampfung aus einem welligen Flüssig-

keitsfilm mit überlagerter Dampfströmung. Chem.-Ing.-Techn. 58 (1986).

[4] Mostofizadeh, Ch.-Stephan, K.: Strömung und Wärmeübergang bei der Oberflächenverdampfung und Filmkondensation, Wärme und Stoffübertragung 15 (1981), 83-115.

[5] Blangetti F.- Krebs R.: Film Condensation and Evaporation in Vertical Tubes with Superimposed Vapor Flow 161 Palen, J.W.: Heat Exchanger Sourcebook, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, 1986.

[7] Chung, D. K., Mills, A. F., Hubbard, G. L.: Heat Transfer Across a Turbulent Falling Film With Cocurrent Vapor Flow, J. of Heat Transfer, štev. 5 (1976), 319-320.

[8] Siu-Ming Yih, Jung-Liang Liu: Prediction of Heat Transfer in Turbulent Falling Liquid Films with or without Interfacial Shear, AIChE Journal, 29 (1983), štev. 6, 903-909.

[9] Rant Z.: Isparivanje i uparivanje. Tehnička knjiga, Zagreb 1965.

Naslov avtorjev: mag. Janez Cetin, dipl. inž.

mag. Matjaž Perpar, dipl. inž.

Fakulteta za strojništvo, Ljubljana

Prejeto: 22.11.1990

Recenzirano: 1.4.1991

UDK 621.43.054

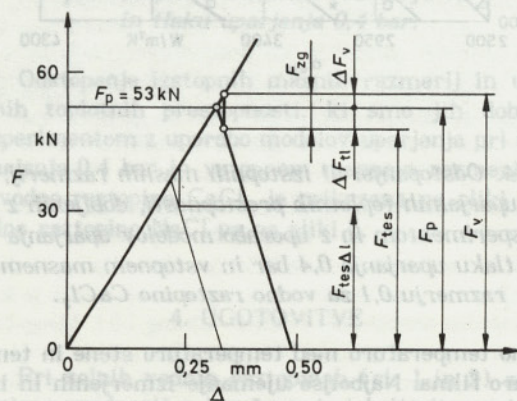
Analiza tesnjenja glave motorja

RAJKO MARINČIČ — RADISLAV PAVLETIČ — FRANO DAMJANIČ

0. UVOD

Tesnjenje motorjev z notranjim zgorevanjem pomeni sklop elementov, obremenjenih s silami, ki ob razbremenitvi zaradi zgorevalnih sil še vedno zagotavljajo zadosten tlak za tesnjenje zgorevalnih plinov, hladilnega in mazalnega sredstva. Ta sklop vključuje glavo in blok valjev s pušami, podložke in tesnilo kot tlačno obremenjene elemente ter vijake kot vezni, natezno obremenjeni del tesnilne zveze. Tesnilo je torej le del celotnega sistema tesnjenja, ki pa s svojimi začetnimi deformacijami in spreminjanjem lastnosti (elastičnosti) med prehodom v stabilizirane dinamične razmere bistveno vpliva na tesnjenje [1], [2].

Najpogosteje se tesnilna zveza analizira z diagramom raztezkov in sil. Ta diagram (sl. 1) je bistveno pomemben za razumevanje dinamike sistema, v celoti pa z njim vendar ne zaobjamemo vzajemnega delovanja vseh sodelujočih elementov, kar dejansko pomeni tesnjenje. Ta metoda ne more upoštevati prepletanja različnih dejavnikov, ki se pojavljajo pri zagonu in delovanju motorja, kakor npr. nelinearno obnašanje tesnilnega materiala, razvoj temperaturnega polja in s tem prerazporejanje tesnilnega tlaka po tesnilu.



Sl. 1. Diagram posedanja.

Možnost reševanja tako kompleksnih pojavov dajejo računalniške metode, posebno metoda končnih elementov, ki omogoča veliko prilagodljivost pri izbiri geometrične oblike, robnih pogojev ipd. in pri tem dopušča vpogled v sistem tesnjenja med simuliranim obratovanjem motorja. Poleg tega pa so numerične rešitve veliko cenejše od eksperimentalnih.

Tu bomo kratko predstavili standardni preračun tesnilne zveze z diagramom posedanja in kriteriji za dobro tesnjenje ter formulacijo metode končnih elementov, ki smo jo uporabili za termomehansko analizo tesnilnega sklopa v obratovalnih razmerah. Časovno odvisne mehanske in toplotne obremenitve terjajo vključitev časovno odvisnih dejavnikov v analizo. Zato metoda temelji na ločeni temperaturni in mehanski analizi, ki da temperaturne spremembe in poveček deformacij na vsakem časovnem koraku. Nelinearno mehansko obnašanje tesnilnega materiala smo simulirali z visko-plastičnim modelom [3]. Uporabnost numeričnega računanja in razvitega računalniškega programa [4] ponazarjajo rezultati praktičnega primera tesnjenja glave motorja.

1. ANALIZA TESNILNE ZVEZE Z DIAGRAMOM POSEDANJA

Omejimo se na obravnavo razmer okrog enega vijaka. Za risanje diagrama posedanja moramo poznati odvisnost med deformacijo in obremenitvijo posameznih sestavnih delov tesnilnega sistema. To odvisnost predstavljajo vzmetne konstante c , ki jih izračunamo po enačbi:

$$c = \frac{EA}{l} \quad (1),$$

kjer pomenijo: E — modul elastičnosti, A — plosčino prereza elementa in l — dolžino elementa z enakim prerezom. Skupno vzmetno togost n zaporedno (a) ali vzporedno (b) postavljenih elementov (ali različnih prerezov) dobimo po enačbah:

$$a) \frac{1}{c} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{c_i} \quad b) \frac{1}{c} = 1 / \sum_{i=1}^n c_i \quad (2).$$

Tako dobimo vzmetno konstanto natežno obremenjenih delov (vijak)

$$c_v = 166,7 \text{ kN/mm}$$

in tlačno obremenjenih delov (glava in del bloka motorja, podložka, tesnilo, pri čemer ima glavni vpliv glava motorja)

$$c_{tl} = 310,7 \text{ kN/mm}.$$

Silo pritvitja vijaka F_p oz. moment T izračunamo tako, da iz enačbe za primerjalno napetost (3) izrazimo silo, za dopustno napetost σ_{dop} pa vzamemo mejo tečenja $\sigma_p \leq \sigma_{dop} = \sigma_{0,2}$

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_n^2 + 3\tau_t^2} = k_1 F_p \quad (3),$$

kjer sta

$$\sigma_n = \frac{F_p}{A_{d1}} \quad - \quad \text{natezna napetost v vijaku in}$$

$$\tau_t = \frac{T}{W_p} = \frac{F_p k_2}{W_p} \quad - \quad \text{torzijska napetost.}$$

T je torzijski moment pritvitja vijaka (4), ki je odvisen od trenja med navoji na vijaku in bloku ter trenja pod glavo vijaka, kar je razvidno tudi iz enačbe:

$$T = F_p \left(\frac{d_z}{2} \tan(\varphi + \rho') + \frac{d_m}{2} \mu \right) = F_p k_2 \quad (4),$$

k_1 in k_2 sta izraza, ki ju dobimo pri izpostavitvi sile F_p iz zgornjih enačb, A_{d1} in d_z so dimenzije vijaka [5], d_m je srednji premer podložke, μ je koeficient trenja med glavo vijaka in podložko, ρ' pomeni koeficient trenja na navojih, φ je kot vzpona navojev, podrobnejša pojasnila pa lahko najdemo v [2]. Tako dobimo silo pritvitja oz. moment zatezanja

$$F_p = \frac{\sigma_{0,2}}{k_1} = 53 \text{ kN}, \quad T = F_p k_2 = 83 \text{ Nm}.$$

Vijak pa je dejansko še dodatno obremenjen (ΔF_p) zaradi tlaka zgorevalnih plinov p_{zg} (sila zgorevanja F_{zg}), in sicer v razmerju [6].

$$\frac{\Delta F_p}{F_{zg}} = \Phi; \quad \Phi = \frac{c_v}{c_v + c_{tl}} \quad (5),$$

$$\Delta F_p = 2,7 \text{ kN}.$$

Na drugi strani pa so zaradi tlaka zgorevanja razbremenjeni (ΔF_{tl}) priviti deli tesnilne zveze:

$$\frac{\Delta F_{tl}}{F_{zg}} = 1 - \Phi \quad (6),$$

$$\Delta F_{tl} = 5 \text{ kN}.$$

Ti dve sili vidimo v diagramu raztezkov in sil na sliki 1 kot silo zgorevanja:

$$F_{zg} = \Delta F_p + \Delta F_{tl} \quad (7).$$

Dejanska največja obremenitev vijaka je torej

$$F_v = F_p + \Delta F_p,$$

najmanjša dosežena tesnilna sila pa

$$F_t = F_p - \Delta F_{tl}.$$

Na podlagi takega diagrama lahko ocenimo uspešnost tesnjenja [7]. Če poznamo posedanje tesnila Δl , odberemo v diagramu tesnilno silo $F_{l\Delta l}$ pri takem posedanju in izračunamo razmerje (8), ki mora biti večje od 2,5.

$$K_{\Delta l} = \frac{F_{l\Delta l}}{F_{zg}} \geq 2,5 \quad (8).$$

Pri poznavanju najmanjšega dopustnega tlaka tesnjenja (npr. $p_{t\min} = 15-25 \text{ N/mm}^2$ za ottove motorje) pa lahko izračunamo silo tesnjenja $F_{l\min}$ pri tem tlaku in iz diagrama za izračunano silo odberemo največjo dopustno posedanje tesnila $\Delta l_{\max}$.

2. KRATEK OPIS FORMULACIJE METODE KONČNIH ELEMENTOV

Pri tukaj opisani metodi rešujemo v vsakem časovnem intervalu dva sistema enačb — za prenos toplote in ravnotežne enačbe — in pri tem dobimo povečanje temperatur in deformacij. (Podrobnejšo razlago najdemo v [2], [8], [9].)

Temperaturno polje v konstrukciji T_n mora v vsakem časovnem koraku t_n zadovoljiti naslednji sistem enačb:

$$K(T_n)T_n + C(T_n)\dot{T}_n + f(T_n, t_n) = 0 \quad (9),$$

kjer sta K in C matriki toplotne prevodnosti in specifične toplote, ki sta lahko temperaturno odvisni, f pa pomeni toplotno obremenitev, ki se lahko spreminja s temperaturo in časom. Algoritem reševanja tega sistema enačb, njegova stabilnost in natančnost sta široko opisana v [10], [11].

Rešitev enačbe (9) je temperaturno polje oz. sprememba temperature $\Delta T_n = T_{n+1} - T_n$ v časovnem intervalu $\Delta t_n = t_{n+1} - t_n$, iz česar izračunamo toplotne specifične deformacije (npr. za ravninsko napetostno stanje)

$$\Delta \varepsilon_n^t = \begin{Bmatrix} \Delta \varepsilon_x^t \\ \Delta \varepsilon_y^t \\ \Delta \varepsilon_{xy}^t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \alpha_1 \Delta T_n \\ \alpha_1 \Delta T_n \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (10),$$

kjer je $\alpha_1 = \alpha_1(T_n)$ koeficient temperaturne razteznosti in iz tega povečanje toplotnih napetosti

$$\Delta \sigma_n^t = D_n \Delta \varepsilon_n^t \quad (11),$$

kjer je D_n matrika elastičnosti. Če izrazimo celotne deformacije s povečkom pomikov Δd_n in viskoplastično komponento po Eulerjevi integracijski shemi (forward difference), je povečanje napetosti [9]

$$\Delta \sigma_n = D_n(B \Delta d_n - \dot{\varepsilon}_n^{vp} \Delta t_n) - \Delta \sigma_n^t \quad (12),$$

kjer je B deformacijska matrika.

Viskoplastično tečenje je določeno s skalarnim kriterijem tečenja [3]

$$F(\sigma, \chi) = f(\sigma) - \sigma_{0,2}(\chi) > 0 \quad (13),$$

kjer je χ parameter utrjevanja. Hitrost viskoplastične deformacije je [3]:

$$\dot{\varepsilon}_{vp} = \gamma \left\langle \Phi \left[\frac{f(\sigma) - \sigma_{0,2}}{\sigma_{0,2}} \right] \right\rangle \frac{\partial f(\sigma)}{\partial \sigma} \quad (14),$$

kjer je γ parameter tečenja, $\langle \Phi \rangle$ pa funkcija tečenja, ki je različna od nič samo za $F > 0$. Z vstavitvijo (12) v povečkovno obliko ravnotežne enačbe [3]

$$\int_V B^T \Delta \sigma_n dV + \Delta f_n = 0 \quad (15)$$

dobimo povečanje v obliki

$$\Delta d_n = [T K_n]^{-1} \Delta V_n \quad (16),$$

kjer je $T K_n$ trenutna togostna matrika, ΔV_n pa povečanje psevdoobtežbe

$$\Delta V_n = \Delta f_n + \Delta f_n^t + \Delta f_n^{vp} + \Delta \Psi_n \quad (17),$$

kjer pomenijo Δf_n , Δf_n^t in Δf_n^{vp} spremembo ekvivalentnih vzdolžnih sil zaradi mehanske in toplotne ($\Delta \sigma_n$) obtežbe ter viskoplastičnega tečenja ($D \varepsilon_n^{vp}$), $\Delta \Psi_n$ pa je vektor neuravnoveženih sil v času t_n

$$\Delta \Psi_n = \int_{\Omega} B^T (\sigma_n - \sigma_n^t) d\Omega + f_n + f_n^t \quad (18).$$

Rešitev v času t_{n+1} je

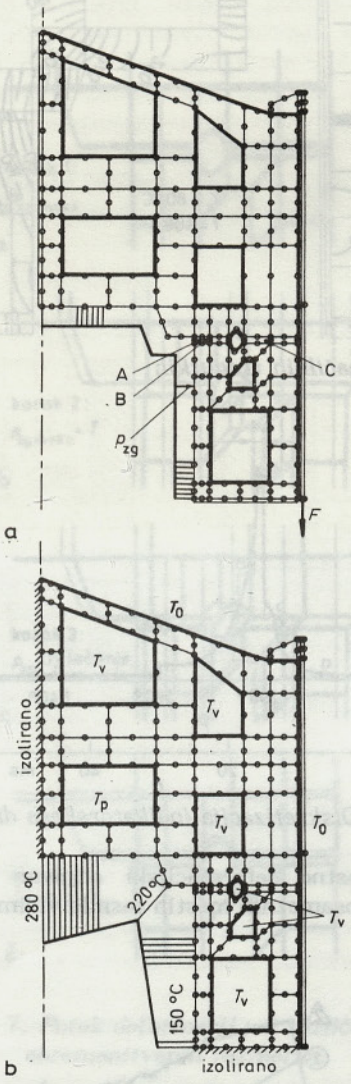
$$d_{n+1} = d_n + \Delta d_n, \quad \sigma_{n+1} = \sigma_n + \Delta \sigma_n \quad (19).$$

Postopek ponavljamo za vsak časovni interval.

3. PRIMER PRERAČUNA MODELA TESNILNE ZVEZE Z MKE

Realni sistem tesnjenja glave motorja bi zahteval tridimenzionalno analizo. Naš namen pa je preizkusiti razviti model analize in določiti odgovor tesnila v različnih delovnih razmerah, zato smo se omejili na obravnavo enega valja, ki ga lahko simuliramo z ekvivalentnim osnosimetričnim modelom. Blok motorja za en valj je že dejansko praktično osnosimetričen, medtem ko zahteva glava s svojim sistemom kanalov in vijaki precej več približkov. Vijake nadomestimo z obročem približno enake vzmetne togosti,

kakor so štirje vijaki, in obremenjenim s silo privitja $F = 4 F_p$. Toplotni vpliv hlajenja motorja, izpušnih plinov in okolice je simuliran s predpisanimi temperaturami in toplotnimi prestopnostmi, ki jih izračunamo z uporabo Nusseltovih kriterijskih enačb [5], [12] in so zbrane v preglednici 1. Podrobneje je definicija osnosimetričnega modela opisana v [2]. Idealizacija sistema skupaj z mehanskimi in toplotnimi robnimi pogoji je prikazana na sliki 2.



Sl. 2. Model tesnilnega sklopa glave motorja z robnimi pogoji.

Z uporabo 8-vozljičnih izoparametričnih elementov, s katerimi računa program THEVISA [4], bi se seveda lahko izognili vsem ostrim robovom. Nas pa v glavnem zanima spreminjanje deformacij in napetosti v tesnilu, zato ostanemo pri tako poenostavljenem modelu. Glava motorja, del bloka in vijaki so pravzaprav modelirani predvsem zaradi postavitve čimbolj stvarnih robnih pogojev za termomehansko analizo tesnila.

Preglednica 1: Toplotni robni pogoji.

Prestop na	Toplotna prestopnost $W/(m^2K)$	Temperatura $^{\circ}C$
zrak v okolici	4,6	25
hladilno vodo	2024,0	80-85
izpušne pline	9,7	800

Toplotne in mehanske lastnosti materialov so zbrane v preglednici 2. Material tesnila je običajno sestavljen iz nosilne perforirane pločevine, obdane z azbestnim ali neazbestnim tesnilnim papirjem (lepenko), ki je na robu okrog valja obrobljen z nerjavno pločevino. V našem primeru so upoštevane in prirejene [2] sestavi tesnila lastnosti azbestne plošče in jekla, mehanske lastnosti pa so določene na podlagi praktičnih preizkusov [13].

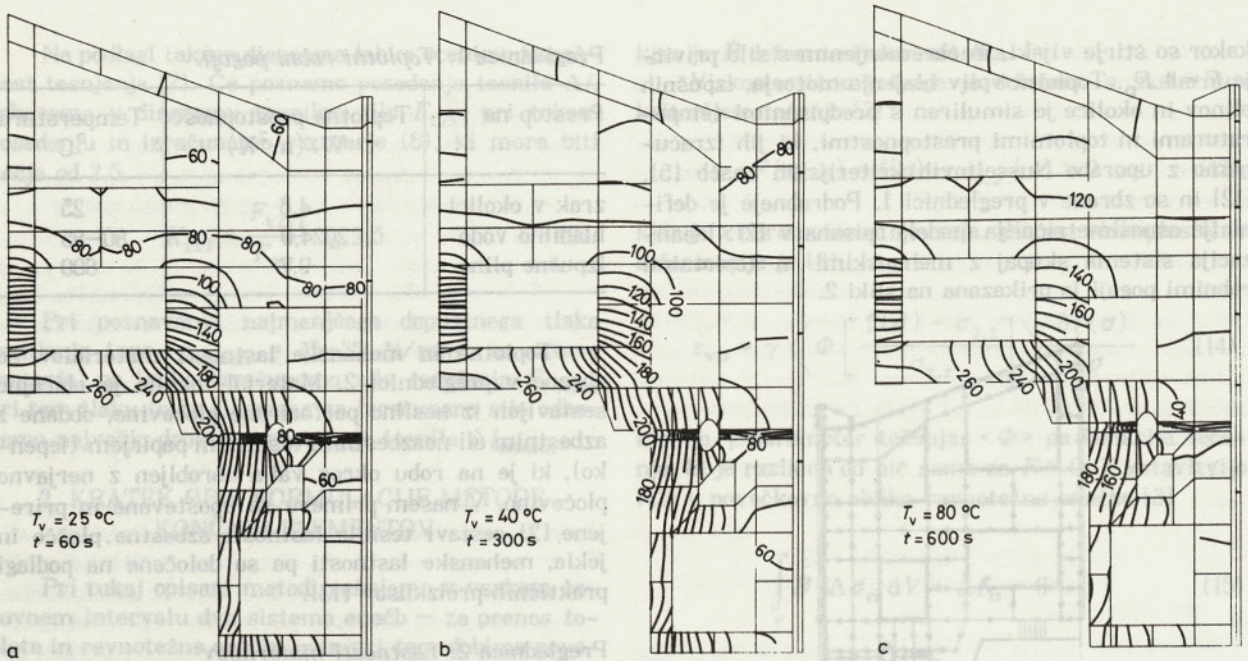
Preglednica 2: Lastnosti materialov

Lastnost ↓ Element Material →	glava mot. Al-Si-Mn	tesnilo elastometa	rob tesnila	blok mot. siva litina	vijaki jeklo
modul elastičnosti $[N/mm^2]$	$7,0 \times 10^4$	$1,15 \times 10^3$	$3,69 \times 10^4$	$1,0 \times 10^5$	$2,0 \times 10^5$
Poissonovo število	0,30	0,20	0,20	0,25	0,30
gostota $\times$ zemeljski pospešek $[N/mm^3]$	$2,55 \times 10^{-5}$	$2,31 \times 10^{-5}$	$3,92 \times 10^{-5}$	$7,21 \times 10^{-5}$	$7,7 \times 10^{-5}$
meja plastičnosti $[N/mm^2]$	300,0	20,0	100,0	230,0	900,0
parameter tečenja	$\tau = 0,1 s^{-1}$				
parameter utrjevanja	$\chi = 0,0 N/mm^2$				
toplotna razteznost $[1/K]$	$2,2 \times 10^{-5}$	$0,1 \times 10^{-5}$	$0,5 \times 10^{-5}$	$1,04 \times 10^{-5}$	$1,2 \times 10^{-5}$
specifična toplota $\times$ $\times$ gostota $[Ws/mm^3K]$	$2,34 \times 10^{-3}$	$1,89 \times 10^{-3}$	$2,84 \times 10^{-3}$	$3,97 \times 10^{-3}$	$3,65 \times 10^{-3}$
toplotna prevodnost $[W/mmK]$	0,17	0,0007	0,019	0,052	0,052

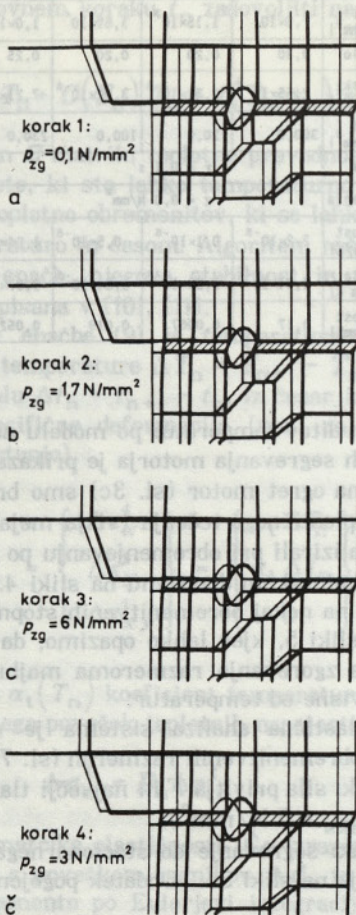
Razporeditev temperatur po modelu na posameznih stopnjah segrevanja motorja je prikazana na sliki 3. Popolnoma ogret motor (sl. 3c) smo brez upoštevanja viskoplastičnega tečenja (višja meja plastičnosti $\sigma_{0,2}$) analizirali pri obremenjevanju po diskretiziranem indikatorskem diagramu na sliki 4. Deformacije tesnila na nekaj obremenitvenih stopnjah so prikazane na sliki 5, kjer lahko opazimo, da so pomiki zaradi tlaka zgorevanja razmeroma majhni glede na pomike, odvisne od temperatur.

Viskoplastična analiza sistema je narejena v naslednjih obremenitvenih razmerah (sl. 7):

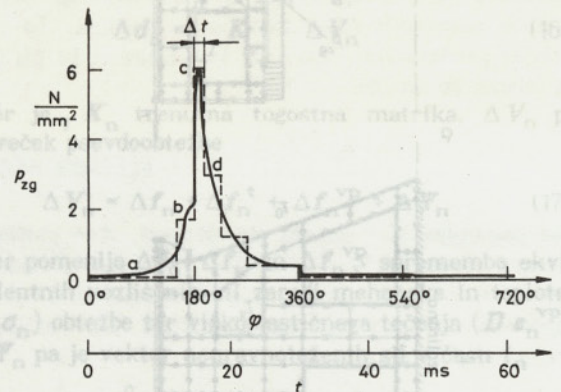
1. korak: sila privitja F in največji tlak zgorevanja ($p_{zg \text{ maks}} = 6 N/mm^2$).
2. korak: segrevanje do stacionarnega temperaturnega polja na sliki 3c. (Dodatek pogojem iz prvega koraka).
3. korak: konec tečenja materiala.
4. korak: zmanjšanje tlaka zgorevanja na nič in ohlajitev motorja na začetno temperaturo.



Sl. 3. Razporeditev temperatur v nekaj značilnih trenutkih

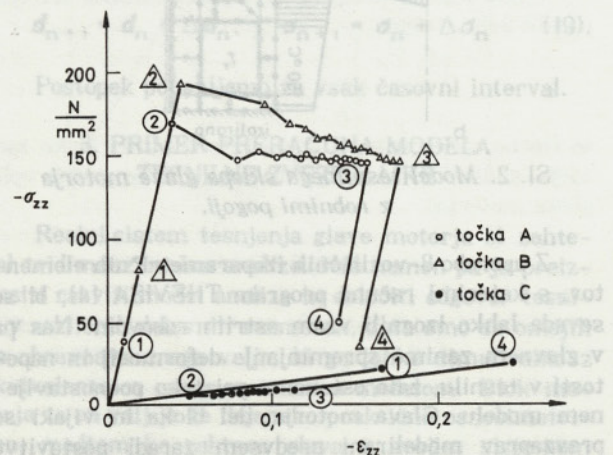


Sl. 5. Deformacije ogretega motorja zaradi tlaka zgorevalnih plinov.



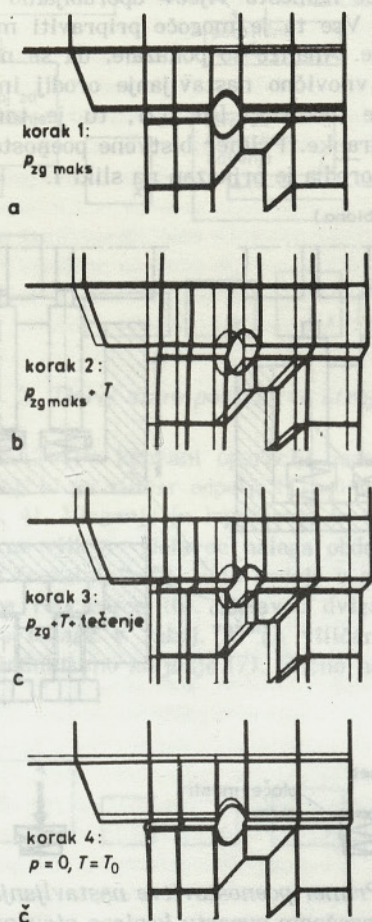
Sl. 4. Diskretizacija indikatorskega diagrama.

Napetostno-deformacijski odgovor v navpični smeri na posameznih mestih tesnila vidimo na sliki 6.



Sl. 6. Napetostno-deformacijski odgovor tesnila v posameznih točkah za različna obremenitvena stanja.

Jasno je viden vpliv temperatur na tesnilo ob zgorevalnem prostoru (točki A in B). Prav tako je jasno razvidno, da so toplotne specifične deformacije bistveno večje od tistih zaradi zgorevalnih sil. Deformirano tesnilo v opisanih obremenitvenih stanjih je ponazorjeno na sliki 7. Groba mreža, s katero smo delali, in še posebej osnosimetrično simuliranje imata določen vpliv na odgovor sistema. Kljub temu pa so dobljeni rezultati takšni, kakršne lahko dejansko pričakujemo.



Sl. 7. Potek deformacij pri različnih obremenitvenih razmerah.

4. SKLEPI

Navedeni primer jasno kaže uporabnost metode končnih elementov za analizo tesnjenja motorjev. Omogoča veliko globlje poglede na dogajanje v tesnilnem sistemu med delovanjem motorja, kakor je to mogoče z znano analizo z diagramom posedanja. Za rezultat dobimo razporeditev temperatur, napetosti in deformacij, kar je potrebno za raziskovanje vpliva različnih konstrukcij in lastnosti materiala. Za praktično odločanje je treba ta način analize še izpopolniti

in prilagoditi model viskoplastičnega tečenja tesnilnemu materialu. Podrobnejše raziskave lastnosti tesnilnega materiala bi omogočile zanesljivejše rezultate, ki bi z razširitvijo metode na tri dimenzije bistveno prispevali k poznavanju tesnjenja glave motorja in izbiri najugodnejšega materiala za tesnilo.

5. LITERATURA

- 111 Kovarik, R.F.-Czernik, D.E.: Combustion Seals. Automotive Engineering, 95, 7, str. 49, 1987.
- 112 Marinič, R.: Deformacije v tesnilnem sklopu glave motorja. Diplomsko naloga, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 1988.
- 113 Owen, D.R.J.-Hinton, E.: Finite Elements in Plasticity: Theory and Practice. Pineridge Press, Swansea, UK, 1980.
- 114 Damjanič, F.: THEVISA. Program za termomehansko analizo. FAGG-IKPIR, Ljubljana.
- 115 Kraut, B.: Strojniški priročnik, Strojniški vestnik, Ljubljana, 1981.
- 116 Stahl, G.: Zylinderkopf-Dichtverbindungen Auslegung, Eigenschaften und Nachziehfreiheit. MTZ, 42, 10, str. 415, 1981.
- 117 Janežič, I.-Ločniškar, J.: Raziskava vplivov vijakov in konstrukcije na tesnilni spoj. Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 1981.
- 118 Damjanič, F.: Reinforced Concrete Failure Prediction under Both Static and Transient Conditions. Ph.D. Thesis. C/Ph/71/83, University of Wales, Swansea, UK, 1983.
- 119 Owen, D.R.J.-Damjanič, F.: A Finite Element Formulation for Transient Thermal Analysis of Nonlinear Material Problems. Trans. 7th SMIRT, Chicago, Vol. H, str. 169, 1983.
- 1110 Damjanič, F.-Owen, D.R.: Practical Considerations for Thermal Transient Finite Element Analysis Using Isoparametric Elements. Nuclear Engng. Design, 69, str. 109, 1982.
- 1111 Owen, D.R.J.-Damjanič, F.: Reduced Numerical Integration in Thermal Transient Finite Element Analysis. Comput. & Structures, 17, str. 261, 1983.
- 1112 Grigull, U.-Sanders, H.: Heat Conduction. Springer-Verlag, New York, 1984.
- 1113 Tehnična dokumentacija Tesnila. Trebnje.

Naslov avtorjev: Rajko Marinič, dipl. inž.

Tesnila, Trebnje

Velika Loka, 68212 Velika Loka.

prof. dr. Radislav Pavletič, dipl. inž.

Fakulteta za strojništvo, Murnikova 2,

Ljubljana in

prof. dr. Frano Damjanič, dipl. inž.

Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo, FAGG, Jamova 2, Ljubljana

Prejeto: 15.10.1989