

17-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos  
**TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA**,  
vykusios 2014 m. gegužės 8 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 17th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania'  
**TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT**, 8 May 2014, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 17-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы»  
**ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК**, 8 мая 2014 г., Вильнюс, Литва

## AUTOMOBILIO NEAUŠINAMŲ IR AUŠINAMŲ STABDŽIŲ DISKŲ TERMODINAMINIŲ PROCESŲ TYRIMAI

Gediminas Mikalkėnas<sup>1</sup>, Marijonas Bogdevičius<sup>2</sup>

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas:<sup>1</sup>gediminas.mikalkenas@stud.vgtu.lt; <sup>2</sup>marijonas.bogdevicius@vgtu.lt

**Santrauka.** Nagrinėjama automobilių stabdžių diskų kaitimo problema. Apžvelgti eksperimentiniai ir teoriniai mokslo darbai. Panaudojant baigtinių elementų metodą, sprendžiama šilumos laidumo lygtis. Atliktas skaitinis aušinamų ir neaušinamų stabdžių diskų termodinaminių procesų tyrimas. Ištirti 286 mm skersmens neaušinamas diskas, 286 mm skersmens aušinamas ir 325 mm skersmens aušinamas diskai. Išnagrinėtas besitrinančių paviršių nestacionarus termodinaminis procesas ir nustatyta, kad neaušinamo disko trinties paviršiaus temperatūra pasiekia 500 °C, aušinamo 286 mm skersmens disko – 397 °C, aušinamo 325 mm skersmens disko – 284 °C. Skaičiavimai atlikti panaudojant ANSYS programinį matematinį paketą.

**Reikšminiai žodžiai:** stabdžiai, termodinamika, diskas, modeliavimas, baigtiniai elementai.

### Įvadas

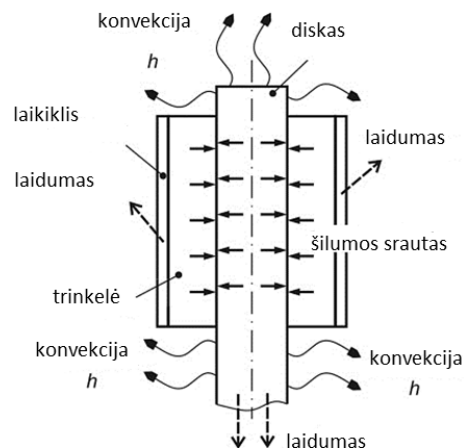
Stabdžių sistemos paskirtis – sustabdyti transporto priemonę bet kokiomis sąlygomis. Stabdant automobilio kinetinė energija yra verčiama į trinties jėgų mechaninį darbą ir šilumą. Dėl didžiulio šilumos srauto stipriai pakyla stabdžių elementų temperatūra, ypač stabdžių disko. Netolygus temperatūros pasiskirstymas lemia termines disko perkrovas, dėl to diske atsiranda įtrūkiai ir galiausiai diskas gali lūžti. Esant didelėms temperatūroms mažėja stabdymo efektyvumas bei gali užvirti stabdžių skystis. Tyrimo metu nustatoma kokia temperatūra pasiekiamą disko ir trinkelės trinties paviršiuje ir kaip temperatūra pasiskirsto.

### Mokslo darbų apžvalga

Stabdžių sistemoje, tarp disko ir trinkelės išsiskiria šiluma, kuri išsisklaido stabdžių sistemos elementuose. Esant normalaus stabdymo sąlygoms šiluminis spinduliuavimas dažniausiai neturi daug įtakos disko temperatūrai, tačiau laidumas ir konvekcija yra labai svarbi (1 pav.) (Yi *et al.* 2001; Talati, Jalalifar 2008; Talati, Jalalifar 2009).

Diskas ir šalia esančios detalės yra kaip laikini šilumos akumulatoriai, todėl jie taip pat dalyvauja stabdžių aušinime ir prisideda prie tinkamo stabdžių sistemos veikimo. Konvekcinio aušinimo efektyvumas labai stipriai kinta priklausomai nuo sąlygų: natūralios konvekcijos intensyvumo, oro srauto greičio trinties poros paviršiuje,

laiko tarp stabdymų bei stabdžių tipo (diskiniai ar būgniniai).



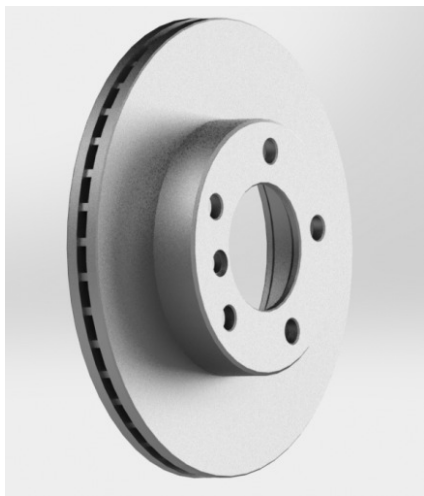
1 pav. Šilumos išsisklaidymas disko – trinkelės sistemoje (Adamowicz, Grzes 2001b)

Dažnai stabdžių diskai gaminami su ertmėmis orui, dėl kurių padidėja paviršiaus plotas ir pagerėja aušinimas (Adamowicz, Grzes 2011a; Voldrich 2007).

### Stabdžių diskų termodinaminių procesų modeliavimas

Sudaromas naudojamų diskų bei trinkelėlių geometrinis modelis (2 pav.). Modelis sudaromas su SolidWorks

programų paketu. Diskų modeliai sudaryti pagal automobilio BMW 3 serijos (kėbulų kodai E36 bei E46) stabdžių diskus. Padidinto skersmens (E46) diskai bus naudojami E36 automobilyje, kuriame tokie diskai nebuvo naudojami gamintojo.



2 pav. Aušinamas 286 mm diametro stabdžių diskas

Temperatūros pasiskirstymą diskiniuose stabdžiuose galima nustatyti išsprendus nestacionaraus termodinaminio proceso šilumos laidumo lygtį (Aladžev, Bogdevičius 2001; Aladžev, Bogdevičius, Prentkovskis 2002; Bogdevičius, Vladimirov 2006):

$$\rho c \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

čia:  $\rho$  – medžiagos tankis;  $c$  – specifinė šiluma;  $k_x, k_y, k_z$  – šilumos laidumo koeficientai;  $T$  – temperatūra.

Besitrinančių detalių paviršiuje išsiskiria šilumos srautas  $q$ , kuris turi tenkinti šias kraštines sąlygas:

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} l_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} l_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} l_z = q, \quad (2)$$

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} l_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} l_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} l_z = -h(T - T_\infty), \quad (3)$$

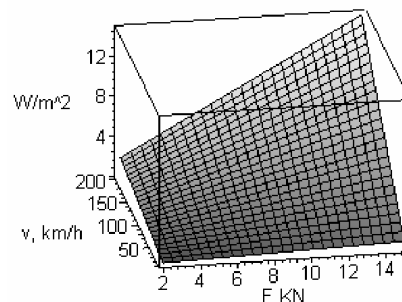
čia:  $k$  – šilumos atidavimo koeficientas;  $T_\infty$  – aplinkos temperatūra,  $l_x, l_y, l_z$  – krypties kosinusai.

Tarp disko ir trinkelėlių antdėklų išsiskiriančio šilumos srauto  $q$  priklausomybė nuo automobilio greičio ir prispaudimo jėgos parodyta 3 paveiksle.

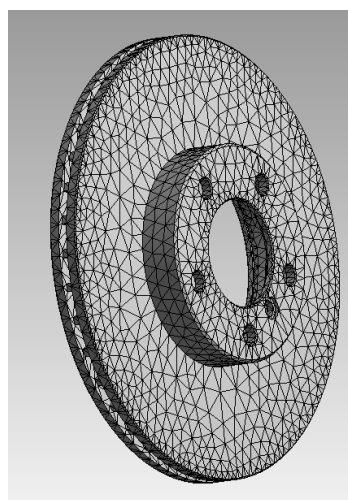
Šilumos laidumo lygtis sprendžiama panaudojant baigtinių elementų metodą (Bogdevičius, Vladimirov 2006; Aladžev, Bogdevičius 2001; Aladžev *et al.* 2002; Belhocine, Bouchetara 2012).

Modeliavimui naudojama ANSYS Workbench 14.5 programinė įranga. Diskai buvo padalinti į baigtinius elementus. Neušinamas 286 mm skersmens diskas padalintas į 18 472 elementus ir 33 328 mazgus, aušinamas 286 mm diskas padalintas į 20 772 elementus ir 39 412 mazgus, o 325 mm skersmens diskas į 23 706 elementus ir 44 733 mazgus (pavaizduota 4 paveiksle). Visi diskai

pagaminti iš ketaus. Įvestos kraštinės sąlygos: aplinkos temperatūra 22 °C, bandymo trukmė 8s, šilumos srautas 105,0 KW.

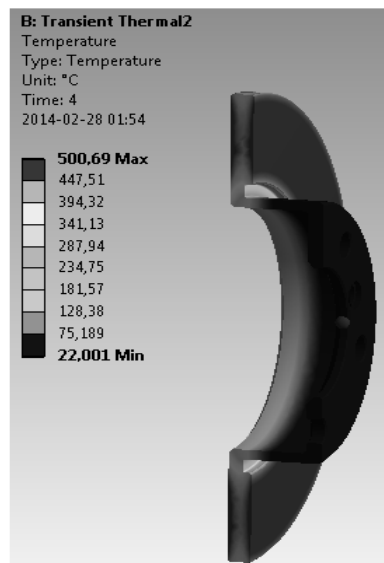


3 pav. Šilumos srauto priklausomybė nuo automobilio judėjimo greičio ir prispaudimo jėgos F



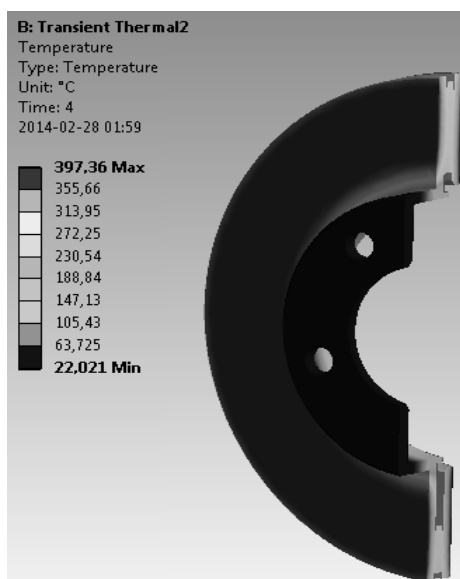
4 pav. Suformuotas 325 mm disko baigtinių elementų tinklas

Modeliuojant stabdymą su neušinamu automobilio BMW 3 serijos E36 286 mm skersmens disku pasiekiamą 500 °C temperatūra trinties paviršiuje, 5 paveiksle matomas temperatūros pasiskirstymas.

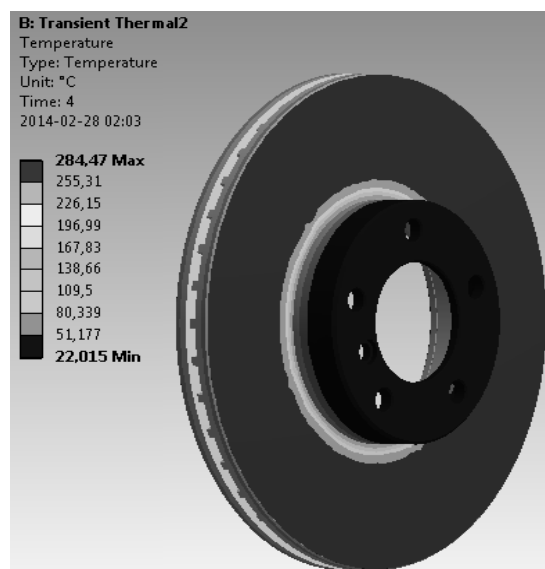


5 pav. Temperatūros pasiskirstymas 286 mm skersmens neušinamame diske

Pakeitus geometrinį modelį į 286 mm aušinamo diską ir esant tokiam pat šilumos srautui, buvo gauti rezultatai 6 paveiksle. Didžiausia temperatūra nukrito iki 397 °C.



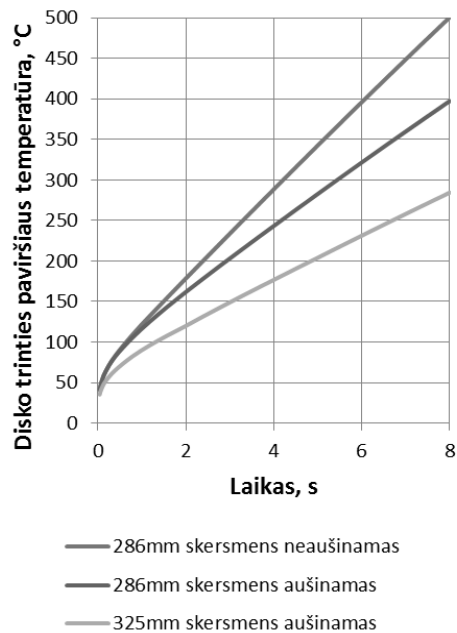
6 pav. Temperatūros pasiskirstymas 286 mm skersmens aušinamame diske



7 pav. Temperatūros pasiskirstymas 325 mm skersmens aušinamame diske

Toliau buvo bandomas automobilio BMW 3 serijos E46 aušinamas 325 mm stabdžių diskas, kurio trinties paviršiuje temperatūra nukrito iki 284 °C (7 pav.).

Kadangi visos sąlygos identiškos, galima lyginti gautus rezultatus. Matoma tendencija, jog aušinami diskai mažiau įkaista. Neaušinamą diską pakeitus į aušinamą didžiausia disko paviršiaus temperatūra sumažėjo 103 °C. Padidinus aušinamo disko diametrą nuo 286 mm iki 325 mm gauta 113 °C mažesnė trinties paviršiaus temperatūra. Temperatūros kitimas stabdymo metu pavaizduotas 8 paveiksle.



8 pav. Stabdžių diskų temperatūros kitimas stabdymo metu

## Išvados

Atlikus stabdžių diskų termodinaminių procesų matematinį modeliavimą, matoma, kad labiausiai kaista 286 mm skersmens neaušinami diskai, kurie po stabdymo įkaista iki 500 °C. Tuo tarpu tokio pat diametro aušinamas diskas, esant tokioms pat sąlygoms įkaista 103 °C mažiau (iki 397 °C). Didesnio diametro diskai (325 mm) po stabdymo kaista 113 °C laipsniais mažiau ir pasiekia 284 °C temperatūrą.)

## Literatūra

- Adamowicz, A.; Grzes, P. 2011a. Analysis of discbrake temperature distribution during single braking under non-axisymmetric load, *Applied Thermal Engineering* 31(6–7): 1003–1012.
- Adamowicz, A.; Grzes, P. 2011b. Influence of convective cooling on a disc brake temperature distribution during repetitive braking, *Applied Thermal Engineering* 31(14–15): 2177–2185.
- Aladjev, V.; Bogdevicius, M. 2001. Maple 6: Solution of the Mathematical, Statistical and Engineering – Physical Problems. Moscow: Laboratory of Basic Knowledge, 2001, p. 864 (in Russian).
- Aladjev, V.; Bogdevicius, M.; Prentkovskis, O. 2002. New software for mathematical package Maple of releases 6, 7 and 8. Monograph. Vilnius: Technika, 2002, 404 p.
- Belhocine, A.; Bouchetara, M. 2012. Thermomechanical modelling of dry contact in automotive disc brake, *International Journal of Thermal Sciences* 60: 161–170.

- Bogdevičius, M.; Vladimirov, O. 2006. Efficiency of a braking process evaluating the roughness of road surface, *transport* 21(1): 3–7.
- Mackin, T. J.; Noe, S. C.; Ball, K. J.; Bedell, B. C.; Bim-Merle, D. P.; Bingaman, M. C.; Bomleny, D. M.; Chemlir, G. J.; Clayton, D. B.; Evans, H. A.; Gau, R.; Hart, J. L.; Karney, J. S.; Kiple, B. P.; Kaluga, R. C.; Kung, P.; Law, A. K.; Lim, D.; Merema, R. C.; Miller, B. M. *et al.* 2002. Thermal racking in discbrakes, *Engineering Failure Analysis* 9(1): 63–76.
- Österle, W.; Dmitriev, A. I. 2011. Functionality of conventional brake friction materials – Perceptions from findings observed at different length scales, *Wear* 271(9–10): 2198–2207.
- Ostermeyer, G. P. 2003. On the dynamics of the friction coefficient, *Wear* 271(11–12): 2751–2758.
- Talati, F.; Jalalifar, S. 2008. Investigation of heat transfer phenomena in a ventilated disk brake rotor with straight radial round edvanes, *Journal of Applied Sciences* 8(20): 3583–3592.
- Talati, F.; Jalalifar, S. 2009. Analysis of heat conduction in a disk brake system, *Heatand Mass Transfer* 45(8): 1047–1059.
- Voldrich, J. 2007. Frictionally excited thermoelastic instability in discbrakes – Transient problem in the full contact regime, *International Journal of Mechanical Sciences* 49(2): 129–137.
- Yi, Y.-B.; Barber, J. R.; Hartsock, D. L. 2001. Thermoelastic instabilities in automotive disc brakes finite element analysis and experimental verification. *In: Proc. 3rd Contact Mechanics International Symposium*, Peniche, Portugal, 2001.