

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 620.178.16/625.08

doi: 10.30987/2782-5957-2026-4-26-32

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНАШИВАНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНОГО НАКОНЕЧНИКА РЕЗЦА ДОРОЖНОЙ ФРЕЗЫ

Михаил Геннадьевич Шалыгин^{1✉}, Гаджи Хирасухмаевич Рамазанов², Анна Павловна Ващишина³

^{1,2,3} Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

¹ migshalygin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8102-9918>

² tts-dm@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

³ vashhi.anya@yandex.ru, <https://orcid.org/0002-1930-3912>

Аннотация

Проведено моделирование процесса изнашивания режущего инструмента – твердосплавных наконечников резцов дорожной фрезы. Теоретической основой моделирования являлись теория абразивного изнашивания Дж. Арчарда и теория резания (фрезерования). Осуществлена верификация модели по результатам стендовых испытаний на стенде, имитирующем работу барабана дорожной фрезы. Испытания проводились на асфальтобетон-

ной смеси, содержащий, как основной абразив, гранит Микашевича 1400. В качестве связующего элемента выступало органическое вяжущее БНД 70/100. Сравнение результатов расчета по модели и результатов испытаний показали незначительные отличия на рассматриваемом пути трения.

Ключевые слова: фреза, наконечник, резец, износ, гранит, моделирование.

Ссылка для цитирования:

Шалыгин М.Г. Моделирование изнашивания твердосплавного наконечника резца дорожной фрезы / М.Г. Шалыгин, Г.Х. Рамазанов, А.П. Ващишина // Транспортное машиностроение. – 2026. - № 4. – С. 26-32. doi: 10.30987/2782-5957-2026-4-26-32.

Original article

Open Access Article

WEAR MODELING OF CARBIDE TIP OF THE ROAD HARROW CUTTER

Mikhail Gennadievich Shalygin^{1✉}, Haji Hirasukhmaevich Ramazanov², Anna Pavlovna Vashchishina³

^{1,2,3} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

¹ migshalygin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8102-9918>

² tts-dm@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

³ vashhi.anya@yandex.ru, <https://orcid.org/0002-1930-3912>

Abstract

The wear of the cutting tool such as the carbide tips of the road harrow cutters is modeled. The theoretical basis for modeling was the theory of abrasive wear by J. Archard and the theory of cutting (milling). The model was verified based on the results of bench tests on a stand simulating the operation of a road harrow cutter drum. The tests were carried out on an asphalt-

concrete mixture containing, Mikashevich 1400 granite as the main abrasive. The binding element was the organic binder BND 70/100. A comparison of the model calculation results and the test results showed minor differences on the friction path under consideration.

Keywords: milling cutter, tip, cutter, wear, granite, modeling.

Reference for citing:

Shalygin MG, Ramazanov HH, Vashchinina AP. Wear modeling of carbide tip of the road harrow cutter. Transport Engineering. 2026;4:26-32. doi: 10.30987/2782-5957-2026-4-26-32.

Введение

Анализ данных о влиянии режимов эксплуатации и внешних условий изнашивания на устойчивость материалов к абразивному воздействию при разрушении гранитных частиц в монолитной связке сопряжено с серьезными трудностями. Основная проблема заключается в том, что существующие методы трактуют фрезерование асфальтобетонного покрытия как процесс резания материала с образованием стружки. Однако фрезерование асфальтобетона поворотными резцами по своей природе представляет собой внедрение инструмента в монолитный слой, который состоит из битумно-минеральной связки и гранитных абразивных частиц. В ходе взаимодействия рабочего органа с частицами последние освобождаются от связки, формируя разрыхленную массу. Таким образом, ключевая особенность этого вида обработки – механизм удаления гранитных частиц из монолитной связки путём разрыхления.

Барабан дорожной фрезы с резцами относится к быстроходным рабочим органам с высокими скоростями обработки асфальтобетона. При увеличении линейной скорости относительного перемещения и угловой скорости вращения фрезы растут затраты мощности и усиливается износ рабочих инструментов.

К ключевым внешним условиям изнашивания, существенно влияющим на разрушение резца дорожной фрезы, отно-

сятся физико-механические свойства асфальтобетона. Скорость изнашивания пропорциональна давлению: чем оно выше, тем быстрее изнашивается инструмент. И.А. Тер-Азарьев уточнил, что с увеличением подачи износ инструмента (на единицу пути трения) растёт, причём разница в абсолютных значениях становится заметнее для более прочных пород [1]. По данным [2], наибольшее влияние на износ оказывают твёрдость и нагрузка. Однако эффект взаимодействия, особенно при высоких удельных нагрузках, остаётся неясным, что создаёт противоречия в модели.

Анализ имеющихся данных показывает: с ростом скорости относительного перемещения и давления изнашивающей среды интенсивность изнашивания резцов увеличивается, причём зависимость носит преимущественно линейный характер. Однако отсутствуют сведения о влиянии этих факторов, а также прочности дорожного слоя, на износ конусообразных вращающихся резцов при фрезеровании асфальтобетона. Это подчёркивает необходимость исследований для выявления закономерностей воздействия внешних условий (скорости перемещения инструмента, давления изнашивающей среды, прочности асфальтобетона и температуры окружающей среды) на износостойкость резцов дорожной фрезы.

Модель процесса изнашивания

Износ наконечника резца определяется характеристиками резания, свойствами наконечника и асфальтобетонной смеси. Учитывая тот факт, что щебень в асфальтобетонной смеси выступает в качестве абразива можно предположить осуществление абразивного механизма изнашивания. В этом случае общепринятой является зависимость, полученная Дж. Арчардом

$$V = \frac{KPL}{H}, \quad (1)$$

где V – объём изношенного материала; K – безразмерный коэффициент износа (определяется экспериментально, характеризует

склонность материала к износу); P – нормальная нагрузка; L – путь трения; H – твёрдость более мягкого материала.

Предположим, что износ наконечника резца можно охарактеризовать изменением изношенного объёма V , так как изменение объёма влияет на форму наконечника и, как следствие, на качество среза, что является одним из условий замены резца на барабанной фрезе. Тогда интенсивность изнашивания наконечника

$$I_V = \frac{V}{A_a L}, \quad (2)$$

где V – изменение объёма изношенного

материала; A_a – номинальная площадь контакта; L – путь трения.

Таким образом, необходимо определить объем изношенного материала твердосплавного наконечника по (1). Однако, данное выражение, в первую очередь, характеризует износ более мягкого материала, тогда как в случае с наконечником резца его твердость значительно превосходит твердость щебня. Кроме того, общеизвестным является тот факт, что модель Арчарда не адекватна при абразиве более 2 мм. Таким образом, необходимо учитывать как критерии абразивного изнашивания, так и положения теории резания. Следовательно, целесообразным явля-

ется переход от объема изношенного материала к его массе.

Предполагается, что нормальная нагрузка в (1) это сила, прижимающая поверхности друг к другу. В случае режима резания данная сила будет состоять из отношения нормальной силы F_n к силе резания $F_{рез}$. Одной из важных характеристик асфальтобетонной смеси влияющий на ее износ при ее резании является ее твердость, тогда предположим, что в (4.1) переменная H характеризуется относительной твердостью – отношением более твердого материала к более мягкому, тогда (1) для изнашивания наконечника резца примет вид

$$\Delta m = V \cdot \rho_{см} = K \frac{HRA_p F_{рез} L}{HRA_{гр} F_n} \rho_{см}, \quad (3)$$

где HRA_p – твердость наконечника резца; $HRA_{гр}$ – твердость асфальтобетонной смеси.

Коэффициент K в таком случае должен характеризовать условия резания и

условия изнашивания. Откуда предполагая, что коэффициент численно равен произведению характеристик изнашивания и характеристик осуществления условий резания $K = K_{изн} \cdot K_{рез}$ тогда

$$\Delta m = K_{изн} K_{рез} \frac{HRA_p F_{рез} L}{HRA_{гр} F_n} \rho_{см}. \quad (4)$$

Необходимым условием осуществления изнашивания в трибологии является наличие процесса трения, который характеризуется силой трения. В настоящем случае сила трения равна произведению коэффициенту трения на нормальную нагрузку $F_{тр} = f F_n$. Со стороны асфальтобетонной смеси уравновешивать силу трения и коэффициент абразивности должна прочностная характеристика щебня, тогда $K_{изн} = \frac{F_{тр} \alpha}{\sigma}$, откуда

$$\Delta m = K_{рез} \frac{HRA_p F_{рез} L \alpha \rho_{см}}{HRA_{гр} \sigma} f. \quad (5)$$

Силу резания определим по общему выражению для силы резания при фрезеровании [3]

$F_{рез} = C_p t S v K_p$, (6) где C_p – коэффициент, зависящий от свойств материала; t – глубина резания; S – подача; v – скорость резания; K_p – суммарный поправочный коэффициент.

Учитывая абразивный механизм изнашивания коэффициент $K_{рез}$ определим как произведение сопротивления резанию со стороны асфальтобетонной смеси. Учитывая абразивный механизм изнашивания, характеризовать изнашивание будет коэффициент абразивности α , а податливость смеси – пористость ее минерального остатка λ . Тогда $K_{рез} = \alpha \lambda$, откуда

$$\Delta m = f \frac{HRA_p F_{рез} L \rho_{см} \alpha^2}{HRA_{гр} \sigma \lambda^{1,75}}. \quad (7)$$

Верификация модели процесса изнашивания

Верификацию модели проведем по результатам стендовых испытаний [4, 5]. При резании коэффициент трения можно определить как тангенс суммы угла

направления равнодействующей силы передней грани резца и переднего угла режущего инструмента [6]

$$f = tg(\omega + \gamma). \quad (8)$$

Здесь ω - угол направления равнодействующей силы передней грани резца; γ - передний угол режущего инструмента. Исходя из решения геометрической задачи резания угол $\omega = 52^\circ$, $\gamma = -42^\circ$. Откуда, коэффициент трения $f = 0,648$.

Твердость резца измерялась на твердомере по методу Роквелла и составила $HRA_p=67$. Твердость асфальтобетонной смеси определяется свойствами твердости щебня, в рассматриваемом случае гранита, и прочностными свойствами связующей битумной мастики. Твердость гранита, согласно литературным источникам, находится в пределах 6,5-7 по шкале Мооса, что приближенно соответствует твердости по шкале Роквелла $HRA_p = 84$. При этом связующими свойствами битума пренебрегаем.

При определении силы резания для расчетов по условиям эксперимента примем максимальную глубину резания $t = 150$ мм, коэффициент $C_p = 261$ на основании табличных данных [3], подача при испытаниях составила $S = 0,2$ м/мин, скорость резания определяли исходя из скорости вращения барабана с резцами $v = 372$ об/мин. В литературных источниках присутствуют значения суммарного поправочного коэффициента для фрезерования металлов в диапазоне $K_p = 0,87...1,1$. Так как не представляется возможным определить суммарный поправочный коэффициент для фрезерования гранита принят равным $K_p = 1$. Тогда, сила резания по выражению (6) равна $F_{рез} = 2912,76$ Н.

По Л.И. Барону и А.В. Кузнецу критерием абразивности горной породы считается потеря в весе стержня (в мг) за 10 мин. Стержень вращается с помощью специально приспособленного сверлильного станка при осевой нагрузке 15 кг и скорости вращения 400 об/мин. В литературе существуют таблицы для определения абразивности породы исходя из ее месторождения и размера фракций. Так абразивность гранита Микашевича с размером фракция 5-20 составляет $\alpha = 46...65$. В расчетах примем среднее значение $\alpha = 55$.

Основными параметрами работы инструмента при разрушении асфальто-

го бетона являются [2]: t - заглубление, v - скорость относительного перемещения резца, T - время обработки, $A_{асф}$ - площадь удаленного асфальтового бетона. Характерной особенностью процесса разрушения асфальтобетона является периодичность работы резцов фрезы, переменная площадь удаляемого слоя одним резцом, а также непостоянное число резцов, одновременно находящихся в работе, что вызывает переменное значение сил, моментов и мощности, необходимых для осуществления обработки [2]. Поэтому вывод зависимостей при разрыхлении и удалении асфальтовых покрытий производился для одного резца на основании средних значений сил, моментов и мощности [2]. Суммарная длина пути одного резца, пройденного в асфальтовом бетоне, можно определить из общего выражения [2]:

$$L_{рез} = LnT, \quad (9)$$

где L - длина пути резца, пройденного за один оборот барабана фрезы в асфальтобетонном покрытии

Тогда переходя к площади $A_{асф}$ выработанного покрытия суммарная длина пути резца определяется [2]:

$$L = \frac{A_{асф}}{6} \arccos\left(1 - \frac{t}{R}\right), \quad (10)$$

где R - радиус барабана фрезы.

Расчет пути трения, пройденный резцом в процессе испытаний, проводился по выражению (10). Однако, так как в процессе испытаний, в отличии от условий эксплуатации, резание асфальтобетонного покрытия происходит с вертикальным перемещением, тогда путь трения для различных условий заглубления будет отличаться. Расчет проводился по шести положениям заглубления резца 25, 50, 75, 100, 125, 150 мм, далее строился аппроксимирующий график (рис. 1).

Так как в процессе испытаний исследования проводили на трех коробах асфальтобетонной смеси глубиной 150 мм каждый, то при расчете пути трения принимали максимальную глубину резания 150 мм и экстраполировали значения до глубины 450 мм (табл.) [7].

На рис. 2 приведен график зависимости износа от пути трения и заглубления по данным таблицы.

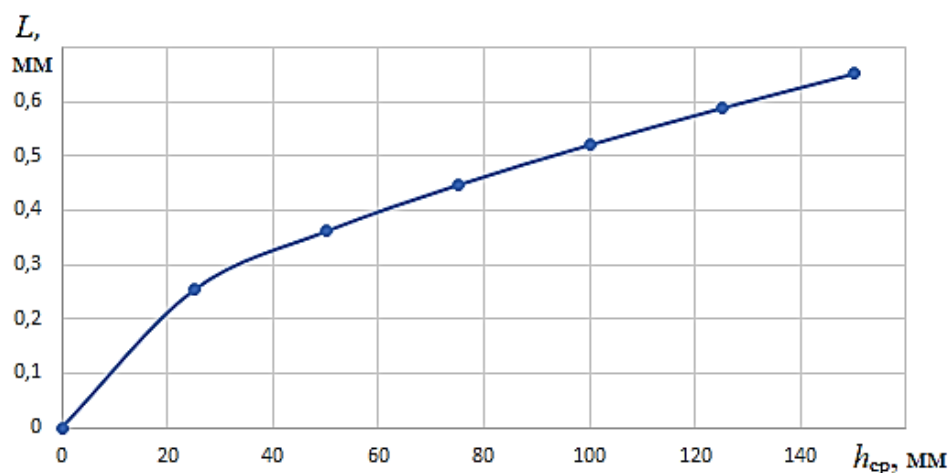


Рис. 1. Зависимость пути трения от заглубления резца за один оборот барабана
 Fig. 1. Dependence of the friction path on the deepening of the cutter in one turn of the drum

Таблица

Результаты испытаний на износ

Table

Wear test results

Глубина резания, мм	Расчетный путь трения, м	Износ, г
0	0	0
150	2,76478	5,7
300	5,52956	12,5
450	8,294341	18,2

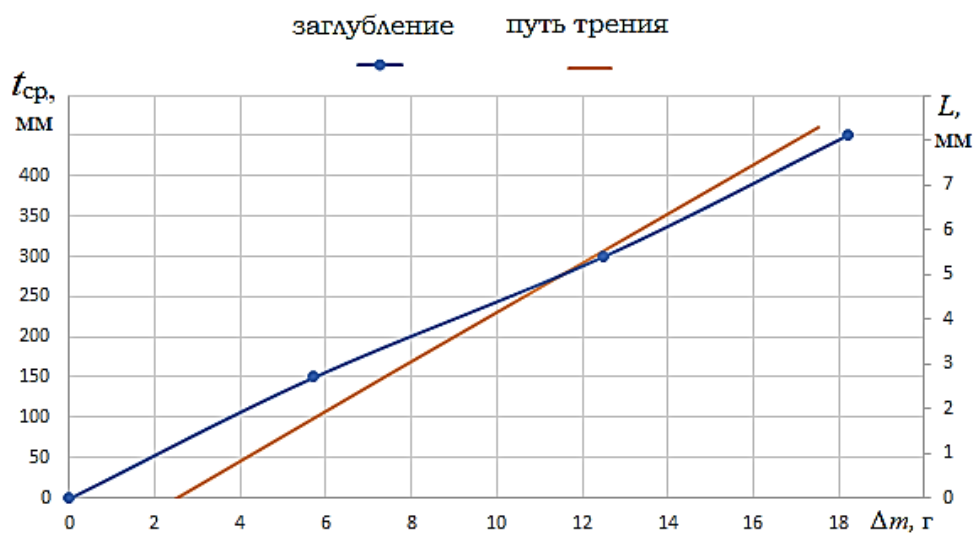


Рис. 2. Зависимость заглубления и пути трения от износа
 Fig. 2. Dependence of the deepening and the friction path on wear

Анализ рис. 2 позволяет подобрать рациональные соотношения заглубления и пути трения к износу наконечников резцов. Прочность смеси определяли по результатам испытаний, в случае с рассматриваемой смесью $\sigma = 2,1$ МПа. Плотность гранита, которая по литературным источ-

никам $\rho_{гр} = 1,35$ г/см³. Результаты верификации модели приведены на рис. 3. Как видно из рисунка расхождение модели и результатов эксперимента являются незначительными за рассматриваемый путь трения.

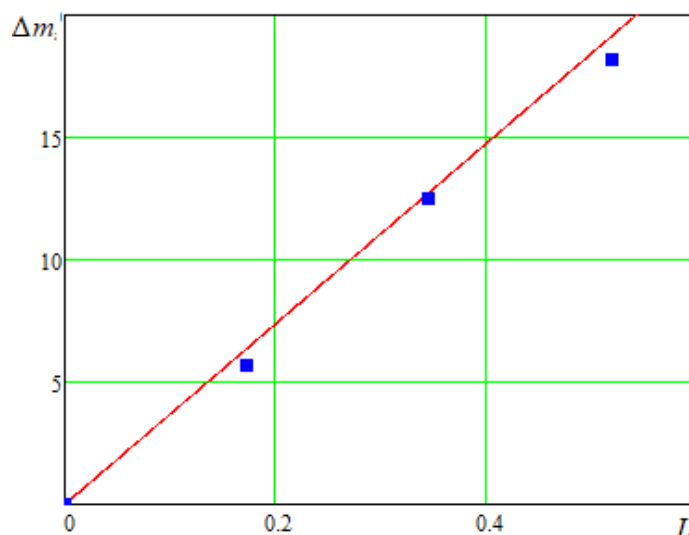


Рис. 3. Сопоставление модели и эксперимента
Fig. 3. Comparison of the model and experiment

Выводы

Износ наконечника резца определяется комплексом факторов: характеристиками резания (глубина, скорость, подача), свойствами самого наконечника и параметрами асфальтобетонной смеси. Также необходимо учитывать как критерии абразивного изнашивания, так и положения теории резания. Предложенная модель изнашивания, разработанная на основе тео-

рии Дж. Арчарда для абразивного изнашивания включает в себя параметры теории резания. Верификация модели проведена на основе стендовых испытаний. Таким образом, разработанная модель позволяет количественно оценить износ наконечника резца при фрезеровании асфальтобетона, учитывая как абразивные, так и реологические аспекты процесса.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тер-Азарьев И.А. Основные закономерности износа режущего инструмента. - Сб. трудов Армянского института стройматериалов и сооружений. Ереван, 1959, вып. 1. С. 203-240.
2. Попов С.Н., Антонюк Д.А. Методика производственных испытаний материалов резца дорожной фрезы в условиях изнашивания закрепленным абразивом // Нові матеріали та технології в металургії та машинобудуванні, 2007. № 2. С. 155-162.
3. Справочник технолога / под общей ред. А.Г.Суслова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.
4. Шалыгин, М.Г. Обеспечение износостойкости резца дорожной фрезы / М.Г. Шалыгин, Г.Х. Рамазанов // Интеллектуальная трибология в машиностроении: BAL T TRIBO 2025: сборник статей Всероссийской с международным уча-

стием научной конференции, Санкт - Петербург, 19–20 июня 2025 года. Санкт - Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. С. 56-60. DOI 10.18720/SPBPU/2/id25-46. EDN FMAQOR.

5. Рамазанов Г.Х. Износ инструмента дорожной фрезы и модели эффективности резания // Научно-технические технологии в машиностроении. №1. 2023. С. 42-48.
6. Кабалдин Ю.Г., Башков А.А., Иванов С.В., Замураев И.Д. Нейронносетевое моделирование процессов трения при резании // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2023. № 19. С. 52-58
7. Шалыгин М.Г., Горленко А.О., Рамазанов Г.Х., Болдырев Д.А. Уменьшение пористости изделий порошковой металлургии лазерным излучением // Сталь. 2026. №. 1. С. 41-45.

REFERENCES

1. Ter-Azariev IA. Basic patterns of cutting tool wear. Collection of Proceedings of the Armenian Institute of Building Materials and Structures. Yerevan: 1959;1:203-240.

2. Popov SN, Antonyuk DA. Methods of production testing of road milling cutter materials under conditions of wear with a fixed abrasive. New Materials

- and Technologies in Metallurgy, Mashinobuduvann. 2007;2:155-162.
- Suslov AG, editor. Technologist's handbook. Moscow: Innovatsonnoe Mashinostroenie; 2019.
 - Shalygin MG, Ramazanov GH. Ensuring the wear resistance of a road harrow cutter. Collection of Papers of All-Russian Scientific Conference with International Participation, June 19-20, 2025: Intelligent Tribology in Mechanical Engineering: BALTRIBO 2025; Saint Petersburg: POLYTECH PRESS; 2025. DOI 10.18720/SPBPU/2/id25-46.
 - Ramazanov GH. Tool degradation of the road harrow and cutting efficiency models. Science Inten-

sive Technologies in Mechanical Engineering. 2023;1:42-48.

- Kabaldin YuG, Bashkov AA, Ivanov SV, Zamuraev ID. Neural network modeling of friction processes during cutting. Transport, Mining and Construction Engineering: Science and Production. 2023;19:52-58.
- Shalygin MG, Gorlenko AO, Ramazanov GK, Boldyrev DA. Reduction of porosity of powder metallurgy products by laser radiation. Stal. 2026;1:41-45.

Информация об авторах:

Шалыгин Михаил Геннадьевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «ТиТТС», тел. +7 (4832) 58-82-12.

Рамазанов Гаджи Хирасухмаевич – аспирант кафедры «ТиТТС», тел. +7 (4832) 58-82-12.

Shalygin Mikhail Gennadievich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Turbine Engineering and Pipeline Transport Systems; phone: +7 (4832) 58-82-12.

Ramazanov Haji Hirasukhmaevich – Postgraduate student of the Department of Turbine Engineering and Pipeline Transport Systems; phone: 8 (4832) 58-82-12.

Вашишина Анна Павловна – кандидат технических наук, доцент кафедры «ТиТТС», тел. +7 (4832) 58-82-12.

Vashchishina Anna Pavlovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Turbine Engineering and Pipeline Transport Systems; phone: +7 (4832) 58-82-12.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 03.03.2026; одобрена после рецензирования 24.03.2026; принята к публикации 27.03.2026. Рецензент – Измеров М.А., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета.

The article was submitted to the editorial office on 03.03.2026; approved after review on 24.03.2026; accepted for publication on 27.03.2026. The reviewer is Izmerov MA, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.