

**АНАЛИЗА РАДА ХАВАРИЈСКЕ КОЧНИЦЕ ДИЗАЛИЦЕ ПРИМЕНОМ МЕТОДЕ
КОНАЧНИХ ЕЛЕМЕНАТА****ANALYSIS OF THE CRANE EMERGENCY BRAKE OPERATION USING THE FINITE
ELEMENT METHOD**Горан Китић, Никола Иланковић, *Факултет техничких наука, Нови Сад***Област – МАШИНСТВО**

Кратак садржај – Диск кочнице су изложене тежим радним условима који су последица великих термичких оптерећења током процеса кочења. Та велика термичка оптерећења, која настају услед контактне трења између кочионог диска и кочионих облога, могу да доведу до хаварије целог механизма. Основни циљ рада је одређивање расподеле топлоте по кочионом диску услед термичких оптерећења. Због топлоте која се генерише на контактне површине, проучавају се утицајне величине које се користе за добијање потребне прерасподеле топлоте. Анализа је спроведена помоћу методе коначних елемената и програмског софтвера Autodesk Inventor Nastran.

Кључне речи: кочница, диск, дизалица, метода коначних елемената

Abstract – Disc brakes are exposed to severe operating conditions due to high thermal loads during the braking process. These high thermal loads, which are caused by the contact friction between the disc brake and the brake pads, can lead to the breakdown of the whole mechanism. The main goal of the paper is to determine the heat distribution on the disc brake due to thermal loads. Therefore, the main principles of heat transfer by conduction and convection are studied. The analysis was conducted using the finite element method in the environment of Autodesk Inventor Nastran.

Keywords: brake, disc, hoist, finite element method

1. УВОД

У савременом инжењерству безбедност има највећи приоритет приликом пројектовања и конструисања машина. Најважнији безбедносни систем од свих система једне машине или уређаја јесте систем кочења. Диск кочнице све више из употребе потискују добош кочнице, те се све већи значај придаје њиховој анализи и побољшању. Током процеса кочења, кочионе облоге врше притисак на кочиони диск, те смањују брзину или заустављају одговарајуће кретање механизма, односно погона дизања дизалице у овом случају. Кочнице које се користе на дизаличним погонима могу бити радне и хаваријске. Радне кочнице се активирају у уобичајеним режимима рада, док се хаваријске кочнице активирају у случају прекида кинематске везе у механичком преносу или назнаке било каквог квара механизма.

НАПОМЕНА:

Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Драган Живанић, ванр. проф.

Термичке анализе диск кочница су се вршиле током историје применом различитих технологија и софтвера, од којих се као најпогоднија показала метода коначних елемената. Стога се тема овог рада заснива на идеји о испитивању хаваријских кочница помоћу методе коначних елемената. Хаваријске кочнице представљају недовољно испитано поље истраживања, због специфичности начина и услова рада. Управо због те специфичности, велики број параметара, као и поступак прорачуна захтева различита прилагођавања. Одговарајућим адаптацијама израза преноса топлоте путем кондукције и конвекције добијају се изрази потребни за одређивање топлотног флукса. Основна и најбитнија претпоставка која се усваја током ове анализе је да се сва кинетичка енергија током кочења претвара у топлотни флукс на контактне површине трења. Програмски софтвер који се користи у овом раду је Autodesk Inventor Nastran, који на основу познатих вредности топлотног флукса и конвекције прорачунава и приказује промену расподеле топлоте на запремини диска током целог процеса кочења.

**2. ХАВАРИЈСКА КОЧНИЦА И ПРОЦЕС
КОЧЕЊА**

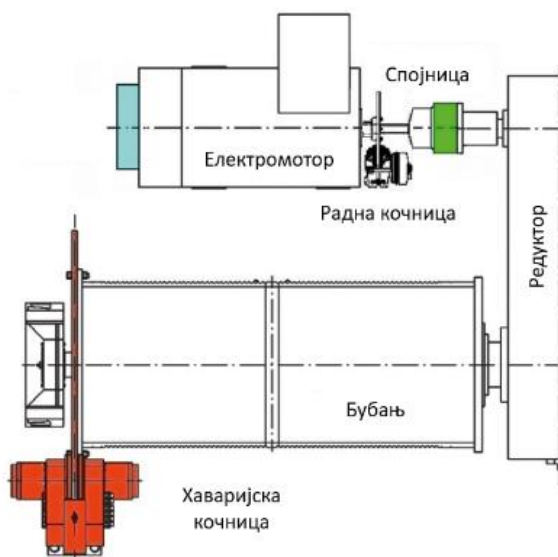
Задатак хаваријске кочнице, слика 1, је да у што краћем периоду заустави терет који је почео да пада, услед неког квара или хаварије.



Слика 1. Хаваријска кочница

Због тог кратког временског интервала, не постоји довољно времена да се одведе велика количина топлоте која настаје на месту контактне трења. Та топлота се акумулира у диску или бубњу, те се стога ови делови израђују као пуни комади без ребара за хлађење. Акумулирана топлота, уз триболошка

својства, у највећој мери условљава избор материјала кочионог диска. Као најбољи материјал се показао конструкциони челик (*S355JR*). Уз конструкциони челик, све чешћу примену имају алуминијум – метални композити и легуре титанијума. Због недовољног времена за достизање стационарне температуре, анализа рада хаваријске кочнице се врши под условима нелинеарног нестационарног топлотног процеса. Односно, процес је нестационаран, јер су све величине посматрања (брзина, оптерећења, температура, услови околине) временски променљиве. У односу на радне, хаваријске кочнице се постављају што ближе радном уређају, односно на вратилу или ободу бубња, слика 2. Тиме је остварена већа сигурност, јер се кочење може остварити у случају лома неког дела између погонског електромотора и бубња.



Слика 2. Место постављања хаваријске кочнице

Према врсти уређаја који врши кочење, најчешће се користе хаваријске кочнице са калиперима, које се карактеришу високим вредностима обртног момента. У зависности од врсте материјала кочионог диска и расположивог простора за смештај компоненти, одређује се потребан број калипера који се поставља на обод диска. Најчешће је то један уређај са два калипера, међутим рудничке дизалице и дизалице које раде у сличним условима, користе већи број мањих калипера, како би се смањиле габаритне димензије конструкције.

3. ОСНОВЕ ПРЕНОСА ТОПЛОТЕ ПРОЦЕСА КОЧЕЊА

Топлота се непрекидно преноси у природи са једног тела на друго. Тај пренос топлоте се може вршити на 3 начина, а то су конвекција, кондукција и радијација. Кондукција представља пренос топлоте директним контактом у циљу изједначавања температура између два тела. Конвекција представља преношење топлоте до других суседних тела унутрашњим кретањем молекула. Радијација представља преношење топлоте са једног тела на друго, без директног учествовања материје. Приликом термичке анализе диск кочнице, радијација се обично занемарује, јер износи мање од 5 % укупне вредности преноса топлоте [1]. Кондукција и

конвекција зависе од великог броја параметара, где кондукција приликом рада диск кочнице представља пренос топлоте између кочионе облоге и диска који настаје због трења на контактном месту. Конвекција у овом случају представља процес хлађења, односно одвођења топлоте са површине диска на околину. Стога, она игра велику улогу код дискова који су израђени са ребрима или отворима за хлађење. За пуни диск, количина топлоте која се одведе путем конвекције је минимална. Ипак да би се показала специфичност услова рада хаваријске кочнице и немогућност квалитетног одвођења топлоте, у раду је спроведена анализа која уз кондукцију укључује и пренос топлоте конвекцијом.

3.1 Конвекција

Прорачун преноса топлоте путем конвекције се поједностављује због кратког временског периода доступног за одвођење топлоте, геометрије диска, и непостојања додатног уређаја за одвођење топлоте (природна конвекција). Према Њутновом закону хлађења, конвекција се може изразити као:

$$q_{konv} = h \cdot S_d (\tau - \tau_{ok}) \quad (1)$$

где је: S_d – површина диска која је у контакту са кочионом облогом током процеса кочења, h – коефицијент конвекције, τ – температура диска у тренутку посматрања, τ_{ok} – температура околине.

Коефицијент конвекције је позитивна величина која се експериментално одређује. Зависи од агрегатног стања материјала, начина на који флуид струји, врсте конвекције и многих механичких и термичких особина материјала. Због поједностављеног одвијања процеса конвекције, у случају хаваријског кочења, може се усвојити, према [2]:

$$h = \begin{cases} 6,725 \cdot \omega^{0,55}, & 0 < \omega < 46,36 \text{ rad/s} \\ 3,289 \cdot \omega^{0,90}, & \omega > 46,36 \text{ rad/s} \end{cases} \quad (2)$$

Из датог обрасца се закључује да за случај хаваријског кочења, хлађење површине диска услед конвекције зависи искључиво од угаоне брзине обртања диска (ω).

3.2 Топлотни флукс

Топлотни флукс представља пренос топлоте кондукцијом која дејствује на контактну површину трења између диска и облоге. Сва кинетичка енергија која настаје на месту трења контактних површина се претвара у топлотну енергију. Један део те топлоте је апсорбован од стране диска, док остатак апсорбују кочионе облоге. Да би се одредила количина топлоте коју апсорбују диск и облоге, потребно је одредити врсту њиховог контакта. У термичким анализама постоје два типа термичких контаката:

1. савршен контакт – подразумева једнаку температуру на контактної површини, јер занемарује утицај мазивног средства;
2. несавршен контакт – подразумева постојање термичког отпора између диска и облоге услед постојања мазивног средства, које раздваја две површине.

Контакт између диска и облоге је несавршен због постојања мазивног средства и због различитих термичких особина материјала, те је потребно одредити коефицијент раздвајања [3]:

$$\sigma = \frac{\xi_d \cdot S_d}{\xi_d \cdot S_d + \xi_p \cdot S_p} \quad (3)$$

где су :

$\xi_d = \sqrt{k_d \cdot \rho_d \cdot c_d}$ – термичка инерција диска;

$\xi_p = \sqrt{k_p \cdot \rho_p \cdot c_p}$ – термичка инерција кочионе облоге.

У изразима за одређивање термичких инерција фигуришу топлотна кондуктивност (k), густина материјала (ρ) и специфична топлота (c) диска и кочионе облоге. Према [4] који дефинише механичке и термичке особине диска и кочионих облога, долази се до вредности коефицијента раздвајања од 0,88, што значи да 88% топлоте апсорбује диск, а осталих 12% облоге. Количина топлоте (кондукција) која се ослобађа на површини диска током кочења хаваријске кочнице се може одредити [4]:

$$Q_S = 0,88 \cdot E_B = 0,88 \cdot \frac{\pi}{60} \cdot T_K \cdot n_0 \cdot (1 - \frac{t}{t_k}) \quad (4)$$

где су:

$E_B [J]$ – количина ослобођене енергије;

$T_K [Nm]$ – кочиони момент;

$n_0 [min^{-1}]$ – број обртаја диска на почетку кочења;

$t [s]$ – време у тренутку посматрања;

$t_k [s]$ – трајање процеса кочења.

Да би се одредио топлотни флуks, потребно је одредити и површину диска на коју се преноси кондукција. Усвојена је кочиона облога, чија је површина $S_p = 0,0214 m^2$ [5], док се површина диска на којој долази до контакта израчунава на основу познатих параметара геометрије диска. Потребна површина диска износи $S_d = 0,34 m^2$. Коначно се може одредити потребан топлотни флуks:

$$q_d = \frac{Q_S}{S_d} \quad (5)$$

Уз помоћ датих образаца за топлотни флуks и конвекцију, могуће је одредити потребне количине топлоте које се доводе и одводе диску током кочења.

4. ПОСТУПАК АНАЛИЗЕ

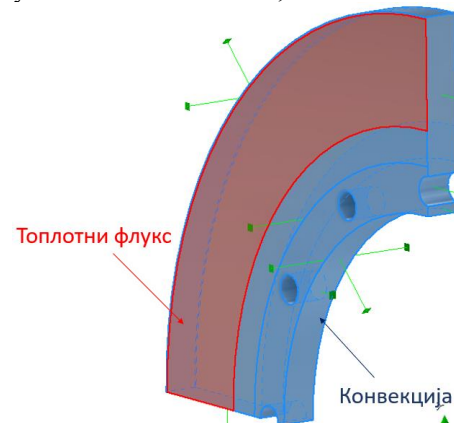
На почетку анализе се врши израчунавање вредности топлотног флуksа и коефицијента конвекције на основу познатих израза. Добијена вредност коефицијента конвекције износи: $h = 0,010193 \frac{mW}{mm^2 \cdot K}$. Док израчуната вредност топлотног флуksа износи $q_d = 578,468 \cdot (1 - \frac{t}{t_k}) \frac{mW}{mm^2}$. Може се приметити да је вредност коефицијента конвекције, а самим тим и преноса топлоте путем конвекције занемарљиво мала у односу на количину топлоте која се преноси кондукцијом, што је и било за очекивати, с обзиром на услове рада хаваријске кочнице и услове одвијања конвекције. Осим термичких оптерећења, потребно је одредити и трајање процеса кочења. Тип анализе коме се подвргава диск кочница је нелинеарна нестационарна, термичка анализа. Управо из тог разлога је потребно одредити трајање процеса кочења, јер су све величине посматрања (топлотни флуks, конвекција, угаона брзина) временски променљиве. Време кочења које се користи у овој анализи јесте $t_k = 6,6 s$. Даљи поступак анализе наставља се у програмском софтверу Autodesk Inventor Nastran који уз велики број различитих анализа, може вршити управо и нелинеарну нестацио-

нарну термичку анализу помоћу методе коначних елемената. Након формирања геометријског модела, извршена је идеализација модела, односно формиран је модел, који својим симетричним формама може да представи функцију и начин оптерећења целине, а да при томе смањи обим прорачуна. У програму се као следећи корак задаје материјал датом моделу, према табели 1.

Табела 1.

$\rho [\frac{kg}{m^3}]$	μ	$f_M [MPa]$	$f_y [MPa]$	$k [\frac{W}{m \cdot K}]$	$c [\frac{J}{m \cdot K}]$
7850	0,25	550	355	46	500

Затим се задаје време трајања анализе од $t_{uk} = 7 s$, са временским кораком од $\Delta t = 1s$. Моделу се задају 3 оптерећења, од којих је прво почетни услов, који представља температуру од 298 K. Друго оптерећење је конвекција, која се наноси на све површине диска које нису у директном контакту са кочионом облогом. Треће оптерећење је топлотни флуks, који се задаје само на оне површине диска које су у директном контакту са кочионом облогом, слика 3.



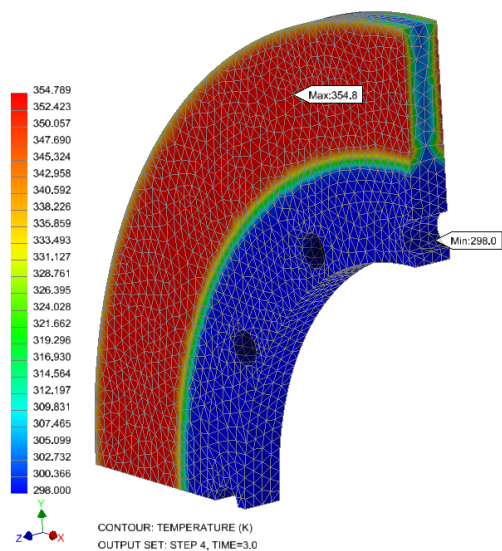
Слика 3. Задавање оптерећења

Вредност топлотног флуksа и коефицијента конвекције је потребно израчунати за сваки временски тренутак претходно задатог временског интервала, те путем табеле унети вредности у софтвер. Због зависности тачности резултата од избора величине коначног елемента, односно од густине мреже, прорачун се понавља кроз неколико итерација све док се не добије конвергенција резултата. Усваја се задовољавајућа величина коначног елемента од 10 mm, те се формира мрежа, слика 4, која се састоји из 28.145 елемената.



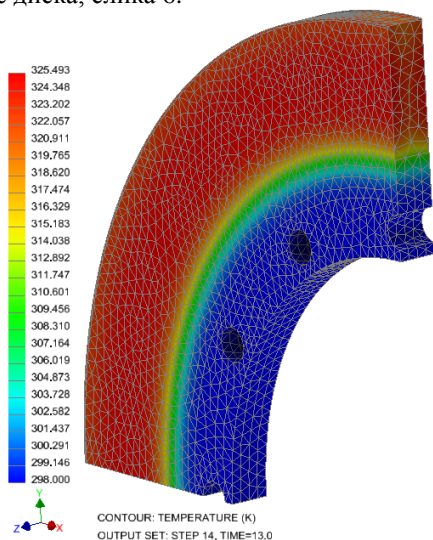
Слика 4. Формирана мрежа коначних елемената

Пуштањем симулације у рад добијају се следећи резултати, слика 5, где је максимална температура диска око 82 °C, у временском тренутку од $t = 3$ s.



Слика 5. Максимална температура диска

Након 13 s долази до равномерног загревања целе дебљине диска, слика 6.



Слика 6. Равномерна дистрибуција топлоте по дебљини диска

Уколико се топлотни флуks израчуна према законима механике, добијају се знатно мање вредности, те се добије да максимална температура на површини диска износи 41 °C. Разлог за то је неприлагођеност поступка прорачуна топлотног флуksа према законима механике условима рада хаваријске кочнице, који су веома специфични (мали број обртаја вратила на коме су постављене).

Сви претходно наведени резултати важе за услове околине ($\tau_{ok} = 25$ °C). Уколико дизалица ради у ливници, где је ($\tau_{ok} = 60$ °C), добија се максимална температура на површини диска од 117 °C.

Ови резултати указују на то да код хаваријског кочења, повећање температуре околине пропорционално повећава максимално развијену температуру током кочионог процеса.

5. ЗАКЉУЧАК

Добијени резултати - вредности топлотног флуksа и дистрибуције топлоте по површини диска, указују на појаву високих термичких оптерећења током кочионог процеса. Може се закључити да дистрибуција топлоте по површини хаваријске диск кочнице зависи од великог броја параметара, од којих су најбитнији: термичка и механичка оптерећења, особине материјала и геометрија диска. У односу на радне и аутомобилске диск кочнице, јављају се мање вредности температуре на површини диска, због мањег броја обртаја вратила на коме је постављена хаваријска кочница. Стога, како би се спречила хаварија механизма, најважнији фактор представља смањење времена реаговања кочнице.

Смањењем тог времена, спречило би се прекомерно повећање угаоне брзине диска, а самим тим би се јављала мања оптерећења. Постоји простор за даља истраживања и испитивања диск кочница, а нарочито хаваријских, а неке од препорука су:

- испитивање трења које настаје на контактної површини;
- проучавање могућности смањења времена реаговања кочнице (мртвог времена);
- прилагођавање постојећих прорачуна условима рада хаваријских кочница.

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Belhocine A, Cho C.D, Nouby M, Yi Y.B, Abu Bakar A.R, "Thermal analysis of both ventilated and full disc brake rotors with frictional heat generation", Applied and Computational Mechanics, Vol.8, Issue 1, pp. 5-24, 2014, ISSN:1802-680x (Print), ISSN:2336-1182 (Online).
- [2] Zhang J, Changgao X, "Research of the transient temperature field and friction properties on disc brakes", Proceedings of the 2012 2nd International Conference on Computer and Information Application (ICCIA 2012), 2014, ISSN:1951-6851, DOI:https://doi.org/10.2991/iccia.2012.49
- [3] Majcherczak D, Dufre'noy P, Nai't-Abdelaziz M, "Third body influence on thermal friction contact problems: application to braking", Journal of Tribology, Vol. 127, Issue 1, pp. 89-95, 2005, DOI:https://doi.org/10.1115/1.1757490
- [4] DIN 15434-1; Trommel- und Scheibenbremsen Berechnungsgrundsätze.
- [5] DIN 15433-2; Bremsbeläge mit formschlüssig verbundenen Bremsbelagträgern.

Кратка биографија:



Горан Китић рођен је у Бањалуци, Босна и Херцеговина, 1997. год. Дипломирао је 2020. год. на Факултету техничких наука, смер Механизација и конструкционо машинство, на којем исте године уписује мастер академске студије.



Никола Иланковић рођен је у Суботици 1994. год. Завршио је мастер академске студије 2018. године на Факултету техничких наука и исте године уписао докторске студије машинства. Запослен је у звању асистент мастер на ФТН у Новом Саду.