

Научная статья
УДК 625.089.21
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-2-204-216>
EDN: KLHYLT



ВЛИЯНИЕ ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО ЭЛЕМЕНТА ДОРОЖНОЙ ФРЕЗЫ НА СИЛУ СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕЗАНИЮ АСФАЛЬТОБЕТОНА

Д. В. Фурманов, Л. М. Шамахов*, Н. Э. Лысаков
Ярославский государственный технический университет,
г. Ярославль, Россия
<http://orcid.org/0000-0002-6932-6477>, denis_furmanov@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0001-7559-282X>, leonid.shamakhov@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0001-6646-7947>, nik.lysakov.1997@mail.ru
*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. В данной статье приведены результаты исследования влияния износа твердосплавного наконечника режущего элемента дорожной фрезы на возникающую силу сопротивления резанию при фрезеровании асфальтобетонных. Актуальность работы обусловлена недостаточным количеством информации о влиянии износа на силу сопротивления резанию, поэтому прогнозировать изменения нагрузок на рабочем органе фрезерных машин в процессе её работы с изношенными режущими элементами не является возможным.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования проводились с целью определения силы сопротивления резанию, возникающей в процессе фрезерования асфальтобетона с максимальным размером минерального заполнителя 16 мм, используемого для верхнего слоя покрытия и для дорог с нормальными условиями движения (А16вн) в зависимости от толщины срезаемой стружки и степени (процента) износа режущего элемента. Для проведения исследования был использован маятниковый стенд, наиболее подходящий для изучения взаимодействия единичного режущего элемента дорожной фрезы с асфальтобетоном.

Результаты. В результате проведения экспериментальных исследований удалось получить данные, которые могут быть использованы для обоснования выбора интервала замены режущих элементов в процессе эксплуатации фрезерного оборудования, что в перспективе приведёт к повышению производительности оборудования и срока его эксплуатации. Достигнутые результаты позволяют корректировать ранее полученные математические модели и методики расчетов фрезерных машин с учетом степени (процента) износа режущих элементов.

Обсуждение и заключение. Проведенные исследования позволили определить зависимости силы сопротивления резанию от процента износа режущего элемента и толщины срезаемой стружки. Вместе с тем следует отметить, что на практике необходимо задавать дополнительные запасы прочности при конструировании элементов фрезерной машины с учетом износа режущего элемента.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: экспериментальные исследования, асфальтобетон, барабан фрезерный, сила сопротивления резанию, стенд маятникового типа, толщина срезаемой стружки, износ режущего элемента, математическая модель

Статья поступила в редакцию 24.03.2023; одобрена после рецензирования 19.04.2023; принята к публикации 21.04.2023.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Фурманов Д. В., Шамахов Л. М., Лысаков Н. Э. Влияние износа режущего элемента дорожной фрезы на силу сопротивления резанию асфальтобетона // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 2 (90). С. 204-216. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-2-204-216>

© Фурманов Д. В., Шамахов Л. М., Лысаков Н. Э., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-2-204-216>

EDN: KLHYLT

WEAR OUT EFFECT FOR CUTTING ELEMENT OF MILLING MACHINE ON ASPHALT CONCRETE CUTTING STRENGTH

Denis V. Furmanov, Leonid M. Shamakhov, Nikita E. Lysakov

Yaroslavl State Technical University,

Yaroslavl, Russia

<http://orcid.org/0000-0002-6932-6477>, denis_furmanov@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0001-7559-282X>, leonid.shamakhov@yandex.r

<http://orcid.org/0000-0001-6646-7947>, nik.lysakov.1997@mail.ru

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. This article presents the results of a study of the wear out effect the carbide tip for the cutting element of a milling machine on the resulting cutting strength when milling asphalt concrete. The relevance of the work is due to insufficient information about the wear out effect on the strength of cutting resistance, and, consequently, it is not possible to predict changes in loads on the working body of milling machines during its operation with worn cutting elements.

Materials and methods. The experimental studies to determine the cutting resistance force that occurs during the milling of asphalt concrete with a maximum mineral aggregate size of 16 mm. used for the top layer of the coating and for roads with normal traffic conditions (A16vn), depending on the thickness of the chip being cut and the degree (percentage) of wear of the cutting element were carried out. To conduct the study, a pendulum stand, which is most suitable for studying the interaction of a single cutting element of a road milling cutter with asphalt concrete, was used.

Results. As a result of experimental studies, it was possible to obtain the data allowing a reasonable approach to the choice of the interval of replacement of cutting elements during the operation of milling equipment, which, in future, will lead to an increase in the productivity of equipment and its service life. The achieved results make it possible to adjust previously obtained mathematical models and calculation methods of milling machines, taking into account the degree (percentage) of wear of cutting elements.

Discussion and conclusions. The conducted studies make possible to determine the dependence of the cutting strength on the percentage of wear of the cutting element and the thickness of the chip being cut. At the same time, it can be concluded that in practice it is necessary to set additional safety margins when designing elements of a milling machine, taking into account the wear of the cutting element.

KEYWORDS: experimental studies, asphalt concrete, milling drum, cutting strength, pendulum-type stand, chip thickness, wear of the cutting element, mathematical model

The article was submitted 24.03.2023; approved after reviewing 19.04.2023; accepted for publication 21.04.23.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Furmanov Denis V., Shamakhov Leonid M., Lysakov Nikita E. Wear out effect for cutting element of milling machine on asphalt concrete cutting strength. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (2): 204-216. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-2-204-216>

© Furmanov D. V., Shamakhov L. M., Lysakov N. E., 2023



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

При ремонте или полном демонтаже асфальтобетонного покрытия автомобильных дорог, тротуаров и взлетно-посадочных полос аэродромов применяют дорожные фрезы. Неотъемлемой частью дорожно-фрезерного оборудования являются режущие элементы, расположенные на рабочем органе – фрезерном барабане. Совершенно естественно, что при эксплуатации фрезерной машины будет происходить износ режущего элемента. В свою очередь причинами для износа резца являются: неправильный выбор режима работы фрезерной машины, несвоевременная очистка от налипшего асфальтобетона, недостаточная подача воды системой орошения фрезерного барабана, неправильный выбор режущего элемента, особенности асфальтобетона¹. Таким образом, по мнению авторов, с повышением степени износа проявляется потеря производительности, повышаются нагрузки на фрезерный барабан, эффективность оборудования снижается. Износ твердосплавного наконечника неизбежен при эксплуатации дорожно-фрезерного оборудования, но на этапе конструирования и создания новых фрезерных машин необходимо учитывать повышение нагрузок, действующих на режущие элементы рабочего оборудования в процессе фрезерования. Однако здесь возникает вопрос: как сила сопротивления резанию будет изменяться с увеличением степени износа твердосплавного наконечника режущего элемента?

Вопросами износа режущих элементов занимались многие ученые. Накопленный ими опыт позволяет количественно и качественно описать различные показатели процесса фрезерования, возникающие при работе дорожных фрез.

Так, в работе Н. Д. Селиверстова² рассматривается влияние износа режущих элементов на профиль формируемой поверхности. Автор утверждает, что за счет меньшего количества режущих элементов снижаются значения реактивных сил сопротивления резанию и возрастает максимально возможная рабочая скорость и глубина фрезерования, что, в свою очередь, обеспечивает меньший износ режущих элементов на единицу производительности, а так-

же при фрезеровании поверхности рабочим органом с различными показателями износа режущих элементов не формируется требуемый профиль остаточной поверхности. К сожалению, автор не приводит данных об изменении нагрузок на режущие элементы дорожной фрезы при взаимодействии изношенных режущих элементов с асфальтобетоном, поэтому предусмотреть необходимый запас прочности и мощности при проектировании фрезерной машины не является возможным. Вероятно, такая задача и не ставилась перед исследователем. Представленные результаты указывают на то, что для получения требуемого профиля и достижения необходимого качества отфрезерованной поверхности большую роль играет выбор типа фрезерного барабана и режима работы в зависимости от условий эксплуатации, а также обеспечение своевременной замены изношенных режущих элементов.

В работе А. М. Мухторова [1] приводятся результаты, полученные в ходе испытаний режущих элементов на износ в абразивной среде. Автор предлагает методику определения износа и ресурса режущих элементов дорожных фрез. По данной методике величина абразивного износа – это не что иное, как функция ряда переменных величин, а именно давление на поверхности трения, путь трения (резания), площадь трения (контакта), показатель изнашивающейся способности абразива, показатель степени закрепленности абразивных частиц в среде, показатель относительной твердости материала и абразива. В результате ученый пришел к выводу, что для повышения срока службы режущих элементов дорожных фрез следует не столько упрочнять наконечник, сколько увеличивать износостойкость корпуса резца. Однако судить об эффективности представленной методики трудно, поскольку работа не опирается на реальное значение силы сопротивления резанию, которое, несомненно, будет влиять на износ режущего элемента в большей или меньшей степени. Несмотря на это, полученные результаты можно использовать для определения своевременной оценки степени износа, что может гарантировать бесперебойное и эффективное проведение работ.

¹ Wirtgen Group. 2019. WIRTGEN Cold Milling Manual. Technol - ogyandApplication. 280 p

² Селиверстов Н. Д. Влияние режимов работы дорожных фрез и износа режущих элементов на профиль формируемой поверхности / Н. Д. Селиверстов // Интерстроймех – 2014: материалы Международной научно-технической конференции, Самара, 09–11 сентября 2014 года. Самара: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный архитектурно-строительный университет», 2014. С. 77 – 81. EDN SWUSRJ.

Работа С. Н. Попова [2] отображает влияние площади удаленного асфальтобетона на работоспособность резцов, установленных в разных участках барабана дорожной фрезы, а также разработанную математическую модель этого процесса. Автор выделяет следующие виды износа:

1. Переменно-постоянный или нормальный, при котором режущая кромка твердосплавного наконечника резца опускается от первоначального положения на 6–10 мм, что приводит к увеличению угла резания на 14–25°. Сравнение пяти групп изношенных резцов показывает, что 50–60% резцов, находящихся в центральной части фрезерного барабана, изнашиваются по такому характеру.

2. Скачкообразный характер износа резца наблюдается при попадании абразивных частиц между резцом и резцедержателем, что приводит к его заклиниванию и, как следствие, режущий элемент изнашивается в одной плоскости. Такой же характер наблюдается, когда наконечник попадает на металлические включения в асфальтобетоне, вследствие чего откалывается твердосплавная вставка. Всё это приводит к снижению эффективности фрезерования. Таким образом, из строя выходит примерно 12–15% режущих элементов.

3. Полого-убывающий характер износа наблюдается (14–17% от общего количества резцов), когда режущий элемент работает в высоковязких условиях, вследствие чего его корпус изнашивается быстрее твердосплавного наконечника. Поэтому корпус режущего элемента не может удерживать твердосплавный наконечник, и резец впоследствии разрушается.

К сожалению, в данной работе не приведена количественная оценка влияния износа режущих элементов дорожной фрезы на такие показатели, как удельная производительность и энергоёмкость. Однако значимость проведенных исследований для более подробного описания процесса износа режущего элемента трудно отрицать. Полученные данные можно использовать как основу для продолжения исследований в данной области.

Исследователи Daniela Maria Iovanas и Adela-Eliza Dumitrascu [3] в своей работе представляют оценку основных показателей надёжности двух типовых режущих элементов: первый изготовлен стандартным способом, а второй – с лазерной наплавкой металла на твердосплавный наконечник. Сравнительный анализ показал, что режущие элементы, изготовленные вторым способом, обладают более высокой надёжностью. Вместе с тем исследователи установили, что износ наконечников

режущих элементов начинает протекать быстрее спустя шесть часов эксплуатации. Это было вызвано самоблокировкой режущего элемента в корпусе резцедержателя. Однако для второго варианта режущего элемента износ все равно протекал с меньшей скоростью.

Работа ученого Sivilevičius Н. [4] отражает результаты экспериментально-полевых исследований, которые позволяют статистически определять и оценивать динамику износа режущего элемента дорожной фрезы двух разных производителей. Полученные данные показывают, что длина режущего элемента, диаметр твердосплавного наконечника и диаметр стального корпуса резца уменьшается пропорционально отфрезерованной поверхности асфальтобетонного покрытия.

В работе авторы Zaumanis М. и др. [5] провели экспериментальные исследования взаимодействия параметров дорожной фрезы и свойств асфальтобетона на четырех разных площадках. На каждой изменялись три параметра фрезерной машины: скорость перемещения (подача) оборудования, глубина фрезерования и частота вращения фрезерного барабана. Остальные параметры – тип покрытия, тип фрезерного барабана, тип машины – оставались неизменными. Результаты показали, что при большей глубине фрезерования и увеличении скорости движения (подачи) фрезерного оборудования происходит образование более крупных кусков асфальтобетона, а также при небольшой частоте вращения или малой глубине фрезерования размер куска асфальтобетона не зависит от скорости перемещения фрезерной машины.

Авторы Т. И. Аскарходжаев и Ш. А. Пирнаев [6] провели анализ интенсивности изнашивания различных частей режущих элементов дорожной фрезы. Исследователи утверждают, что наиболее достоверные данные по износостойкости резцов дорожных фрез можно получить на основании испытаний в условиях эксплуатации. Таким образом, авторы статьи, учитывая влияние множества факторов, разработали методику испытаний материалов корпуса резца. По результатам исследований авторы приводят зависимость производительности дорожной фрезы от глубины фрезерования и хода резца, а также проводят статистическую обработку результатов износа 1470 режущих элементов, из которой следует, что 63% режущих элементов подвергаются равномерному износу, при котором корпус резцов разрушается по мере износа наконечника. Порядка 19% режущих элементов подвергается износу в районе корпуса, что приводит к вы-

падению наконечника. Попадание абразивных частиц асфальтобетонного покрытия между режцедержателем и режущим элементом приводит к невозможности вращения, что в свою очередь приводит к неравномерному износу корпуса и откалыванию наконечника. Такому характеру разрушения соответствует около 13% исследуемых режущих элементов.

В работе авторов Boloz L и Bialy W [7] приводится обзор методов и испытательных стендов для испытаний режущих элементов, используемых для изучения процессов добычи полезных ископаемых, где решающее значение имеет сопротивление резанию или ход разрушения породы. Таким образом, авторы рекомендуют разрабатывать новые режущие элементы в следующем порядке: 1. Тестирование множества решений различных образцов с выбором нескольких лучших решений. 2. Тестирование режущих элементов на износ и сопротивление резанию. 3. Тестирование в реальных условиях. По словам авторов, такой подход значительно расширит объем проводимых исследований и позволит на постоянной основе тестировать возможность использования новых конструкций, материалов и покрытий, а также термомеханических процессов. Это позволит модернизировать и создавать новые инструменты не только для горнодобывающей индустрии, но и для дорожно-строительной отрасли.

В следующей работе [8] использованы методы математического анализа для изучения траектории движения дорожной фрезы и построения зависимости толщины резания от изменения угла наклона. Вместе с тем авторы провели полевые испытания, результаты которых показали, что толщина резания периодически изменяется с высокой частотой, а период определяется скоростью вращения фрезерного барабана и количеством режущих элементов, расположенных на нем.

Авторы работы [9] провели ряд экспериментов по вдавливанию для изучения процессов резания горных пород. Результаты исследования показали, что вязкость разрушения, модуль упругости и глубина резания оказывают значительное влияние на удельную энергию. Теоретический анализ и результаты экспериментальных исследований показали, что толь-

ко приблизительно 3% внешней работы режущего элемента способствует образованию новых поверхностей откалывания, в то время как большая часть энергии рассеивается при создании зоны дробления.

В работе [10] сравниваются методы механической обработки породы с точки зрения их эффективности, энергопотребления и долговечности используемых инструментов. Также авторы представляют решение для выбора метода в зависимости от типа обрабатываемого материала и параметров оборудования.

Работы [9, 10] являются хорошей методологической основой, так как процессы резания горных пород и дорожных асфальтобетонов схожи по своему принципу и способу разработки, поэтому наработки по данной теме в перспективе можно использовать для дальнейшего изучения поставленного вопроса.

Проанализировав представленные работы, можно прийти к выводу о том, что в них не отображены значения реальных нагрузок, действующих на режущие элементы дорожно-фрезерной машины при разработке асфальтобетонного покрытия. Однако работы по этому направлению необходимы для формирования общей методической базы, которая в дальнейшем позволит раскрыть процессы, связанные с фрезерованием асфальтобетонных покрытий более качественно.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводилось с целью экспериментального определения силы сопротивления резанию асфальтобетона в зависимости от степени износа твердосплавного наконечника режущего элемента и толщины срезаемой стружки. Данное исследование служит для решения основных задач конструирования новейших дорожно-фрезерных машин с учетом неизбежного возрастания нагрузок на рабочем органе при фрезеровании асфальтобетона изношенными режущими элементами.

Исследование рабочего процесса фрезерования асфальтобетонного покрытия было начато с взаимодействия одного режущего элемента дорожной фрезы с асфальтобетоном. Таким образом, для проведения исследований наиболее подходит маятниковый стенд³,

³ Шамахов Л. М. Особенности использования маятникового стенда для изучения процессов резания дорожно-строительных материалов / Л. М. Шамахов, Н. Э. Лысаков // Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных: Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Омск, 10–11 февраля 2022 года. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2022. С. 38 – 42. EDN UQCRIP.

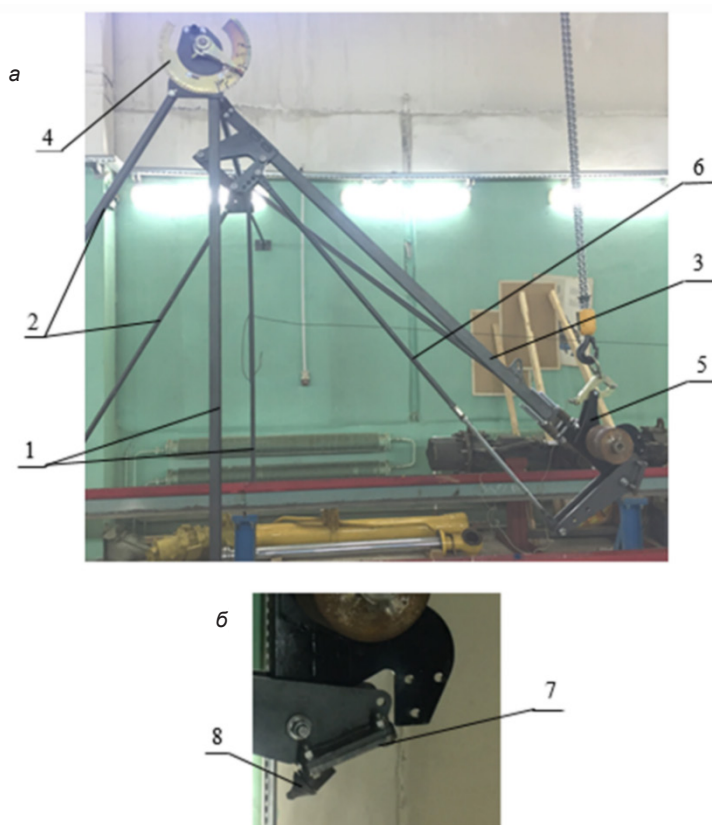


Рисунок 1 – Стенд маятникового типа: а – рама; б – резцедержатель:
1 – опора, 2 – растяжка, 3 – рычаг, 4 – лимб, 5 – регулируемый рычаг,
6 – система рычагов, 7 – установочная площадка, 8 – режущий элемент
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Pendulum type stand: a – frame; b – cutter holder.
1 - pillar, 2 – stretching, 3 – lever, 4 – limb, 5 – adjustable lever, 6 – lever system,
7 – mounting pad, 8 – cutting element
Source: compiled by the authors.

позволяющий определять энергетические и силовые характеристики процесса резания и наиболее полно соответствующий задачам моделирования процессов фрезерования и динамического разрушения асфальтобетона. Стенд маятникового типа наиболее схож по своему строению и принципу действия с маятниковым копром⁴ для определения ударной вязкости металла и с копром для определения сил, возникающих в процессе разработки торфяной залежи⁵.

Маятниковый стенд (рисунок 1) представляет собой конструкцию, состоящую из опор

1, которые жестко зафиксированы на фундаменте при помощи дополнительных растяжек 2. На опорах в подшипниках качения установлен маятниковый рычаг 3. Лимб 4 позволяет фиксировать угол отклонения маятника, а также максимальный угол отклонения после удара. На дополнительный регулируемый рычаг 5 устанавливается площадка под различные виды режущих элементов. Для изменения угла входа режущего элемента в асфальтобетон установлена система рычагов 6. На рычаге 5 установлена площадка 7 для крепления режущего элемента 8.

⁴ ГОСТ 9454–78. МЕТАЛЛЫ. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах.

⁵ Самсонов Л.Н. Фрезерование торфяной залежи / Л. Н. Самсонов. М.: Недра, 1985. 211 с.: ил.; 22 см.



Рисунок 2 – Режущие элементы с разной степенью износа:
 а – режущий элемент, изношенный на 17,87%, б – режущий элемент, изношенный на 25,76%,
 в – режущий элемент, изношенный на 21,51%, г – режущий элемент, изношенный на 16,7%,
 д – режущий элемент, изношенный на 18,48%, е – новый режущий элемент
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Cutting elements with different degrees of wear:
 a – cutting element worn by 17.87%, b - cutting element worn by 25.76%, c - cutting element worn by 21.51%,
 d - cutting element worn by 16.7%, d - cutting element worn by 18.48%, e – new cutting element
 Source: compiled by the authors.

Стенд маятникового типа работает следующим образом:

- образец материала жёстко фиксируется на платформе, после чего происходит настройка толщины срезаемой стружки;

- маятниковый рычаг отклоняется на определенный угол α_1 , определяемый по лимбу и соответствующий необходимой скорости в момент удара;

- сбрасывание рычага, который совершает круговое движение вокруг оси крепления, происходит при помощи механизма сброса;

- набрав требуемую скорость, соответствующую скорости вращения существующих дорожных фрез, режущий элемент с ударом входит со стороны лицевой грани образца в зону резания и осуществляет снятие материала на заданную толщину срезаемой стружки, после чего выходит из зоны резания материала;

- когда режущий элемент выходит из зоны резания, маятниковый рычаг продолжает движение. Дойдя до крайней точки, маятник начинает движение в обратную сторону, а на лимбе фиксируется угол α_2 . Таким образом, по начальным и конечным угловым координатам определяется усреднённая работа сил резания за один удар. Значение толщины сре-

заемой стружки корректируется за счет определения средней глубины на всем участке образованного следа.

Работа стенда основана на теореме об изменении кинетической энергии, из которой следует, что изменение кинетической энергии механической системы при некотором её перемещении будет равно сумме работ всех сил, приложенных к точкам системы на перемещение этих точек (1):

$$K - K_0 = \sum A, \quad (1)$$

где K – кинетическая энергия начала процесса резания, Дж;

K_0 – кинетическая энергия в момент выхода резца из зоны резания, Дж;

A – работа всех сил, Дж.

Среднее значение горизонтальной составляющей силы сопротивления резанию (2) определим по замеренному значению длины пути:

$$F_{cp} = \frac{A}{S}, \quad (2)$$

где S – путь, пройденный режущим элементом, мм.



Рисунок 3 – Образец асфальтобетона марки А16вн после проведения опыта на маятниковом стенде:
а – вид сбоку, б – вид со стороны лицевой грани
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – A sample of A16vn asphalt concrete after conducting an experiment on a pendulum stand:
a – side view, b – view from the side of the front face
Source: compiled by the authors.

За исходные данные экспериментально-го исследования был принят ряд следующих параметров: в качестве фрезеруемого материала выбран асфальтобетон марки А16вн⁶; образцы имели одинаковые размеры – длина 100 мм, ширина 100 мм, толщина 50 мм; температура образцов асфальтобетона составляет 20–25 °С; начальная скорость резания для каждого опыта принята равной 4 м/с, которая идентична нормальному рабочему режиму многих существующих дорожных фрез; угол ориентации режущих элементов соответствовал 45° относительно поверхности образцов; режущие элементы были отсортированы по степени износа (рисунок 2). Износ режущего элемента определялся разницей масс нового режущего элемента с изношенным (3).

$$\tau_{\text{изн}} = - \left(\frac{m_2 \cdot 100}{m_1} - 100 \right), \quad (3)$$

где $\tau_{\text{изн}}$ – износ режущего элемента, %;
 m_1, m_2 – масса нового и изношенного режущего элемента соответственно, кг.

Для сравнения полученных результатов была произведена серия опытов с новым режущим элементом модели А8/20 (рисунок 2, е) производства ОАО «Кировоградский завод твердых сплавов» г. Кировоград, Российская Федерация⁷. Пример образца асфальтобетона, использованного для проведения исследования, изображён на рисунке 3.

Результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований, позволили построить графики зависимости силы сопротивления резанию от степени (процента) износа режущего элемента и толщины срезаемой стружки.

⁶ ГОСТ Р 58406.2–2020. Дороги автомобильные общего пользования. Смеси горячие асфальтобетонные и асфальтобетон. Технические условия.

⁷ ОАО «КЗТС». Оригинальная конструкция дорожных резцов. [Электронный ресурс]. Дата обращения: 25.03.2023. Режим доступа: http://www.kzts.ru/core/user_files/Road.pdf

РЕЗУЛЬТАТЫ

По полученным экспериментальным данным был построен график зависимости силы сопротивления резанию от степени (процента) износа режущего элемента (рисунок 4) и график зависимости силы сопротивления ре-

занию от толщины срезаемой стружки (рисунок 5). Тем самым были определены нагрузки, возникающие в процессе фрезерования изношенным режущим элементом дорожной фрезы и были получены уравнения регрессии (таблица 1,2).

Таблица 1
Результаты исследования влияния степени износа на силу сопротивления резанию
Источник: составлено авторами.

Table 1
The results of the study of the wear out effect on the cutting strength
Source: compiled by the authors.

Толщина срезаемой стружки, мм	Значение силы сопротивления резанию, Н	Значение достоверности аппроксимации, R ²
3	$F = 70,479\tau_{\text{изн}} + 744,8$	0,9974
6	$F = 65,941\tau_{\text{изн}} + 952,87$	0,9953
9	$F = 70,295\tau_{\text{изн}} + 1522,9$	0,9687
12	$F = 98,678\tau_{\text{изн}} + 1719,2$	0,9951

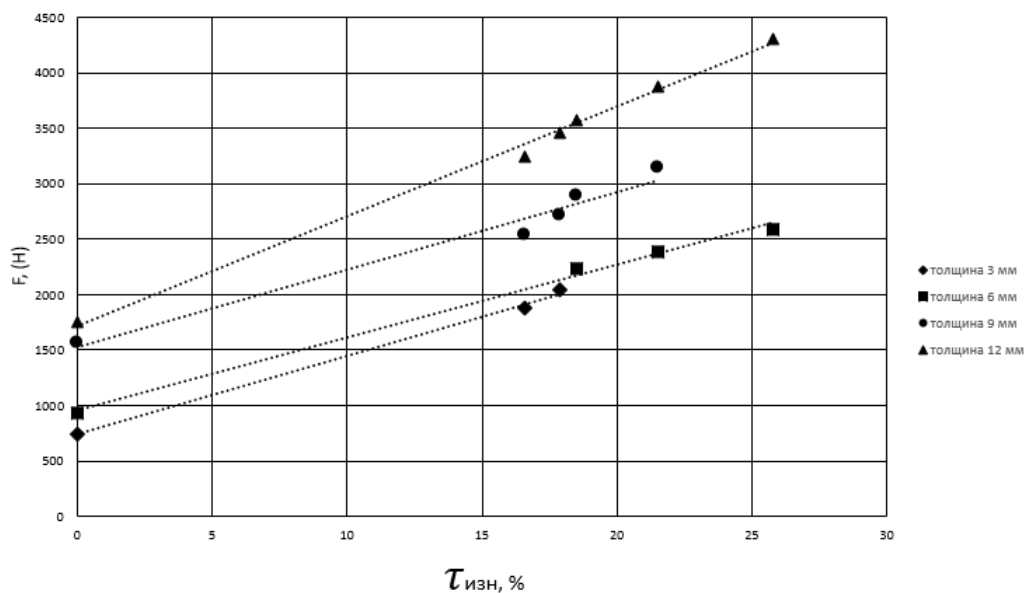


Рисунок 4 – График зависимости силы сопротивления резанию от степени (процента) износа режущего элемента
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Graph of the dependence for the cutting strength on the degree (percentage) of the cutting element wear
Source: compiled by the authors.

Таблица 2
 Результаты исследования влияния толщины срезаемой стружки на силу сопротивления резанию
 Источник: составлено авторами.

Table 2
 The results of the study of the effect of the thickness of the cut chips on the strength of the cutting resistance
 Source: compiled by the authors.

Степень износа, %	Значение силы сопротивления резанию, Н	Значение достоверности аппроксимации, R ²
0	$F = 525,93h^{0,5073}$	0,9366
16,6	$F = 1194h^{0,3829}$	0,9152
17,7	$F = 1346,1h^{0,3509}$	0,9463
18,48	$F = 1406,8h^{0,3576}$	0,9527
21,51	$F = 1594,1h^{0,3218}$	0,9076
25,76	$F = 1784,4h^{0,3022}$	0,9444

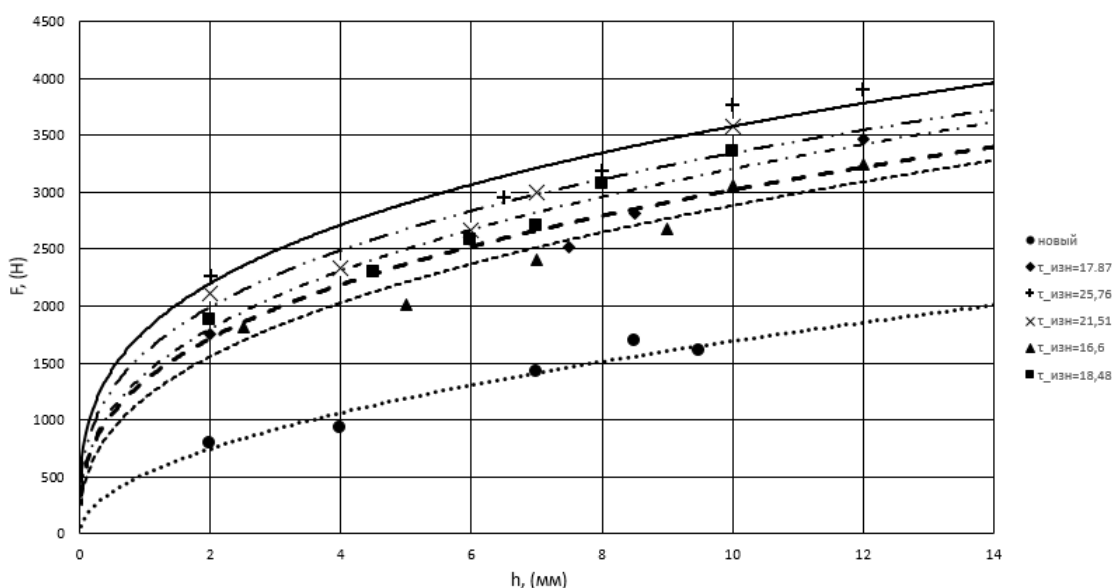


Рисунок 5 – График зависимости силы сопротивления резанию от толщины срезаемой стружки.
 Источник: составлено авторами

Figure 5 – Graph of the dependence of the cutting strength on the thickness of the chip being cut
 Source: compiled by the authors.

А также, чтобы показать взаимное влияние степени износа и толщины срезаемого слоя на силу сопротивления резанию, построен сво-

дный график (рисунок 6) и получено уравнение регрессии (4). Коэффициент достоверности полученных результатов: R=0,9934.

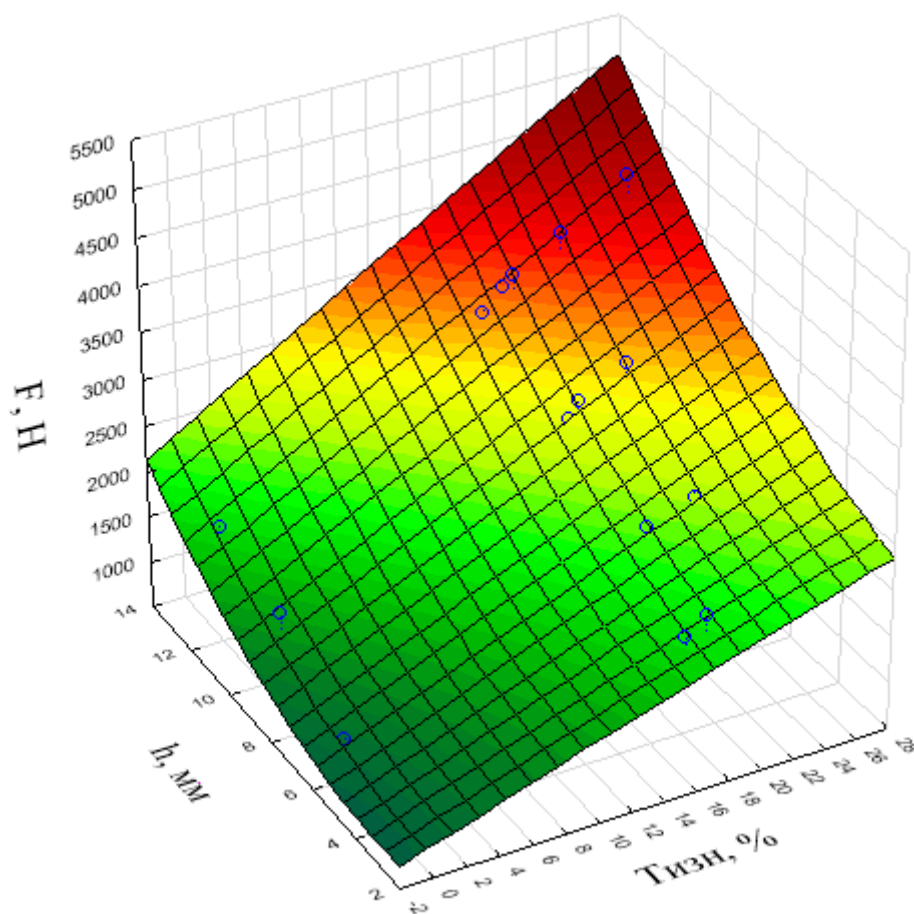


Рисунок 6 - График зависимости силы сопротивления резанию от толщины срезаемой стружки и степени (процента) износа режущего элемента.
Источник: составлено авторами.

Figure 6 - Graph of the dependence of the cutting resistance force on the thickness of the chip being cut and the degree (percentage) of wear of the cutting element.
Source: compiled by the authors.

$$F = 938,589 + 48,3394 \cdot \tau_{\text{изн}} - 63,65 \cdot h - 0,0816 \cdot \tau_{\text{изн}}^2 + 3,76904 \cdot \tau_{\text{изн}} \cdot h + 11,6282 \cdot h^2, \quad (4)$$

где F – сила сопротивления резанию, Н;
 $\tau_{\text{изн}}$ – степень износа режущего элемента, %;
 h – толщина срезаемой стружки, мм.

По результатам работы хочется выделить несколько выводов:

1. Результаты работы показали, что при эксплуатации фрезерной машины с изношенными режущими элементами сила сопротивления резанию, а следовательно и энергоёмкость процесса фрезерования, существенно возрастают. Таким образом, при фрезеровании асфальтобетона марки А16вн нагрузки, возникающие на режущих элементах, износ которых

составляет всего 15–18%, в 2 раза выше, если сравнить их с новым режущим элементом. А уже при износе 25–30% силы сопротивления резанию возрастают в 3 раза, поэтому ресурс дорожной фрезы, при работе в таких условиях сильно уменьшается. Исходя из этого, требуется следить за состоянием режущих элементов и производить своевременную замену.

2. Полученные результаты позволяют прогнозировать нагрузки на рабочем органе дорожно-фрезерной машины, которые определенно будут возрастать при увеличении износа режущего элемента, поэтому в перспективе появится возможность прогнозировать

производительность машины и энергоёмкость процесса фрезерования. Вместе с тем полученные результаты можно использовать для обоснования интервала замены режущих элементов.

3. Сила сопротивления резанию, в зависимости от толщины срезаемой стружки, возрастает нелинейно и имеет затухающий характер. Такие результаты наблюдаются и в других наших исследованиях [13,14], отсюда мы можем предположить, что существует некая оптимальная конструкция фрезерного барабана, позволяющая снизить энергоёмкость фрезерования в целом.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований позволяют нам определять зависимости силы сопротивления резанию в зависимости от степени (процента) износа режущего элемента и толщины срезаемой стружки. К тому же можно сделать вывод о том, что на практике конструирования новых фрезерных машин требуется принимать дополнительные запасы прочности, учитывая степень (процент) износа твердосплавного наконечника режущего элемента. А также следует обращать внимание на правильность установки режущих элементов в державку фрезерного барабана в процессе эксплуатации и, конечно, на качество используемых режущих элементов.

Методика расчета параметров фрезерных машин должна быть дополнена необходимыми коэффициентами, которые бы учитывали влияние износа режущих элементов на силу сопротивления резанию в процессе эксплуатации фрезерной машины. Решение этой необходимой задачи требует проведения дополнительных исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мухторов А. М. Методы расчета износа и ресурса резцов дорожных фрез // *Educational Research in Universal Sciences*. 2022. Т. 1. № 7. С. 496-502.
2. Попов С. Н. Математическое моделирование критериев работоспособности при изнашивании рабочих органов дорожных фрез // *Математическое моделирование*. 2013. № 1. С. 60-63.
3. Iovanas D. M., Dumitrascu A. E. Comparative Reliability Analysis of Milling Teeth Manufactured by Conventional Cutting Processes and Laser Cladding // *Applied Sciences*. 2022. Т. 12. No.14. pp. 7133.
4. Sivilevičius H., Martišius M. Field investigation and assessment on the wear of asphalt pavement milling machine picks // *Transport*. 2021. Т. 36. No. 6. pp. 499-509.
5. Zaumanis M. et al. Impact of milling machine

parameters on the properties of reclaimed asphalt pavement // *Construction and Building Materials*. 2021. Т. 307. pp. 125114.

6. Аскарходжаев Т. И. Роль дорожных фрез в технологии ремонта изношенного дорожного полотна / Т. И. Аскарходжаев, Ш. А. Пирнаев // *Транспорт шёлкового пути*. 2019. № 3-4. С. 109-120. EDN BKELBV.

7. Bołoz Ł., Biały W. Methods and Test Benches for Cutting Tools Testing - A Review // *Energies*. 2023. Т. 16. No. 1. pp. 445.

8. Hai-Rong G. U. et al. Analysis and test on asphalt milling machine cutting load characteristic // *China Journal of Highway and Transport*. 2012. Т. 25. No. 3. Pp. 154.

9. Wang X., Su O. Specific energy analysis of rock cutting based on fracture mechanics: a case study using a conical pick on sandstone // *Engineering fracture mechanics*. 2019. Т. 213. pp. 197-205.

10. Krzysztof K., Piotr M. Methods of mechanical mining of compact-rock-a comparison of efficiency and energy consumption // *Energies*. 2019. Т. 12. No. 18. p. 3562.

11. Furmanov D. V., Lysakov N. E., Shamahov L. M. Experimental Justification of Geometrical Model of Cut Chip Cross-Section during Asphalt Milling // *Innovations and Technologies in Construction: Selected Papers of BUILDINTECH BIT 2021*. Springer International Publishing. 2021. pp. 296-301.

12. Фурманов Д. В., Лысаков Н. Э., Шамахов Л. М. Экспериментально-аналитическое обоснование процесса резания асфальтобетонных рабочих оборудованием дорожной фрезы // *Вестник СибАДИ*. 2022. Т. 19, № 2 (84). С. 170-182. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-170-182>.

REFERENCES

1. Muhtorov A. M. Metody rascheta iznosa i resursa rezcov dorozhnyh frez [Methods of calculating the wear and resource of road milling cutters]. *Educational Research in Universal Sciences*. 2022; Т. 1. no. 7: 496-502. (In Russ.)
2. Popov S. N. Matematicheskoe modelirovanie kriteriev rabotosposobnosti pri iznashivanii rabochih organov dorozhnyh frez [Mathematical modeling of performance criteria during wear of working bodies of road milling cutters]. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2013; 1: 60-63. (In Russ.)
3. Iovanas D. M., Dumitrascu A. E. Comparative Reliability Analysis of Milling Teeth Manufactured by Conventional Cutting Processes and Laser Cladding // *Applied Sciences*. 2022; Т. 12. No. 14: 7133.
4. Sivilevičius H., Martišius M. Field investigation and assessment on the wear of asphalt pavement milling machine picks // *Transport*. 2021; Т. 36. No. 6: 499-509.
5. Zaumanis M. et al. Impact of milling machine parameters on the properties of reclaimed asphalt pavement // *Construction and Building Materials*. 2021; Т. 307: 125114.
6. Askarhodzhaev T. I., Pirnaev Sh. A. Rol' dorozhnyh frez v tehnologii remonta iznoshennogo

dorozhnogo polotna [The role of road cutters in the technology of repair of worn roadbed]. *Transport shjolkovogo puti*. 2019; 3-4: 109-120. EDN BKELBV. (In Russ.)

7. Boloz Ł., Bialy W. Methods and Test Benches for Cutting Tools Testing - A Review // *Energies*. 2023; T. 16. No. 1: 445.

8. Hai-Rong G. U. et al. Analysis and test on asphalt milling machine cutting load characteristic // *China Journal of Highway and Transport*. 2012; T. 25. No. 3: 154.

9. Wang X., Su O. Specific energy analysis of rock cutting based on fracture mechanics: a case study using a conical pick on sandstone // *Engineering fracture mechanics*. 2019; T. 213: 197-205.

10. Krzysztof K., Piotr M. Methods of mechanical mining of compact-rock—a comparison of efficiency and energy consumption // *Energies*. 2019; T. 12. No. 18: 3562.

11. Furmanov D. V., Lysakov N. E., Shamahov L. M. Experimental Justification of Geometrical Model of Cut Chip Cross-Section during Asphalt Milling // *Innovations and Technologies in Construction: Selected Papers of BUILDINTECH BIT 2021*. Springer International Publishing. 2021: 296–301.

12. Furmanov D. V., Lysakov N. E., Shamakhov L. M. Experimental and analytical justification of the asphalt concrete cutting process by road milling machines working equipment. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022;19 (2): 170-182. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-170-182>

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Фурманов Д. В. Организация работы авторского коллектива, формирование направления и формулирование проблемы исследования, постановка задач и методики проведения исследования, разработка и создание испытательного стенда, корректирование материала статьи.

Шамахов Л. М. Обзор предшествующих исследований, разработка и создание испытательного

стенда, подготовка и проведение экспериментальных исследований, обработка полученных данных, подготовка материала для статьи.

Лысаков Н. Э. Разработка и создание испытательного стенда, подготовка и проведение экспериментальных исследований, обработка полученных данных.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Denis V. Furmanov. The organization of the work of the author's team, the formation of the direction and formulation of the research problem, the formulation of the tasks and methods of research, the development and creation of a test bench, the correction of the material of the article.

Leonid M. Shamakhov. Review of previous studies, development and creation of a test bench, preparation and conduct of experimental studies, processing of the data obtained, preparation of material for the article.

Nikita E. Lysakov. The development and creation of a test bench, preparation and conduct of the experimental studies, processing of the data obtained.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фурманов Денис Владимирович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительные и дорожные машины». SPIN-код: 6237-2284.

Шамахов Леонид Михайлович – аспирант кафедры «Строительные и дорожные машины».

Лысаков Никита Эдуардович – аспирант кафедры «Строительные и дорожные машины».

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Denis V. Furmanov – Cand. of Sci., Associate Professor of the Construction and Road Machinery Department. SPIN-код: 6237-2284.

Leonid M. Shamakhov – Postgraduate Student of the Construction and Road Machines Department.

Nikita E. Lysakov – Postgraduate Student of the Construction and Road Machines Department.