

# РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТОРМОЗНОГО ДИСКА ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

Еремин В.П., Комарова М.Г., к.т.н. Еремин Г.П.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
eremingeorgy@mail.ru

*Целью работы является снижение неподрессоренной массы колеса гоночного автомобиля за счет применения в тормозном механизме диска из титанового сплава.*

*Объектом исследования является тормозной диск автомобиля класса «Формула студент». Предметом исследования является применение титанового сплава в конструкции тормозного диска и оценка его работоспособности. В рамках работы выполнен анализ тепловой нагруженности тормозного диска из титанового сплава и экспериментальная проверка его работоспособности. Расчетная оценка теплового нагружения проведена методом конечных элементов. Для этого разработана методика расчета с учетом изменения величин теплового потока и коэффициента конвекции при неоднократном торможении. В работе приведены результаты расчетов в соответствии с данной методикой. Численная оценка показала, что температура, возникающая в тормозном механизме, не превышает допустимую для работоспособности тормозного механизма. Натурный эксперимент показал, что расчетная температура диска, возникающая при торможении, близка к температуре, установленной в ходе натурального эксперимента. Погрешность составляет не более 13 %. Также натурный эксперимент показал, что тормозной диск из титанового сплава неработоспособен при выбранной технологии изготовления.*

*В рамках работы сделаны выводы о применимости приведенной методики теплового анализа тормозного диска, о работоспособности конструкции и сформулированы предложения по повышению ее эффективности.*

**Ключевые слова:** тормозная система, тормозной диск из титанового сплава, тормозной стенд.

## Введение

Самый распространенный на сегодняшний день в автомобилестроении тип тормозного механизма – дисковый тормозной механизм. Главным элементом такого механизма является тормозной диск. Торможение автомобиля осуществляется путем создания тормозного момента за счет трения элементов тормозного механизма (тормозного диска и накладок тормозных колодок).

Одной из причин отказа тормозной системы является перегрев тормозного механизма. Чем больше прижимное усилие тормозной колодки к диску, тем выше температура тормозного диска и колодок. Тепло от тормозных колодок передается суппорту, нагретые поршни которого могут довести тормозную жидкость до кипения, что приводит к провалу тормозной педали за счет потери упругих свойств жидкости [1].

Тормозные диски колесных машин изготавливают из чугуна, стали и композиционных материалов. Известны конструкции из титановых сплавов. Тормозные диски, изготовленные из чугуна обладают невысокой стоимостью и высокой износостойкостью. Но при этом диски из чугуна, имеют ряд недостатков: обладают большей массой по сравнению с аналогами из других материалов, предел прочности чугуна ниже, чем у стали, такие диски подвержены коррозии.

Тормозные диски из стали обладают в среднем схожей массой с аналогами из чугуна. Диапазон предела прочности большинства сталей выше, чем у чугунов, поэтому тормозные диски из стали могут выдерживать большую нагрузку, чем аналоги из чугуна.

Диски из карбон-керамики за счет свойств материала имеют меньшую массу по сравнению с аналогами из чугуна и стали. Такие

диски невосприимчивы к коррозии за счет химическо-физических свойств материала. Применение керамических тормозных дисков позволяет увеличить коэффициент трения и повысить эффективность торможения в нагретом до высоких температур состоянии. Недостатком дисков из карбон-керамики является высокая стоимость производства по сравнению с аналогами из других материалов, а также необходимость их прогрева для повышения фрикционных характеристик [2].

Диски из титанового сплава обладают меньшей массой по сравнению с аналогами из чугуна и стали и дешевле аналогов из карбон-керамики. Такие диски имеют самый высокий предел прочности. Коррозионная стойкость таких дисков выше, чем у дисков из стали и чугуна. Недостатками такого диска является низкая температура горения титана. Характеристики материалов тормозных дисков приведены в таблице 1.

Целью работы является снижение непродессоренной массы колеса гоночного автомобиля за счет применения в тормозном механизме диска из титанового сплава.

### Методы и средства проведения исследований

Целью оптимального проектирования тормозной системы является повышение уровня активной безопасности автомобиля и уменьшение времени прохождения дорожных участков за счет эффективности тормозного механизма. Масса является одной из важных характеристик автомобиля. Снижение массы тормозного диска приводит к уменьшению непродессоренной массы. Кроме того, снижение массы тормозного диска приводит к уменьшению момента инерции трансмиссии. После проведения анализа характеристик тормозных дисков из различных материалов выбран титановый сплав BT20, так как масса тормозного диска из титанового сплава меньше аналогов из чугуна и стали и стоимость его производства ниже, чем у аналога из карбон-керамики.

Для болида класса «Формула студент» используется тормозная система с компонентами фирмы AP-Racing. Основные размеры тормозного диска определяются требованиями выбранных суппортов. Для таких суппортов рекомендуемый диаметр тормозного диска 220 мм, а его толщина – 4 мм [2].

Одним из критериев работоспособности тормозного механизма является отсутствие кипения тормозной жидкости. На автомобиле используется тормозная жидкость motul RBF 660, температура кипения которой достигает 325 °С [6]. Таким образом, для обеспечения надежной работы тормозного механизма необходимо на стадии проектирования оценить возможность нагрева тормозного диска до температуры, которая может привести к перегреву и последующему вскипанию тормозной жидкости. На сегодняшний день одним из самых распространенных методов оценки тепловой нагруженности конструкций является метод конечных элементов.

Результаты расчета тормозного диска методом конечных элементов зависят от выбора коэффициента конвекции. Необходимо подобрать наиболее подходящую методику для моделирования нагрева и охлаждения диска спортивного автомобиля.

Для описания конвективной теплопередачи используется формула:

$$q_{ct} = h_R \cdot (T_0 - T_{ct}), \quad (1)$$

где  $q_{ct}$  – плотность теплового потока на поверхности ( $Вт/м^2$ ),  $h_R$  – коэффициент конвекции ( $Вт/(м·К)$ ),  $T_0$  – температура среды ( $К$ ),  $T_{ct}$  – температура поверхности тела ( $К$ ) [3].

Формула для расчета коэффициента конвекции при числах Рейнольдса  $Re < 2,4 \cdot 10^5$  имеет вид:

$$h_R = 0,7 \cdot \left( \frac{K_a}{D_{disk}} \right) \cdot Re^{0,55}, \quad (2)$$

где  $D_{disk}$  – внешний диаметр диска ( $м$ ),  $K_a$  – теплопроводность воздуха ( $Вт/(м·К)$ ) [3].

Таблица 1

Характеристика материалов тормозных дисков

Характеристика	Чугун	Сталь	Карбон-керамика	Титан
Модуль упругости, МПа	0,9·10 <sup>5</sup> –1,55·10 <sup>5</sup>	1,18·10 <sup>5</sup> –2,2·10 <sup>5</sup>	30·10 <sup>9</sup> –150·10 <sup>9</sup>	1,12·10 <sup>5</sup> –1,15·10 <sup>5</sup>
Предел прочности, МПа	100–450	255–3500	500–1000	295–1635
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	6800–7300	7700–7900	1300–1950	4450–6630

Формула для расчета коэффициента конвекции при  $Re > 2,4 \cdot 10^5$  [3] имеет вид:

$$h_R = 0,4 \cdot \left(\frac{K_a}{D_{disk}}\right) \cdot Re^{0,8} \quad (3)$$

В таблице 2 приведена характеристика построенной конечно-элементной модели.

Таблица 2

Характеристика КЭМ тормозного диска

Тип КЭМ	Количество КЭМ	Количество узлов
гексаэдр	114570	569515

При расчете методом конечных элементов принято решение численно смоделировать натурный эксперимент по ГОСТ Р 41.13 – Н – 99, согласно которому натурные испытания тормозных дисков проходят в 2 этапа.

Первый этап: испытание типа 0 (обычное испытание эффективности при неразогретых тормозах). Средняя температура рабочих тормозов на самой разогреваемой оси ТС, измеренная в тормозных накладках или на тормозной дорожке диска, должна варьироваться от

65 до 100 °С до момента торможения [4].

Второй этап: испытание типа I (испытание на потерю и восстановление эффективности). Данный комплекс мероприятий проводится на уже разогретых дисках с температурой более 100 °С. Максимальная скорость, 80 км/ч, обусловлена предельной скоростью на соревнованиях «Формула студент».

Для определения реальных динамических характеристик автомобиля при разгоне и торможении проведены испытания автомобиля со стальными тормозными дисками в соответствии с ГОСТ Р 41.13 – Н – 99. Автомобиль разгоняется до скорости 80 км/ч, затем совершает неполное торможение до скорости 15 км/ч, снова разгоняется и совершает полное торможение до остановки [4]. Данные изменения скорости автомобиля показаны на рис. 1.

Величина теплового потока при торможении рассчитана по формуле:

$$q_0 = \frac{P_b}{A_{pad}} \quad (4)$$

где  $P_b$  – мощность теплового потока (Вт),  $A_{pad}$  – площадь части диска, контактируемой с колодкой (м<sup>2</sup>),  $q_0$  – тепловой поток (Вт/м<sup>2</sup>) [3].

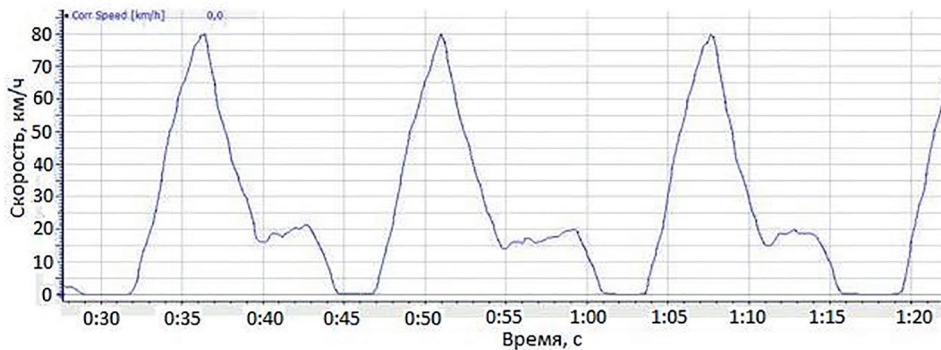


Рис. 1. Изменение скорости автомобиля при проведении испытаний

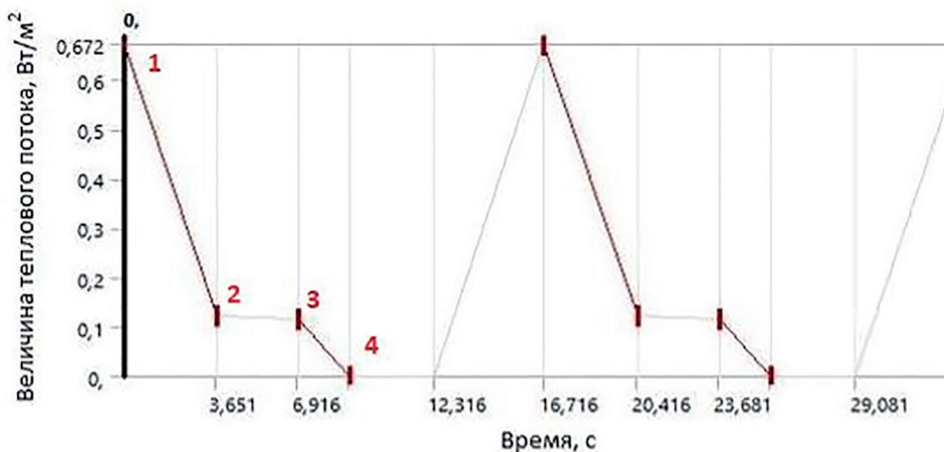


Рис. 2. Фрагмент графика изменения величины теплового потока

Мощность теплового потока рассчитывается по формуле:

$$P_b = k \cdot m \cdot a_{\max} \cdot V, \quad (5)$$

где  $k$  – коэффициент приведения вращающихся масс,  $m$  – полная масса автомобиля (кг),  $a_{\max}$  – максимальное замедление реализуемое по сцеплению ( $m/c^2$ ),  $V$  – скорость автомобиля ( $m/c$ ) [3].

Для моделирования процесса теплового нагружения, построен график зависимости значения теплового потока от времени (рис. 2). Здесь: точка 1 определяется значением теплового потока при максимальной скорости;

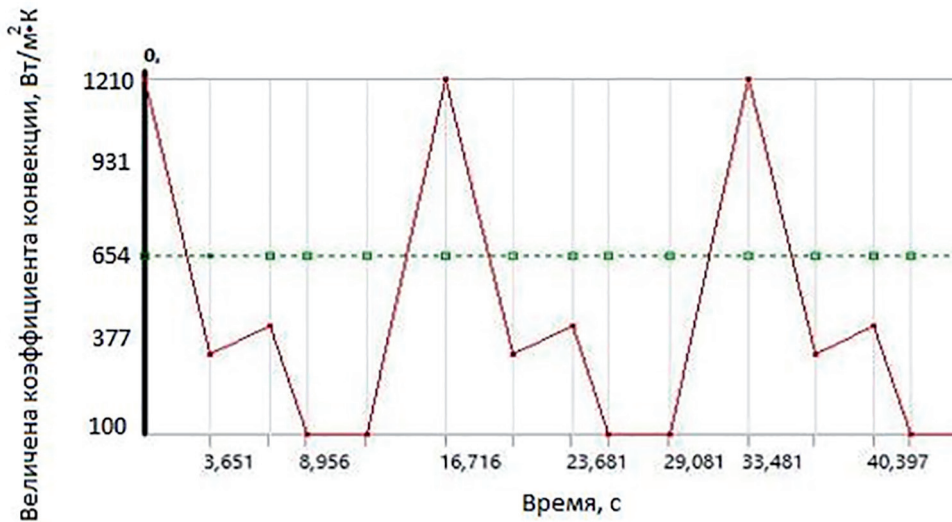


Рис. 3. График изменения величины коэффициента конвекции

точка 2 определяется значением теплового потока при скорости 15 км/ч (скорость после неполного торможения); точка 3 определяется значением теплового потока при скорости 22 км/ч (скорость после разгона); точка 4 определяется значением теплового потока в момент остановки после полного торможения.

Величина энергии излучения определяется для диска из титанового сплава, относительная степень черноты которого  $\epsilon = 0,19$ , излучение энергии происходит со всей поверхности диска.

В расчете принято допущение о том, что конвективная теплоотдача энергии во внешнюю среду происходит равномерно со всей поверхности тормозного диска. Значение коэффициента конвекции меняется в зависимости от скорости автомобиля, график изменения величины коэффициента конвекции показан на рис. 3.

Результаты расчета показаны на рис. 4, график зависимости изменения максимальной температуры от времени показан на рис. 5.

Максимальная расчетная температура возникает после 5-ого торможения и достигает значения 304 градуса. Одним из критериев работоспособности тормозного механизма является отсутствие кипения тормозной жидкости. На автомобиле используется тормозная жидкость motul RBF 660, температура кипения которой 325 °С [6]. По результату проведенного расчета можно сделать вывод, что расчетная температура не превышает температуру кипения тормозной жидкости.

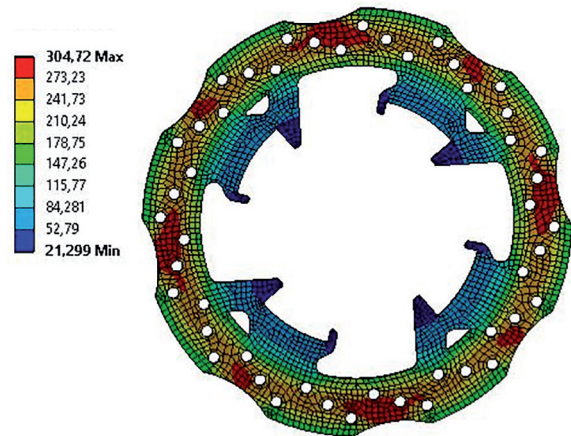


Рис. 4. Тепловое нагружение диска

Для тормозной системы болида «Формула студент» выбраны суппорта AP Racing. Для корректной работы тормозного механизма производитель рекомендует изготавливать тормозной диск с внешним диаметром 220 мм и эффективным радиусом 97 мм. [2].

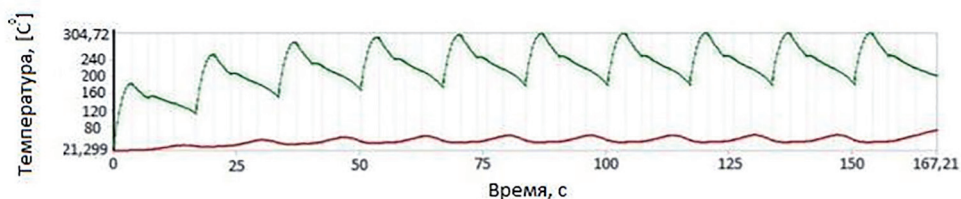


Рис. 5. График изменения температуры

Для верификации математической модели, описывающей нагрев тормозного диска, принято решение о проведении натурного эксперимента. Для этого были изготовлены экспериментальные образцы тормозных дисков из титанового сплава. Механическая обработка титановых сплавов сопряжена с определенными технологическими трудностями. Форма рабочей поверхности должна обеспечивать отсутствие вибраций в тормозном механизме. После изготовления диска лазерной резкой боковые поверхности диска подверглись обработке на токарном станке. Для обработки диска спроектирована оснастка, представляющая сменные прижимные кольца и основание (рис. 6).

Тормозной диск 3 крепится на оснастку 4 прижимными кольцами 1 и 2 с помощью бол-

тового соединения 4, 6. Для обработки диска оснастка устанавливается на цапфу токарного станка (рис. 6). Привод токарного станка вращает тормозной диск, обработка резцом проводится при охлаждении поверхности диска охлаждающей жидкостью. В начале обрабатывается рабочая поверхность диска, для этого диск закрепляется на цапфе токарного станка с прижимным кольцом 1. Далее обрабатывается необработанная поверхность диска, для этого диск закрепляется на цапфе с прижимным кольцом 2.

Для проведения натурных испытаний тормозного механизма составлена программа испытаний согласно ГОСТ Р 41.13 – Н – 99. Автомобиль разгоняется и тормозит 10 раз на «холодных» тормозных дисках. После на-

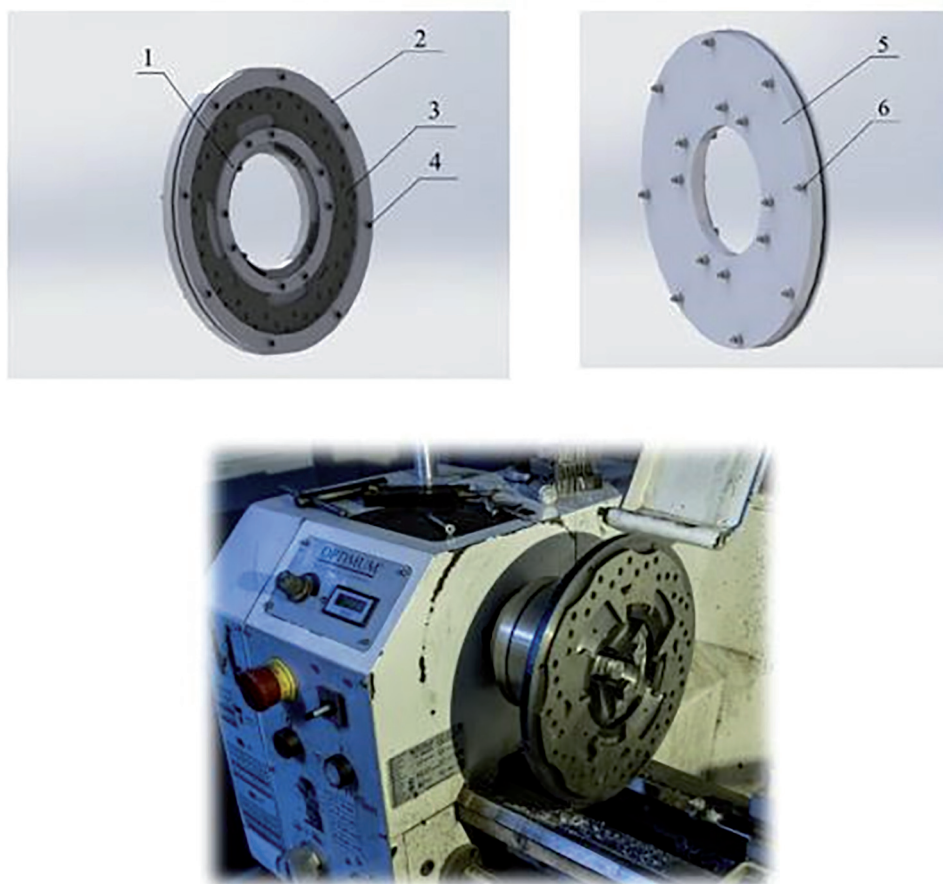


Рис. 6. Закрепление тормозного диска в станке

грева дисков до 100 °С автомобиль разгоняется и тормозит 10 раз на «горячих» тормозных дисках [4]. Для проведения испытаний выбрана круговая траектория, в конце которой автомобиль резко тормозил, подъезжая к месту фиксации температуры.

Перед началом испытаний был произведен замер толщины пары тормозных дисков из титанового сплава в четырех точках, а также комплекта колодок в двух точках с помощью микрометра. Полученные результаты для дисков и колодок, установленных на левой и правой полуосях автомобиля, приведены в таблице 3.

Далее были по очереди взвешены тормозной диск из титана и стальной: масса диска из титанового сплава – 363 грамма, масса тормозного диска из стали – 556 грамм. Результаты взвешивания показали, что тормозной диск, выполненный из титанового сплава легче аналога из стали почти на 200 грамм.

В рамках подготовки к эксперименту, целью которого является определение работоспособности тормозных механизмов с тормозными дисками из титанового сплава, диски устанавливаются на заднюю ось автомобиля. В одну колодку на задней оси была установлена термопара (рис. 7). Данные измерений были запи-

саны с помощью электронного блока управления и сбора информации Motec.

В качестве инструмента оценки температуры тормозного диска используется тепловизор FLIR A615 для наглядной визуализации распределения температурный полей по поверхности диска. Тепловизор отличается высокой температурной чувствительностью, что позволяет получать точные изображения и сведения о малейших температурных изменениях [5].

В ходе первых испытаний было установлено, что после 1-го торможений температура диска доходила до 120–140 °С, температура колодки до 210 °С. Предельные же значения по температурам: диск – 265 °С, колодка – 320 °С. Термограмма тормозного диска приведена на рис. 8. Также в процессе работы тормозных механизмов наблюдалось возгорание титановой пыли. В результате проведенных тестов тормозные колодки стерлись полностью (рис. 9).

Результаты замера толщин тормозных дисков по окончании тестов приведены в таблице 4.

Результаты натурного испытания показали, что расчетная температура незначительно отличается от экспериментальной, что подтверждает адекватность результатов методики расчета результатам эксперимента.

Таблица 3

Результаты замера значений параметров колодок и диска

	Левая полуось	Правая полуось
Замер величин толщины тормозного диска, мм		
Замер № 1	4,352	4,954
Замер № 2	4,531	4,950
Замер № 3	4,374	4,787
Замер № 4	4,577	4,746
Средняя значение толщины, мм	4,458	4,859
Замер величин толщины колодки, мм		
Замер № 1	4,368	3,938
Замер № 2	4,250	4,018
Средняя значение толщины, мм	4,309	3,978



Рис. 7. Крепление термопары к колодке

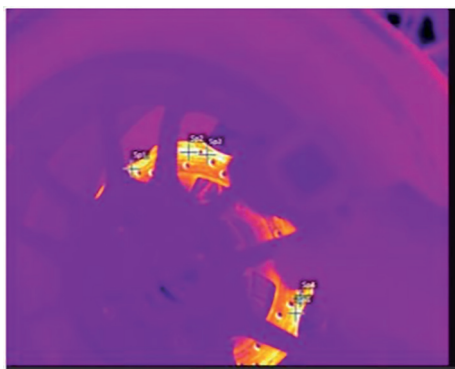


Рис. 8. Термограмма разогретого тормозного диска



Рис. 9. Тормозные колодки после испытаний

Таблица 4

Результаты замеров тормозных дисков после натурального эксперимента

	Левая полуось	Правая полуось
Замер величин толщины тормозного диска, мм		
Замер № 1	4,000	4,484
Замер № 2	3,866	4,547
Замер № 3	3,910	4,388
Замер № 4	3,843	4,453
Средняя значение толщины, мм	3,904	4,468

### Результаты

Разработана методика теплового анализа тормозного диска путем применения метода конечных элементов с учетом изменения коэффициента конвекции и теплового потока.

Разработана методика обработки торцов диска из титанового сплава.

Разработана методика натурального эксперимента для оценки тепловых и прочностных свойств тормозного диска.

### Выводы

Разработанная методика теплового анализа дает адекватные эксперименту результаты определения температуры тормозного диска. Погрешность составляет не более 13 %. Натурное испытание тормозных дисков из титанового сплава показало, что быстрое изнашивание колодок говорит о непригодности фрикционного материала для совместного использования с диском из титанового сплава и о недостаточной твердости рабочей поверхности диска. Для улучшения полученных результатов предлагается разработать более совершенный метод обработки поверхности тормозного диска из титана, включающий повышение твердости применением термообработки и напыления материалов.

### Литература

1. Проектирование полноприводных колесных машин: в 3 т. Учеб. Для вузов / Б.А. Афанасьев [и др.]; Под общ. редакцией д-ра техн. наук, проф. А.А. Полунгяна, издательство МГТУ им. Баумана, 2008.
2. AP Racing, 2018 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.apracing.com> (дата обращения: 5.06.18)
3. Rudolf Limpert. Brake design and safety, Third edition: SAE International, 2011. 432 p.
4. ГОСТ Р 41.13 – Н – 99. (Правила ЕЭК ООН N 13-Н) Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения легковых автомобилей в отношении торможения. М.: ФГУП «Стандартинформ», 1999. 113 с.
5. FLIR® Systems, Inc, 2018 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.flir.ru> (дата обращения 10.06.18)
6. Motul, 2018 [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.motul.com> (дата обращения 11.02.18).

### References

1. *Proektirovanie polnoprivodnyh kolesnyh mashin* [Design of all-wheel drive vehicles]: v 3 t. Ucheb. Dlya vuzov / B.A. Afanas'ev [i dr.]; Pod obshch.

- redakciej d-ra tekhn. nauk, prof. A.A. Polungyana. Moscow, Izdatel'stvo MGTU im. Baumana Publ., 2008.
2. AP Racing, 2018 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.apracing.com> (accessed: 5.06.18)
  3. Rudolf Limpert. Brake design and safety, Third edition: SAE International, 2011. 432 P.
  4. GOST R 41.13 – N – 99. (Pravila EEHK OON N 13-N) Edinoobraznye predpisaniya, kasayushchiesya oficial'nogo utverzhdeniya legkovykh avtomobilej v otnoshenii tormozheniya [Uniform provisions concerning the approval of passenger vehicles with regard to braking]. Moscow: FGUP «Standartinform» Publ., 1999. 113 p.
  5. FLIR® Systems, Inc, 2018 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.flir.ru> (accessed 10.06.18)
  6. Motul, 2018 [Электронный ресурс] URL: <https://www.motul.com> (accessed 11.02.18).

## CALCULATED AND EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF THE BRAKE DISC MADE OF TITANIUM ALLOY

V.P. Eremin, M.G. Komarova, Ph.D. G.P. Eremin

Bauman MSTU, Moscow, Russia

[eremingeorgy@mail.ru](mailto:eremingeorgy@mail.ru)

*The aim of the work is to reduce the unsprung weight of the wheel of a racing automobile due to the use of a disc made of titanium alloy in the brake mechanism. The object of the study is the brake disc of a vehicle of the Formula Student class. The subject of research is the use of titanium alloy in the design of the brake disc and its performance evaluation. As part of the work, an analysis of the thermal loading of the brake disc made of titanium alloy and the experimental verification of its performance were made. The calculations of thermal loading were carried out by the finite element method. To this end, a calculation method has been developed taking into account changes in the heat flux and convection coefficient during multiple braking. The paper presents the results obtained when carrying out calculations in accordance with this method. The numerical evaluation showed that the temperature arising in the brake mechanism does not exceed the permissible for the working capacity of the brake mechanism. The full-scale experiment showed that the calculated disk temperature, which occurs during braking, is close to the temperature established during the full-scale experiment. The error is not more than 13 %. A full-scale experiment showed that the brake disc made of titanium alloy is not operational with the selected manufacturing technology.*

*The conclusions were drawn on the applicability of the above method of thermal analysis of the brake disc, on the performance of the structure, and proposals were made for improving its efficiency.*

**Keywords:** brake system, titanium alloy brake disk, brake test bench.