

## Frikinės medžiagos automobilių stabdžių mechanizmuose

### Eligijus Bolskis

*Šiaulių valstybinė kolegija, studentas*

*Šiauliai State University of Applied Sciences, Lithuania; Student*

### Kęstutis Radavičius

*Šiaulių valstybinė kolegija, studentas*

*Šiauliai State University of Applied Sciences, Lithuania; Student*

### Zita Sluckuvienė

*Šiaulių valstybinė kolegija, lektorė*

*Šiauliai State University of Applied Sciences, Lithuania; Lecturer*

### Anotacija

Straipsnyje nagrinėjamos frikinės medžiagos, kurios naudojamos stabdžių mechanizmų gamyboje. Aprašomos frikinių medžiagų funkcijos bei jų uždaviniai. Apžvelgiama dažniausiai naudojamų medžiagų stabdžių mechanizmų gamyboje chronologinė seka bei naudotini komponentai, ECE R90 saugumo standarto reikalavimai stabdžių kaladėlėms, stabdžių kaladėlių sudėtiniai sluoksniai, stabdžių apkabų tipai, trinties jėgos, frikinių medžiagų priežiūra.

**Reikšminiai žodžiai:** frikinės medžiagos, stabdžių kaladėlės.

## Friction materials in car brake mechanisms

### Summary

This paper analyses friction materials that are used in the production of car brake mechanisms. There are also described friction materials functions and their problems. Moreover, this work reviews the chronological sequence of the most commonly used materials in the production of car brake mechanisms, components to be used, ECE R90 safety standard requirements for brake pads, brake pad composite layers, types of sliding brake calipers, friction strengths, supervision of friction materials.

**Keywords:** friction materials, brake pads.

### Įvadas

*Tyrimo aktualumas ir problematika.* Dabar dažniausiai naudojamos neasbestinės organinės stabdžių kaladėlės. Tačiau neasbestinės organinės stabdžių kaladėlės greitai dėvisi ir jose susidaro daug dilimo nuolaužų. Stabdžių medžiagų susidarančios nusidėvėjimo nuolaužos kelia susirūpinimą sveikatos ir aplinkos apsaugos agentūroms. Todėl mokslininkai kuria aplinkai nekenksmingas stabdžių frikines medžiagas, skirtas visomis oro sąlygomis veikiančioms greitojo stabdymo sistemoms. Ateities stabdžių kaladėlių medžiagomis laikomos natūralaus pluošto pagrindu pagamintos stabdžių kaladėlės. Tuo pat metu stabdžių diskams ar būgnams dažniausiai naudojamas ketus. Dabar stabdžių diskams ar būgnams gaminti naudojamos įvairios medžiagos, pavyzdžiui, aliuminio matricos kompozitai, anglies-anglies kompozitai ir keramikos pagrindu pagamintos medžiagos. Tačiau vis dar teikiama pirmenybė ketaus naudojimui. Dėl mažo tankio ir didesnio stabdymo stabilumo aliuminio matricos kompozitas laikomas būsimą stabdžių diskų ar stabdžių būgnų medžiaga.

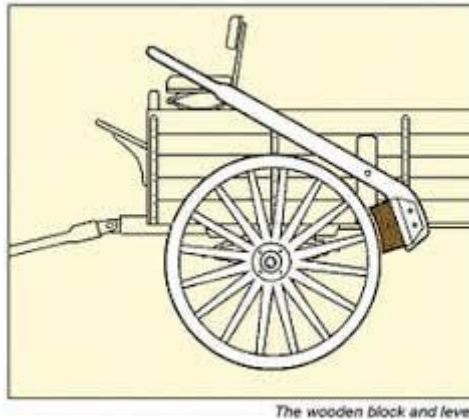
*Tyrimo tikslas* – išanalizuoti frikines medžiagas, naudojamas stabdžių kaladėlių gamyboje.

*Tyrimo uždaviniai:* 1) apžvelgti frikinių medžiagų istoriją; 2) identifikuoti automobilių stabdžių kaladėlių konstrukciją; 3) išanalizuoti frikinių medžiagų, naudojamų lengvųjų automobilių stabdžių kaladėlėse, sandarą.

*Tyrimo metodas* – mokslinių ir dokumentinių šaltinių turinio analizė.

### **Stabdžių kaladėlių ir frikinių medžiagų gamybos istorija**

Stabdžių kaladėlių istorija prasidėjo maždaug prieš 100 metų, kai atsirado arklių traukiamas vežimas. Stabdymo technologija nebuvo sudėtinga, buvo stabdoma spaudžiant medžio bloką prie rato, pasitelkiant specialią svirtį (1 pav.) Patobulintą šios technologijos versiją Karl Benz pradėjo naudoti ir pirmuosiuose automobiliuose, kai medinius blokelius padengė oda.



*The wooden block and lever*

**1 pav.** Pirmoji stabdžių versija [1]

Bėgant metams bei transporto priemonėms tobulėjant, pradėta galvoti, kaip stabdžių kaladėles patobulinti, kaip sumažinti jų sudilimą. Todėl imta kurti medžiagas, galinčias sumažinti sudilimą ir padidinti stabdymo efektyvumą. Taip sukurtos frikcinės medžiagos.

Frikcinės medžiagos – tai medžiagos, kurios skirtos sukurti trintį tarp kietų paviršių, taip kontroliuojant kūno judėjimą pirmyn arba atgal. Pirmasis frikinių medžiagų mišinys sukurtas XIX amžiaus pabaigoje. Jį sudarė lipnia medžiaga prisotinta medvilnė. Tačiau dėl nedidelio stabdymo efektyvumo, medvilnė buvo pakeista žalvariu armuotu asbesto audiniu. Šį lemiamą pokytį atliko Herbertas Froodas, kuris pastebėjo, kad asbestas atsparus dilimui ir aukštai temperatūrai. Dėl savo stabdžiams tinkamų savybių (šiluminio atsparumo, lankstumo, trinties savybių) asbestas tapo pagrindine sudedamąja medžiaga keliems dešimtmečiams. 1970 metais po atliktų tyrimų buvo išsiaiškinta, jog asbestas, patekęs į žmonių plaučius, gali sukelti plaučių vėžį. Be to, ši medžiaga vis labiau brango. Nauja stabdžių frikcinė medžiaga turėjo pasižymėti plastiškumu, nes eksploatacijos metu ją veiks kniedijimo ir kitos jėgos. Beieškant naujos medžiagos sudėties, buvo atliekami bandymai su stiklo, mineralų, metalų, anglies bei sintetiniais audiniais. Aštunto dešimtmečio pabaigoje pavyko visiškai eliminuoti asbesto naudojimą gamyboje ir pakeisti jį stiklo audiniais. Vėliau asbesto komponentas buvo pakeistas įvairių pluoštų mišiniu, kurį sudarė sintetiniai, plieno bei natūralūs pluoštai. 1990 metais kaladėlių gamintojai gamyboje ėmė naudoti keramines žaliavas, kurios gamintojams leido pasiekti aukštus stabdymo rezultatus [2]. Šiuolaikinėse frikcinėse medžiagose asbestas visiškai nebenaudojamas.

Automobilių pramonė nepaliaujamai keičiasi ir dabar. Automobiliai greitėja, todėl reikalingas vis efektyvesnis bei ekonomiškесnis stabdymas. Imta ieškoti alternatyvų tradicinėms frikcinėms medžiagoms, kurios būtų pakankamai efektyvios. Stabdymo sistemų lūkesčių ir reikalavimų didėjimas reiškia, kad trinties medžiagos, yra gaminamos ir bandomos remiantis keliais kintamaisiais. Tarp svarbiausių iš jų galima išskirti aukščiausią ir stabiliausią trinties koeficientą, mažiausią trinties medžiagų nusidėvėjimą, be stabdžių skleidžiamos vibracijos, cypimo ir įvairių kitų triukšmų. Atskiras klausimas yra aukšti gaminių ekologijos reikalavimai, taigi trinties mišinio sudėtyje ribojami sunkiųjų metalų, stibio ir vario kiekiai [21]. Daug vilčių teikia keraminių frikinių medžiagų naudojimas. Šios medžiagos nepraranda savo savybių ir gali užtikrinti stabilų darbą net tuomet, kai trinties poros paviršių temperatūra siekia 1000°C. Beveik 100% transporto priemonės kinetinės energijos stabdžių sistemose su keraminiais antdėklais yra paverčiama šiluma. Ji, dėl šiuolaikinių stabdžių diskų konstrukcinių sprendimų (papildoma ventiliacija, kanalai, kiaurymės), per trumpą laiko tarpą yra išskiriama į aplinką ir išsklaidoma. Kita frikinių medžiagų rūšis, galinti atlaikyti tokias aukštas temperatūras, tai – sukepinti metalų milteliai, pvz. vario. Tačiau tokie stabdžiai turi vieną esminį

trūkumą – jie yra kelis kartus brangesni už tradicinius stabdžius. Kaladėlių medžiagų pasirinkimas priklauso nuo automobilio naudojimo srities.

## Stabdžių sistema

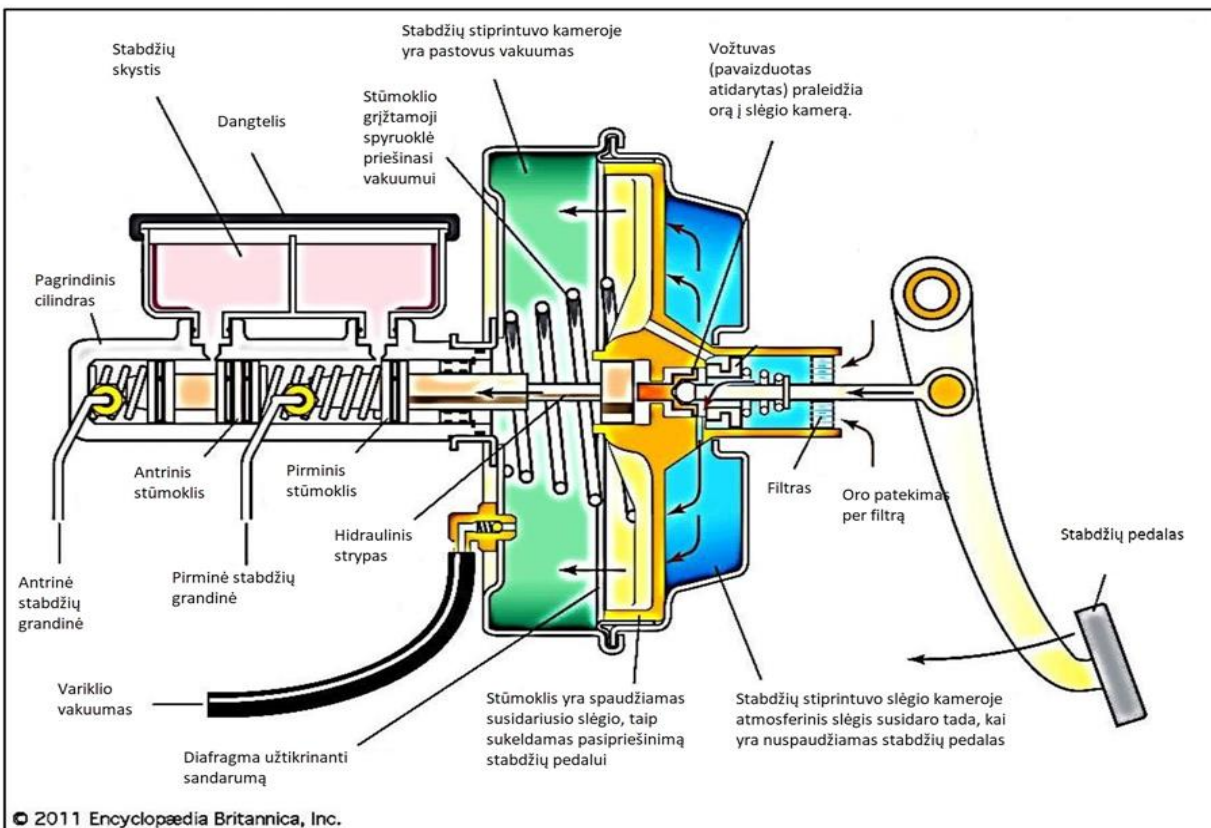
Tinkamas stabdžių sistemos veikimas priklauso nuo daugelio tarpusavyje sąveikaujančių elementų, kurie sudaro stabdžių sistemos visumą. Šie elementai: stabdžių apkabos, stabdžių diskai, stabdžių kaladėlės, stabdžių skystis bei transporto priemonės pakabos elementai. Stabdžių apkabos ir visa stabdžių sistema yra suprojektuoti taip, kad bet kurioje situacijoje užtikrintų patikimą, greitą ir saugų transporto priemonės sustabdymą.

### Stabdžių sistemos veikimo principas

Stabdžių sistemos tikslas yra sukurti stabdymo momentą, kuris sulėtintų arba visiškai sustabdytų transporto priemonę frikcinį stabdžių pagalba, paverčiant transporto priemonės kinetinę energiją šiluma per trintį ir išskleidant tą šilumą į aplinką. Variklinių transporto priemonių ir jų priekabų atveju šį rezultatą galima pasiekti naudojant dviejų pagrindinių tipų stabdžių sistemas:

- Diskinė stabdžių sistema, kurią sudaro dvi stabdžių kaladėlės ant disko.
- Būgninė stabdžių sistema, kai stabdžių kaladėlės stumiamos į išorę.

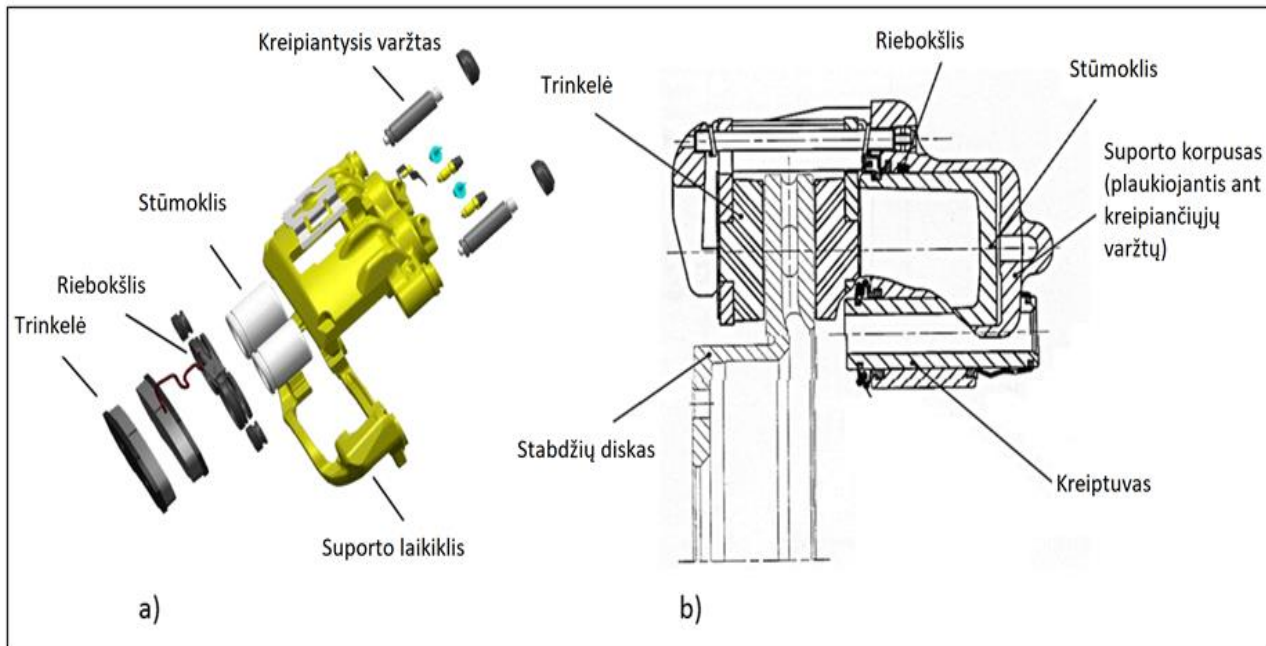
Stabdžių apkabos stūmoklių jėgą valdo už stabdžių pedalo esantis pagrindinis cilindras, kuris spaudžia skystį į hidraulinę grandinę, prie kurios prijungti stūmokliai. 2 pav. pateikiamas vakuuminės stabdžių sistemos veikimo principas. Tokioje sistemoje stabdžių skystis stumia stabdžių apkabos stūmoklį.



2 pav. Vakuuminės stabdžių sistemos veikimo principas [3]

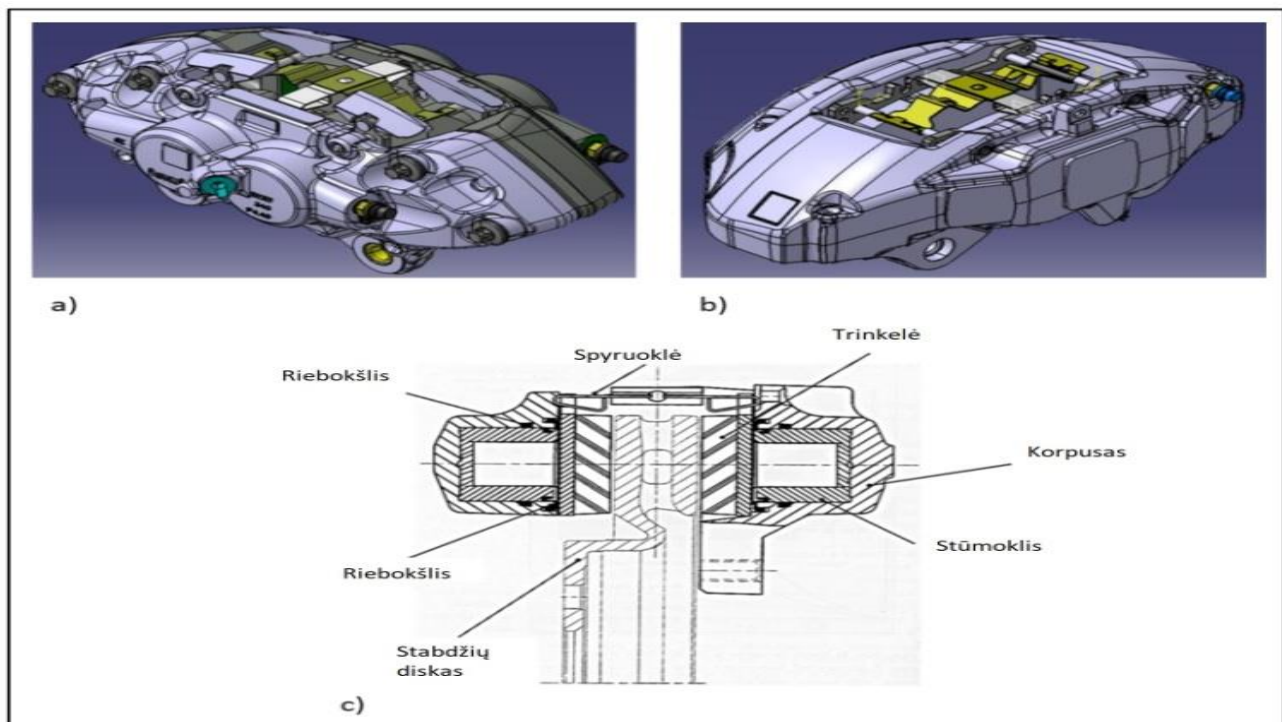
Stabdžių apkabose sumontuoti stabdžių sistemos cilindrai ir paslėptos stabdžių kaladėlės. Jos stabdymo metu yra prispaudžiamos prie disko ir mažina jo sukimosi greitį. Tokius stabdžius lengviau pataisyti, jie savaime nusivalo ir neužsiteršia, yra atsparesni aukštomis temperatūroms, todėl ir patikimesni bei veiksmingesni.

Stabdžių apkabas galima skirstyti į du tipus: plaukiojančias arba stacionarias (fiksotas).



**3 pav.** Slankiojančios stabdžių apkabos [4]

3 paveiksle pateikta slankiojančios stabdžių apkabos sandara. Šio tipo apkabos turi vieną ar daugiau stūmoklių tik vidinėje rotoriaus pusėje, apkabos laikiklis yra pritvirtintas prie stebulės laikiklio, o apkabos rėmas (arba korpusas) laisvai slankioja ant kreipiančiųjų įvorių. Geros plaukiojančių stabdžių apkabų savybės, palyginti su stacionariaisiais, yra pigumas, mažas dydis, mažesnis stabdžių skysčio įkaitimas ir įvairios galimos pavaros sistemos, pavyzdžiui, hidraulinė, hidromechaninė, mechaninė, pneumatinė ir elektrinė.



**4 pav.** Stacionarios (fiksotos) stabdžių apkabos [5]

Fiksuoto tipo stabdžių apkabos (sandara pateikta 4 pav.) pasižymi lengvumu, estetiškumu, galimu didesniu kaladėlių paviršiaus plotu, mažesne liekamąja stabdžių prispaudimo jėga ir tolygiu kaladėlių (trinkelė) nusidėvėjimu.



Stabdymo procesas prasideda tuomet, kai, nuspaudus stabdžių pedalą, stabdžių frikcinė medžiaga paliečia stabdžių diską – tai yra, kuomet prasideda trintis. Judančios transporto priemonės kinetinė energija yra paverčiama šiluma, išsiskiriančia tarp stabdžių diskų ir kaladėlių (specialistai šiuos elementus vadina trinties poromis). Ši šiluma skverbiasi į frikcinės medžiagos gilumą, o taip pat į stabdžių diskus. Po to šiluma yra perduodama kitiems stabdžių sistemos elementams, šalia esančioms detalėms ir išskiriama į aplinką. Elementai, dalyvaujantys stabdymo procese, yra veikiami aukštos temperatūros ir trinties, todėl gana greitai nusidėvi. Šio nusidėvėjimo pagrindiniai požymiai – trinties porų masės mažėjimas, išmatavimų ir frikcinių savybių pasikeitimas [2].

### **Stabdžių diskai ir kaladėlės**

Labai svarbios stabdžių sistemos sudedamosios dalys – stabdžių diskai ir kaladėlės.

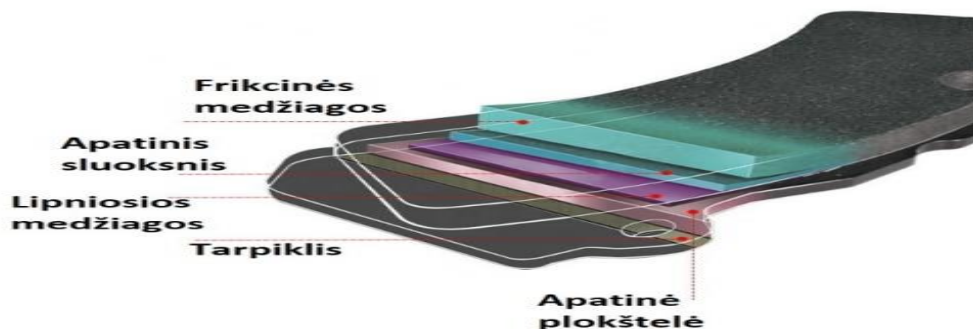
Stabdžių diskas atlieka dvi pagrindines funkcijas: perduoda didelę mechaninę jėgą ir išsklaido susidariusią šilumą veikiant aukštai temperatūrai. Stabdžių diskai arba stabdžių rotorai paprastai gaminami iš plokštelinio grafito struktūros pilkojo ketaus. Tam tikroms specialioms reikmėms, pvz., didelio našumo sistemoms, stabdžių diskai gali būti gaminami iš įvairių medžiagų, pavyzdžiui, aliuminio kompozitų, karbokeramikos, anglies-anglies ir kt. Ketaus liejinys dažniausiai naudojamas dėl stabilių eksploatacinių savybių, gero triukšmo slopinimo, pigių žaliavų ir lengvos gamybos.



**5 pav.** Skirtingos konstrukcijos stabdžių diskai [6]

5 paveiksle, žiūrint iš kairės į dešinę, matomi skirtingo tipo stabdžių diskai: diskas su lenktomis mentelėmis, su tiesiomis mentelėmis, su stulpelių mentelėmis.

Stabdžių kaladėlės gaminamos jas presuojant aukštoje temperatūroje. Vėliau jos papildomai termiškai apdorojamos, šlifuojamos, dažomos bei pakuojamos.



**6 pav.** Stabdžių kaladėlės sandara [7]

Kaip matoma 6 paveiksle, stabdžių kaladėlę sudaro 5 sluoksniai: frikcinės medžiagos, apatinis sluoksnis, lipniosios medžiagos, tarpiklis, apatinė plokštelė. Pagrindinius išskirti galima du, tai – atraminė plokštelė ir frikciniai antdėklai, tačiau šių dalių gamybai gali būti panaudojami daugiau nei dešimt sudedamųjų dalių. Gaminant antdėklus automobilių būgniniams stabdžiams, frikciniai antdėklai gaminami presuojant birų mišinį, pusfabrikatį, valcuojant juostą bei įpresuojant pluoštą [2]. 1 lentelėje pateikti stabdžių kaladėlę sudarantys komponentai bei jų atliekamos funkcijos.

**Stabdžių kaladėlių sudedamųjų dalių savybės [7]**

| Sluoksniai                  | Pagrindinės eksploatacinės savybės                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Frikcinės medžiagos</b>  | Užtikrina trinties efektyvumą tiesioginio sąlyčio su stabdžių disku.                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Apatinis sluoksnis</b>   | Terminiškai izoliuoja atraminę plokštelę ir stūmoklį bei stabdžių skystį, nuo trinties medžiagos skleidžiamos šilumos.<br>Pagerina komfortą, nes apriboja vibracijos ir triukšmo perdavimą iš frikcinės medžiagos į stabdžių apkabą. . Geras trinties efektyvumas bet kuriuo atveju reikalingas dėl saugumo |
| <b>Lipniosios medžiagos</b> | Užtikrina didelį šlyties stiprį tarp apatinio sluoksnio ir galinės plokštės.                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Atraminė plokštelė</b>   | Paskirsto stūmoklio jėgą per visą kontaktinį paviršių, išsklaido tangentinę jėgą, atsirandančią stabdymo metu dėl frikcinės medžiagų ir disko kontakto per atraminę plokštelę.                                                                                                                              |
| <b>Tarpiklis</b>            | Neleidžia vibracijai pereiti į stabdžių sistemą.                                                                                                                                                                                                                                                            |

Vieno iš kaladėlių gamintojų „Reizz“ diskinių stabdžių kaladėlių sudedamosios dalys yra: rišamoji medžiaga, organiniai ir neorganiniai pluoštai, metalo priemonės, surištos su derva, trinties modifikatoriai, mineraliniai ir organiniai papildiniai [9].

„Bosch Quiet Cast Premium“ diskiniams stabdžiams sukurtos stabdžių kaladėlės turi OE žymėjimą, kuris parodo, jog kaladėlės atitinka originalias stabdžių kaladėles, su kuriomis automobilis išvažiuoja iš gamyklos. Į tokių kaladėlių sudėtį įeina daug sluoksnių, pavyzdžiui: guma ir plienas. Guma kartu su plienu užtikrina sukibimo kokybę, taip padidėja atsparumas korozijai, sumažėja triukšmas. Šio tipo stabdžių kaladėlės gaminamos iš tokio pat aliuminio lydinio, kuris naudojamas aviacijoje, bet jose nėra vario. Taip siekiama ne tik didesnio našumo, bet ir mažesnio toksinių medžiagų naudojimo. Siekiant sumažinti visapusę apsaugą nuo korozijos, milteliniu būdu padengiama atraminė plokštelė, taip prailginant ir stabdžių kaladėlių naudojimo laiką [17].

Stabdžių kaladėlėms keliama aukšti reikalavimai. Vienas iš jų – (Economic Commission for Europe) ECE–R90. Atsižvelgiant į šį reikalavimą, prieš gaminius pateikiant rinkai, jie turi atlaikyti įvairius bandymus. Šie bandymai parodo, kaip išsaugomos stabdymo savybės šalčio, aukštos temperatūros intervaluose, koks kaladėlių dilimas bei kaip greit jos atvėsta. Taikant ECE–R90 reikalavimus, išvengiama pavojaus, jog kaladėlės stabdymo metu suskilinės [8].

Krauso testas – dar vienas atliekamas bandymas stabdžių kaladėlių kokybei patikrinti. Šio bandymo metu kaladėlėms suteikiama papildoma apkrova, padidinamas bandymų dažnis bei didinama temperatūra. Tai leidžia pagreitinti kaladėlių dėvėjimąsi, taip išbandant, kaip jos elgsis kritinėmis sąlygomis. Krauso matavimo sistema išmatuoja trinties koeficientą, priklausomai nuo stabdžių naudojimo dažnio ir kaladėlių temperatūros [19].

Stabdžių frikcinės medžiagos naudojimo trukmė priklauso nuo daugybės veiksnių: aplinkos sąlygų (kelio danga, vietovės topografija ir aplinkos temperatūra), stabdžių naudojimo būdo (agresyvus vairavimo stilius, transporto priemonės perkrova) ir stabdžių sistemos būklės (užsiblokuoja vienas arba daugiau stabdžių apkabos cilindrus, netinkamai veikia stabdžių stiprintuvai, pažeista stabdžių apkaba, atsiranda smulkūs stabdžių būgno arba stabdžių disko įtrūkimai ir pan.). Didelę įtaką medžiagų susidėvėjimui taip pat turi transporto priemonės stabdymo greitis ir tai yra susiję su stabdomos transporto priemonės stabdžių sistemai perduodamos energijos kiekiu. [21]. Pažvelgus į susidėvėjimo problemą iš kitos pusės, galima pasakyti, kad pagrindinę įtaką turi trys fiziniai dydžiai, susiję su stabdymo procesu. Tai yra trinties poros temperatūra, stabdomos transporto priemonės greitis ir stabdymo uždelsimas. [2]

Daugumai frikcinės medžiagų būdingas trinties koeficiento sumažėjimas dėl temperatūros įtakos. Stabdymo jėgos sumažėjimo priežastis yra ta pati – naikinantis aukštos temperatūros (virš 300 °C) poveikis frikcinės medžiagai. Jo išvengiama, visų pirma, parenkant tinkamą frikcinės medžiagos sudėtį. Siekiant užkirsti kelią šiam reiškiniui, gamybos proceso metu atliekamas terminis stabdžių kaladėlių frikcinės medžiagos paviršiaus apdorojimas. Šis procesas atliekamas kaitinant paviršių 600 °C temperatūros infraraudonaisiais spinduliais arba kontaktiniu būdu, prispaudžiant stabdžių kaladėles prie iki 800 °C įkaitintos temperatūros plokštės. Tokiu būdu pagamintos stabdžių kaladėlės

nuo pat jų naudojimo pradžios pasižymi stabiliu trinties koeficientu tiek žemoje, tiek ir aukštoje temperatūroje.

## Frikcinės medžiagos

Stabdžių kaladėlių kūrimas prasideda nuo frikcinės medžiagos mišinio komponentų proporcijų parinkimo. Tyrimų centruose inžinieriai gamybinėje linijoje realiomis sąlygomis kuria naujus mišinius. Šiame etape gaminama daugiau kaip 200 įvairių komponentų frikcinį medžiagų mišinių, skirtų kaladėlių medžiagoms galutinai parinkti. Jų kietumas, fizinės bei cheminės savybės neturi kisti stabdant. [2]. Kai inžinieriai yra patenkinti pirmųjų pagamintų kaladėlių kokybe, jie intensyviai tęsia kaladėlių testavimą, kurį atliekant nustatomos fizinės bei cheminės savybės, stabdymo efektyvumas, patogumas, susidėvėjimas bei poveikis aplinkai. Po kompleksinių laboratorinių testų ateina laikas bandomajam važiavimui normaliomis bei ekstremaliomis eismo sąlygomis.

### Organinės frikcinės medžiagos

Frikcinės medžiagos naudojamos ne tik stabdžiuose, bet ir sankabose. Frikcinė medžiaga gali būti priekniedijama arba priklijuojama prie kaladėlės pagrindo. Frikciniai stabdžių ir sankabų elementai gaminami iš medžiagų, kurios pasižymi dideliu atsparumu dilimui, aukštomis temperatūroms bei dideliu trinties koeficientu.

Įprastinę frikcinę medžiagą sudaro nuo 10 iki maždaug 30 skirtingų sudedamųjų dalių. Šios sudedamosios dalys skirstomos į klases pagal savo atliekamas funkcijas.

2 lentelė

Frikcinių medžiagų subkomponentų funkcijų aprašymas [6]

| Medžiagos klasifikacija         | Funkcijos                                                                                                                                                                                                  |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Abrazyvai                       | Padidinti trinties koeficientą, nuvalyti disko paviršių.                                                                                                                                                   |
| Stiprikliai                     | Padidinti mechanines savybes, sumažinti dėvėjimąsi.                                                                                                                                                        |
| Rišikliai                       | „Laikyti“ visas kitas medžiagas.                                                                                                                                                                           |
| Tepalai                         | Stabilizuoti trinties koeficientą, kontroliuoti trinties plėvelės susidarymą.                                                                                                                              |
| Užpildai ir funkcionalizatoriai | Pagalbinės gamybos proceso medžiagos, skirtos galutinių produktų savikainos mažinimui, apsaugai nuo korozijos, šilumos perdavimo didinimui arba mažinimui, triukšmo mažinimui, spalvos suteikimui ir t. t. |

Medžiagų išsamesnis paaiškinimas [6]:

- *Rišikliai*: jų paskirtis – įeiti į medžiagų sudėtį ir sujungti gijų arba grūdėtą pavidalą turinčias daleles į vieną bendrą masę.
- *Sustiprinamosios medžiagos (stiprikliai)*: jų paskirtis – suteikti trinties medžiagai mechaninį atsparumą, užtikrinant kaladėlės vientisumą jos naudojimo metu.
- *Abrazyvai*: šioje grupėje yra medžiagos, kurių kietumas didesnis nei 5 pagal Moso skalę. Paprastai tai yra metalų oksidai ir keraminės medžiagos, pvz., karbidai ir nitridai. Abrazyvinės medžiagos padidina trinties koeficientą ir apsaugo disko paviršių nuo rūdžių ar susikaupusių trinties medžiagų.
- *Kietieji tepalai*: šiai grupei priskiriamos medžiagos, kurių trinties koeficientas yra mažas, pavyzdžiui, grafitai, metalų sulfidai ir teflonas. Kietųjų tepalų sudedamosios dalys yra atsakingos už abrazyvų kaupimosi poveikį, mažina ir stabilizuoja trinties koeficientą.
- *Užpildai*: kalcitas, aragonitas, azuritas, vermikulitas, elastomerai yra organinės ir neorganinės medžiagos, tiesiogiai susijusios su trinties efektyvumu, pavyzdžiui, galutinių produktų piginimas, apsauga nuo korozijos, spalvos, šilumos perdavimo didinimas arba mažinimas, komforto

gerinimas stabdant, triukšmo ir virpesių mažinimas. Kai kuriuos komponentus galima priskirti daugiau nei vienai kategorijai, nes jie atlieka kelias funkcijas, tačiau paprastai jie identifikuojami pagal jų pagrindines savybes. Terminiškai stabilios nebrangios medžiagos turi minimalų poveikį trinties savybėms ir užimdamos turį pagerina stabdžių kaladėlių gamybos procesą.

- *Funkcionalizatoriai* – tai visos ankstesnėms grupėms nepriskirtos medžiagos, kurios galutiniam trinties mišiniui suteikia specifinių savybių, pavyzdžiui, triukšmo slopinimas, dažikliai, korozijos inhibitoriai ir kt.

Organinės medžiagos yra klasifikuojamos į tris pagrindinius lygmenis, pateiktus 3 lentelėje.

3 lentelė

**Lengvojo ir sunkiasvorio transporto organinių trinties medžiagų nomenklatūra [21]**

| Medžiagų tipas                                                                          | Apytikslė medžiagų cheminė sudėtis                                                                                                                                   | Pagrindinės charakteristikos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| NAO - Neasbestinis organinis lydinys, kartais vadinamas „labai mažo anglingumo plienas“ | Mažiau kaip 10 proc. varis, geležis ir jų lydinių<br>Sudėtyje yra spalvotųjų metalų, įvairių abrazyvų ir tepalų, mineralinių pluoštų ir kitų sutvirtinančių medžiagų | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mažas arba vidutinis trinties koeficientas 0,33 -0,40.</li> <li>- Puikus dilimas esant žemesnėms temperatūroms (žemesnės nei 200°C.</li> <li>- Santykinai prastas dilimas esant didelėms apkrovoms ir esant didelei trinčiai</li> <li>- Geros triukšmingumo ir šiurkštumo charakteristikos</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                    |
| ECE (atitinka ECE 90 reglamento reikalavimus). Kartais vadinami „europietišku“          | 10-50 proc. plienas,, varis ir vario lydiniai (žalvaris).<br>Sudėtyje yra geležies miltelių, įvairių abrazyvų ir tepalų, šiek tiek spalvotųjų metalų                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vidutiniškai didelis trinties koeficientas, paprastai 0,35-0,5</li> <li>- Geras stabdžių veikimas esant dideliems greičiams</li> <li>- Didelis kaladėlių ir diskų nusidėvėjimas.</li> <li>- Tinka esant dideliui greičiui</li> <li>- Didesnis triukšmas</li> <li>- Ilgesnis tarnavimo laikas</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Pusmetaliai                                                                             | Daugiau kaip 50 proc. plieno.<br>Daugiausia yra plieno pluošto, akytosios geležies miltelių, abrazyvinių medžiagų ir grafito/kokso lubrikantų                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mažas trinties koeficientas 0,28 -0,38</li> <li>- Geros dilimo charakteristikos</li> <li>- Prastas dėvėjimasis esant žemoms temperatūroms. &lt;100°C</li> <li>- Puikus dilimas esant aukštesnėms nei 200°C temperatūroms</li> <li>- Geras dilimas esant didelėms apkrovoms</li> <li>- Prastas dėvėjimasis esant dideliems greičiams</li> <li>- Didesnis triukšmas, vibracija ir paviršių šiurkštumas, palyginti su NAO</li> <li>- Sudėtyje nėra vario</li> <li>- Maža kaina</li> <li>- Aukšta stabdžių skysčio temperatūra gali būti problema</li> </ul> |

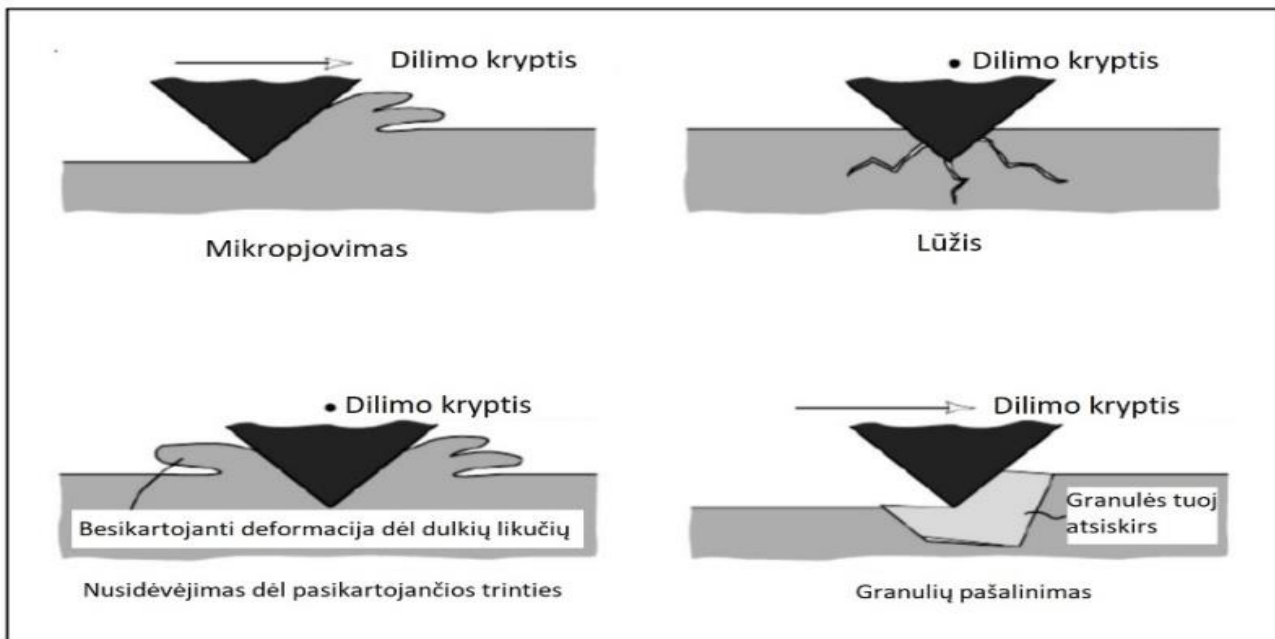
***Abrazyvai frikcinėse medžiagose***

Abrazyvinių komponentų stabdžių sistemoje pagrindinė užduotis yra ne šlifuoti ar nupjauti stabdžių disko / būgno paviršių, bet atlikti du svarbius vaidmenis: 1) padidinti trinties koeficientą stabdžių kaladėlės ir disko sąsajoje; 2) didinti trinties medžiagos atsparumą dėvėjimuisi.

Vienos populiariausių abrazyvinių medžiagų yra cirkonis, cirkonio silikatas, kvarcas, aliuminio oksidas, silicio karbidas, chromo oksidas, silicio dioksidas, mulitas.



Pagrindiniai abrazyvinio dilimo mechanizmai yra pjovimas, lūžis, nusidėvėjimas dėl pasikartojančios trinties ir susidariusių granulių pašalinimas. Jie pateikti 7 paveiksle.



**7 pav.** Abrazyvo dilimo mechanizmai [18]

Pjovimo ir nusidėvėjimo dėl pasikartojančios trinties mechanizmai daugiausiai yra susiję su plastine dėvėjimosi medžiagų deformacija. Ir atvirkščiai, suskaidymas atsiranda trapioms medžiagoms, kur kontakto pobūdis pasikeičia iš elastoplastinio į Hertzo lūžį. Atsižvelgiant į tai, kad dalelės ir kūnai gali būti plastiškai deformuojami arba trupinami įtrūkimais ir chemiškai sąveikaujant dilimo proceso metu, siekiant geriau paaiškinti abrazyvinį nusidėvėjimą, reikėtų atsižvelgti į medžiagų kietosios būsenos sandarą [16].

Didelis kietumas, geras šiluminis laidumas, geras atsparumas terminiams smūgiams, aukšta lydymosi temperatūra ir geras atsparumas oksidacijai bei cheminėms medžiagoms – tai pagrindinės karbidų, naudojamų kaip abrazyvai frikcinėse medžiagose, savybės.

Elemento, susijungusio su anglimi, kad susidarytų karbidas, tipas lemia junginio savybes.

Trinties medžiagų sudėčiai nerekomenduojama naudoti į druskas panašių ir tarpinio perėjimo karbidų dėl nestabilaus cheminio ryšio, kuris lengvai hidrolizuojasi vandenyje arba praskiestose rūgštyse. Tarpinio perėjimo karbidai atitinka visus abrazyvinėms medžiagoms keliamus reikalavimus. Jie iš tiesų dažnai naudojami pjovimo įrankiuose ir dilimui atspariose detalėse, tačiau prieš naudojant šias medžiagas trinties medžiagose reikėtų atsižvelgti į jų kainą ir tankį.

Boro karbidas yra mažesnio tankio karbidas, jis gali būti naudojamas automobilių stabdžių kaladėlių gamyboje. Kai kurie boridai ir nitridai dėl savo savybių taip pat įdomūs kaip abrazyvinės medžiagos, tačiau vėlgi reikėtų atsižvelgti į jų kainą ir tankį. Vadovaujantis tais pačiais argumentais kaip ir karbidams, šiam tikslui tinkamiausi yra kovalentiniu ryšiu sujungti boridai ir nitridai.

Palyginus šias medžiagas matyti, kad boridai ir karbidai yra kietesni ir ne tokie trapūs kaip nitridai; jų lydymosi temperatūra aukštesnė, tačiau šiluminis stabilumas oksiduojančioje aplinkoje mažesnis. Dauguma šių medžiagų dėl specifinių savybių laikomos specialiomis techninės keramikos medžiagomis.

Dėl mažo tankio, didelio kietumo ir lydymosi temperatūros, gero atsparumo terminiams poveikiams ir cheminio stabilumo aukštoje temperatūroje silicio karbidas (SiC) yra gerokai pigesnis už kitus kovalentinius boridus ir nitridus. Jis dažnai pasitaiko automobilių stabdžių kaladėlių trinties medžiagų sudėtyje. SiC natūraliai randamas kaip moisanitas, tačiau tai yra retas mineralas. Pagrindinis SiC gaminamas sintezės būdu. Pramoninei gamybai gali būti naudojama kietojo degimo sintezė, kai silicio ir anglies milteliai sutankinami, degazuojami ir uždegami vakuume arba inertinėje atmosferoje [16].

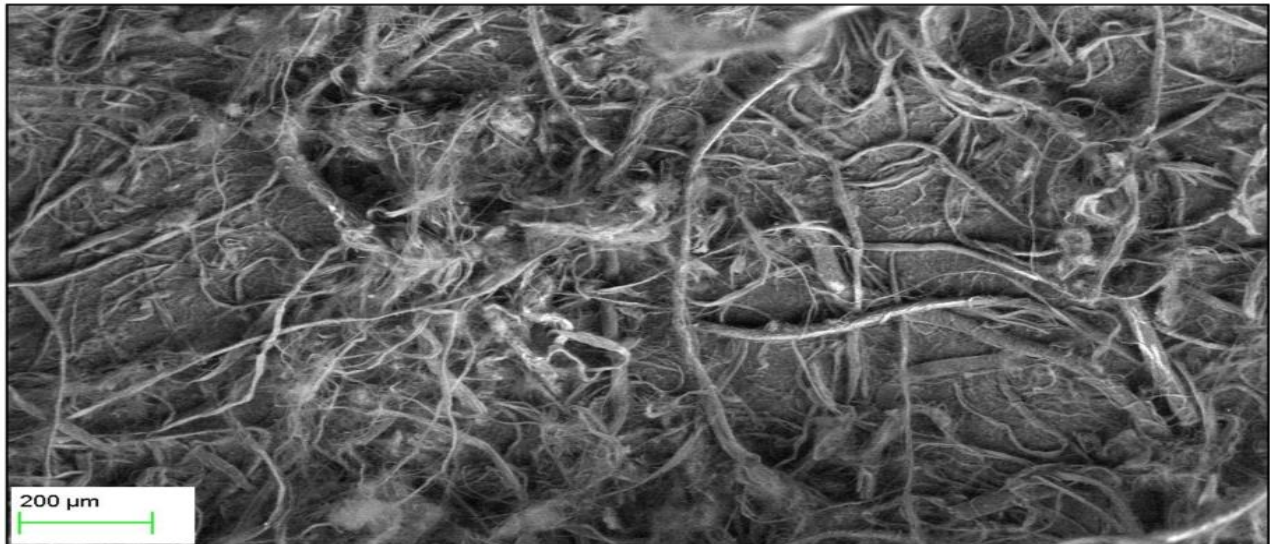
### **Stiprikliai (sustiprinamosios, armuojančios medžiagos)**

Stiprikliai frikcinėse medžiagose mažina ir stabilizuoja nusidėvėjimą esant bet kokioms darbo sąlygoms (pvz., skirtingam greičiui, kintančiai temperatūrai, slėgiui, stabdymo trukmei), didina ir stabilizuoja trinties koeficientą, didina mechaninį atsparumą, saugo nuo lūžių.

Kaip stiprikliai dažniausiai naudojamos įvairios pluoštinės medžiagos. Pagal sandarą skiriami amorfiniai ir kristaliniai pluoštai, pagal gamybos technologiją – natūralūs ir sintetiniai. Kristalinius pluoštus galima išskirstyti į keturias skirtingas klases: 1) natūralūs mineraliniai, 2) natūralūs organiniai, 3) sintetiniai neorganiniai, 4) sintetiniai organiniai.

Anksčiau buvo naudojami asbesto pluoštai dėl savo gero atsparumo dilimui, cheminio ir terminio stabilumo. Tačiau dėl savo pavojingos prigimties asbesto buvo atsisakyta ir jo naudojimas uždraustas. Dar viena medžiaga, kurios naudojimas stabdžių kaladėlių gamyboje mažinamas, yra varis. Vario naudojimas mažinamas dėl vario dulkių nusėdimo vandens telkiniuose ir galimo telkinių užteršimo [20].

Kitas frikcinėse medžiagose naudojamas stipriklis – plieno pluoštas. Jis pagerina atsparumą dilimui aukštoje temperatūroje ir mažina stabdžių kaladėlių nusidėvėjimą. Galimos įvairios plieno pluošto rūšys, pavyzdžiui, plėvelės ar vielos pavidalu. Paprastai frikcinėms medžiagoms jie naudojami trumpais pluoštais [10].



**8 pav.** Pluoštinės aramido plaušienos mikrostruktūra [5]

Sintetiniai organiniai pluoštai pasižymi mažu svoriu, geru stiprumu ir standumu. Vienas iš naudojamų sintetinių organinių pluoštų yra aramido pluoštas. Jis naudojamas dėl gero standumo ir svorio santykio, didelio šiluminio stabilumo ir gero atsparumo dilimui. Frikcinių medžiagų kompozitui jis suteikia: 1) mažesnę triukšmą ir vibraciją, 2) didesnę atsparumą korozijai, lyginant su metaliniais pluoštais, 3) mažą savitąjį svorį, 4) padidėjusį porėtumą, 5) mažą šilumos laidumą.

8 paveiksle pateiktas pluoštinės aramido plaušienos vaizdas pro mikroskopą.

Keraminiai pluoštai atsparūs lydymuisi, karščiui ir cheminėms medžiagoms, bet kuriuo atveju jie nėra degūs. Keraminių pluoštų dilimo mechanizmas daugiausia yra abrazyvinis ir nuo kitų pluoštų skiriasi dėl medžiagos trapumo. Kristalinės keramikos pluoštai išsiskiria plačiu naudojimo diapazonu. Jie gali būti naudojami kaip ugniai atsparūs iki temperatūros, kuri viršija 1000°C.

Siekiant papildomai sustiprinti frikcinės medžiagas aukštoje temperatūroje, dar gali būti naudojamas boras, boro nitridas, silicio karbidas, silicio nitridas, aliuminio oksidas ir kitos panašiai tinkančios medžiagos.

Anglies pluoštai istoriškai pradėti gaminti karbonizuojant natūralius pluoštus, kurių pagrindą sudaro celiuliozė (pavyzdžiui, medvilnė, linas, sizalis), arba naudojant chemines medžiagas. Anglies pluoštai, kurių pagrindą sudaro celiuliozė, sudaro tik 1–2 proc. visos anglies pluošto gamybos, tačiau pigių natūralių medžiagų, tokių kaip ligninas ar celiuliozės pirmtakai, tyrimai, skirti masinei anglies

pluoštų gamybai automobilių pramonėje, dar turi būti tobulinami. Ne kiekvienas žaliavos šaltinis tinka anglies pluoštui, grafito sluoksnių išsidėstymas išilgai pluošto ašies ir skerspjūvio mikrostruktūra lemia galutinį stiprį. Be bendrųjų reikalavimų, anglies pluoštai suteikia frikinėms medžiagoms ir kitų savybių: gerą šilumos sklaidą, labai didelį standumo ir svorio santykį, atsparumą dilimui, mažą linijinį šiluminio plėtimosi koeficientą, cheminį inertiškumą [11].

Kaip stiprikliai gali būti naudojamos labai įvairios medžiagos: pavyzdžiui, sintetinis kaučiukas, fenolio formaldehido derva arba miltelių užpildai, chromo oksidas, baritas, stiklo pluoštas, bazalto pluoštas, granuliuotas grafitas, dribsninis grafitas, alyvuota siera.

### ***Rišamosios medžiagos***

Rišamųjų medžiagų paskirtis yra sujungti visus frikinių medžiagų komponentus į vieną masę bei užtikrinti jų struktūrinį vientisumą veikiant mechaniniams ir šiluminiams poveikiams, neprarandant efektyvumo. Yra dvi pagrindinės rišamosios medžiagos: fenolinė derva ir silikono derva.

Fenolinę derivą lengva modifikuoti, todėl, siekiant ją sutvirtinti, ji modifikuojama su kitomis medžiagomis. Vienas iš variantų yra fenolinė derva, modifikuota su anakardžių riešutų kevalų sultimis. Tai pagerina medžiagos lankstumą, gerą džiūvimą po iškaitinimo, suteikia šiluminį stabilumą bei atsparumą rūgštims ir šarmams. Šis lankstumas padeda sumažinti stabdžių triukšmą [12]. Boru modifikuota fenolinė derva pasižymi didesniu šiluminiu atsparumu ir geresniu mechaniniu atsparumu nei įprastos fenolinės dervos. Akrilo kaučiuku modifikuotos dervos užtikrina puikų lankstumą ir vibracijos sugėrimą. Įprastos akrilo gumos kietėja prie santykinai aukštos temperatūros, tačiau akrilo kaučiuku modifikuotos dervos išlaiko gerą lankstumą iki  $-30^{\circ}\text{C}$  temperatūros. Silikono kaučiuku modifikuota derva pasižymi geru šiluminiu stabilumu, atsparumu cheminėms medžiagoms ir smūgiams, vandenį atstumiančiomis ir nelipniomis savybėmis. Fenolio akrilo dervos pasižymi stabilium trinties ir dilimo koeficientu, puikiu atsparumu karščiui ir cheminėms medžiagoms, slopina triukšmą ir vibracijas [13].

Siekiant padidinti frikinės medžiagos šiluminį atsparumą, kuriami specialios aukštos kokybės stabdžių kaladėlių silicio dervų rišikliai. Norint pasiekti gerų rezultatų, reikalingas pirolizės procesas. Jo metu  $400\text{--}600^{\circ}\text{C}$  temperatūroje pirolizuojama keraminė silicio pagrindo rišamoji medžiaga. Silicio dervos pagrindu pagamintos frikinės medžiagos paprastai naudojamos karbokeraminiams stabdžių diskams, kurie pasižymi dideliu ir stabilium našumu. Tačiau dėl triukšmo, vibracijos ir paviršių šiurkštumo jos naudojamos tik lenktyninėms stabdžių sistemoms. Siekiant pagerinti triukšmo, vibracijos ir šiurkštumo savybes ne lenktyninėms skirtose sistemose, buvo sukurtos kai kurios hibridinės silicio ir fenolinių dervų pagrindu pagamintos frikinės medžiagos [14].

### ***Tepalai***

Stabdžių sistemoje kontaktuoja du paviršiai - stabdžių kaladėlės ir stabdžių diskas. Dėl statinio ir dinaminio kontakto tarp šių dviejų kūnų atsiranda įtempiai, todėl trinties elgsenai stabilizuoti reikia naudoti tepalus. Kaip tepalai naudojamos šios medžiagos: stibio trisulfidas, grafitas, molibdeno disulfidas, alavo sulfidas, naftos koksas, švino sulfidas. Jie paprastai atlieka šias funkcijas:

- ant paviršiaus sudaro ištisinę plėvelę, kuri pasižymi geromis elastinėmis savybėmis,
- sudaro stiprų fizinį arba cheminį ryšį su paviršiumi,
- sumažina dilimą važiuojant dideliu greičiu ir (arba) aukštoje temperatūroje,
- mažina stabdžių skleidžiamą garsą,
- gerina trinties atsistatymą po pakartotinio naudojimo,
- didina šilumos laidumą, siekiant išvengti perkaitimo dėl trinties.

Norimas efektas stabdymo metu yra stabilaus trinties sluoksnio susidarymas su stipria fizine ar chemine sąveika su paviršiais. Frikinis sluoksnis turi būti ištisinė plėvelė, turinti geras elastines savybes, apsauganti komponentus nuo susidėvėjimo ir korozijos, reikalinga tam, kad stabilizuotųsi trinties koeficientas ir būtų išvengta sukibimo tarp stabdžių disko bei kaladėlių. Tepalai yra pagrindiniai komponentai nustatant trinties sluoksnio charakteristikas sukibimo ir tepimo požiūriu [15].

## **Išvados**

XX amžiaus pradžioje prasidėjo frikcinų medžiagų ir stabdžių kaladelių gamybos istorija. Pirmąją frikcinės medžiagos mišinį sudarė medvilnė, prisotinta lipnia medžiaga, pvz.: bitumu. Vėliau medvilnė buvo pakeista asbesto audiniu, armuotu žalvarine viela. Dėl kancerogeninių savybių 1970-aisiais metais asbestas buvo pakeistas įvairių pluoštų mišiniu, įskaitant stiklo pluoštą, mineralinę vilną, sintetinius pluoštus, plieno pluoštą bei natūralius pluoštus. Dabartiniai frikciniai stabdžių ir sankabų elementai gaminami iš medžiagų, pasižyminčių dideliu trinties koeficientu, dideliu atsparumu dilimui, gniuždymui bei aukštomis temperatūroms. Pavojingi komponentai keičiami nekenksmingais žmogaus sveikatai.

Yra penki stabdžių kaladelių sudedamieji sluoksniai: frikcinės medžiagos, apatinis sluoksnis, lipniosios medžiagos, atraminė plokštelė, tarpiklis. Frikcinė medžiaga gali būti klijuojama arba kniedijama prie, taip vadinamo, tvirtinimo elemento – prie kaladėlės korpuso arba prie sankabos disko. Dėl trinties atsirandančios aukštos temperatūros lemia greitą frikcinės medžiagos dilimą bei trinties praradimą, kuris ženkliai mažina stabdymo efektyvumą. Kaladėlės, atitinkančios aukštus gamyklinius reikalavimus, yra žymimos OE. Stabdžių kaladėlės turi tenkinti įvairių teisės aktų reikalavimus. Vienas jų – ECE R90. Tai yra stabdžių saugos reglamentas, kuris draudžia pigių, reikalavimų neatitinkančių frikcinų medžiagų naudojimą.

Frikcinų medžiagų pagrindas paprastai yra polimerinė rišamoji medžiaga su užpildais ir pluoštais, kurie užtikrina gerą trinties efektyvumą stabdant ir mechaninį atsparumą, reikalingą susidarantioms trinties jėgoms atlaikyti. Lengvuosiuose automobiliuose naudojamos frikcinės medžiagos yra kompozitai, sudaryti iš abrazyvų (cirkonis, cirkonio silikatas, kvarcas, aliuminio oksidas, silicio karbidas, chromo oksidas, silicio dioksidas, mulitas), stipriklių (aramido pluoštai, poliakrinitrilas, anglies pluoštas, metalo pluoštai, plieno pluoštai, keramikos pluoštai, mineraliniai pluoštai), užpildų ir funkcionalizatorių (kalcitas, aragonitas, azuritas, vermikulitas, elastomerai), tepalų (stibio trisulfidas, grafitas, molibdeno disulfidas, alavo sulfidas, naftos koksas, švino sulfidas). Visiems komponentams sujungti į vieną medžiagą yra naudojamos įvairios dervos. Tos pačios sudėties ir sandaros frikcinų medžiagų ilgaamžiškumas gali skirtis net keletą kartų. Tai priklauso nuo aplinkos sąlygų, stabdžių naudojimo būdo ir stabdžių sistemos būklės, kadangi jie visi gali lemti trinties poros darbinę temperatūrą.

## **Literatūra**

1. Wooden Block and Lever (2010). <https://carsafetyphysics.weebly.com/history-of-brakes.html>
2. Stabdžių trinkelų istorija (2018). <https://motofocus.lt/naujienos/8414,stabdziu-trinkeliu-istorija>
3. History of the automobile (2021). <https://www.britannica.com/technology/automobile/History-of-the-automobile>
4. Sliding brake calipers (2021). <https://www.brembo.com/en/ricerca?k=Sliding%20brake%20calipers>
5. Fixed brake calipers (2021). <https://www.brembo.com/en/ricerca?k=Fixed%20brake%20calipers>
6. Vented rotors (2022). <https://m.indiamart.com/proddetail/vented-rotors-7939508548.html>
7. Useka Genuine auto Parts (2020). [https://www.ahdmacro.com/showroom/semi-metallic-formula-brake-pads-d815-auto-spares-parts-for-infiniti-nissan-renault-suzuki-d1060-88e87-.html?fbclid=IwAR2Mg2JfdOu5\\_FTcla4pwHVtdsTrYTDytTXWCAZqqXjB2eFW8y\\_thbdsVcM](https://www.ahdmacro.com/showroom/semi-metallic-formula-brake-pads-d815-auto-spares-parts-for-infiniti-nissan-renault-suzuki-d1060-88e87-.html?fbclid=IwAR2Mg2JfdOu5_FTcla4pwHVtdsTrYTDytTXWCAZqqXjB2eFW8y_thbdsVcM)
8. Agreement Concerning the adoption of uniform technical prescriptions for wheeled vehicles, equipment and parts, which can be fitted and/or be used on wheeled vehicles and the conditions for reciprocal recognition of approvals granted on the basis of these prescriptions (2012). *E/ECE/324/Rev.1/Add.89/Rev.3*. [https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/R090r3e\\_01.pdf](https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/R090r3e_01.pdf)
9. Reizz brake pads (2022). <https://www.allmaxparts.com/brake-pad.html>
10. Jang, H., Ko, K., Kim, S. J., Basch, R. H., Fash, J. W. (2004). The effect of metal fibers on the friction performance of automotive brake friction materials. *Wear*, 256(3-4), 406-414.
11. Tang, L.-G., Kardos, J. L. (1997). A Review of Methods for Improving the Interfacial Adhesion between Carbon Fiber and Polymer Matrix. *Polymer Composites*, 18(1), 100-113.



12. Balgude, D., Sabnis, A. S. (2014). CNSL: an environment friendly alternative for the modern coating industry. *Journal of Coatings Technology and Research*, 11, 169-183.
13. Kane, J. F., Mowrer, N. R. (2003). Phenolic resin compositions with improved impact resistance. <https://patents.google.com/patent/US5736619A/en>
14. Yilogor, E., Yilgor, I. (2014). Silicone containing copolymers: Synthesis, properties and applications. *Progress in Polymer Science*, 39(6), 1165-1195.
15. Ouyang, J. H., Sasaki, S., Murakami, T., Umeda, K. (2004). Evaluation of solid lubricant materials for use under extreme environmental conditions: A review. *Recent research developments in materials science*, 5, 85-103.
16. Moore, M. A. (1978). Abrasive wear. *International Journal of Materials in Engineering Applications*, 1(2), 97-111.
17. Bosch brake pads (2022). <https://www.boschautoparts.com/g/brakes>
18. Pooley, C. M., Tabor, D. (1972). Friction and Molecular Structure: The Behaviour of Some Thermoplastics. *Proceedings of the Royal Society A, Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 329 (1578). <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rspa.1972.0112>
19. Wang, Z, Wang, J., Wang, L., Ma, Y. (2022). Development and Comparative Evaluation of Reduced-scale Krauss Friction Tester based on Similarity Theory. *Mechanika*, 28(4), 329-337.
20. Roy Cox (2012). Engineered Tribological Composites: The Art of Friction Material Development. In *Engineered Tribological Composites*, 1-15. SAE.
21. Materials - Virtually friction free (2013). Oak Ridge National Laboratory. Materials Science and Technology Division. Physical Sciences Directorate Publications. <https://www.ornl.gov/news/materials-virtually-friction-free>