

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 22. Is. 4. Number 88 (2025). Pp. 33–44
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2025.88.04.003>
УДК 3977

AUTOMATED ROAD CUTTER FOR REPAIRING VARIABLE ROAD SURFACES

N. Kamzanov

Satbayev University, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: nuke963@mail.ru

Nurbol Kamzanov — PhD, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan
E-mail: nuke963@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-6996-1365>.

© N. Kamzanov

Abstract. This study focuses on precision control of rut milling on the highways of the Republic of Kazakhstan. Rut formation is one of the main causes of road traffic accidents, making the improvement of road repair technologies highly relevant. The aim of this work is to develop methods for controlling automated road milling machines to increase surface smoothness, reduce profile deviation dispersion, and enhance traffic safety. To achieve this goal, the following tasks were undertaken: analysis of existing rut milling technologies, study of automated road machine control methods, development of a digital road surface model and its integration with the feedback system, and experimental testing using disc milling tools. Modern non-contact laser sensors, numerical control systems, and corrective variable movements of the milling cutter were employed. Experimental results demonstrated that precision control significantly reduces the root mean square deviation of the milled surface, compensates for tool wear, thermal deformations, and tire pressure fluctuations. This ensures high smoothness of the road surface, minimizes lateral rut protrusions, and reduces the risk of traffic accidents. In conclusion, the proposed method of precision rut milling control is an effective tool for improving road repair quality. The results have practical significance for integration into modern numerical control systems of construction and road machines, and open prospects for further optimization of technological processes and enhancement of traffic safety.

Keywords: rut, road milling machine, precision control, digital model, road surface, traffic safety, milling

For citation: N. Kamzanov Automated road cutter for repairing variable road surfaces // Industrial Transport of Kazakhstan. 2025. Vol. 22. No. 85. Pp. 33–44. (In Russ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2025.88.04.003>.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

ӨЗГЕРЕТІН ЖОЛ ЖАБЫНДАРЫН ЖӨНДЕУГЕ АРНАЛҒАН АВТОМАТТЫ ЖОЛ КЕСКІШ

Н. Камзанов

Satbayev University, Алматы, Қазақстан.
E-mail: nuke963@mail.ru

Нурбол Камзанов — PhD, Satbayev University, Алматы, Қазақстан
E-mail: nuke963@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-6996-1365>.

© Н. Камзанов



Аннотация. Бұл зерттеу Қазақстан Республикасындағы автомобиль жолдарында колеяларды дәлме-дәл фрезерлеуді басқаруға арналған. Колеяның пайда болуы жол-көлік оқиғаларының негізгі себептерінің бірі болып табылады, бұл жол жабынын жөндеу технологияларын жетілдірудің өзектілігін арттырады. Зерттеудің мақсаты – автоматтандырылған жол фрезаларын басқару әдістерін жасап шығару, жол жабынының тегістігін арттыру, профиль ауытқуларын азайту және жол қауіпсіздігін қамтамасыз ету. Мақсатқа жету үшін келесі міндеттер шешілді: қолданыстағы колея фрезерлеу технологияларын талдау, автоматтандырылған жол машиналарын басқару әдістерін зерттеу, жол жабынының цифрлық моделін жасау және оны кері байланыс жүйесіне интеграциялау, дискілі фрезалармен эксперименттік сынақтар жүргізу. Зерттеуде заманауи байланыссыз лазер датчиктері, сандық басқару жүйелері және фрезаның түзету перемещений жүйесі қолданылды. Эксперимент нәтижелері дәлме-дәл басқару фрезерленген беттің орташа квадраттық ауытқуларын азайтуға, құрал-жабдықтардың тозуын, температуралық деформацияларды және шиналардың қысым өзгерістерін өтеуге мүмкіндік беретінін көрсетті. Бұл жол жабынының тегістігін қамтамасыз етеді, колеяның бүйірлік шығуларын азайтады және жол-көлік оқиғаларының тәуекелін төмендетеді. Қорытындылай келе, ұсынылған дәлме-дәл фрезерлеу әдісі жолдарды жөндеудің сапасын арттыруға тиімді құрал болып табылады. Нәтижелер қазіргі заманғы сандық басқару жүйелеріне енгізу үшін практикалық маңызы бар және технологиялық процестерді әрі қарай оңтайландыру және жол қозғалысының қауіпсіздігін арттыру перспективаларын ашады.

Түйін сөздер: колея, жол фрезасы, дәлме-дәл басқару, цифрлық модель, жол жабыны, жол қауіпсіздігі, фрезерлеу

Дәйексөздер үшін: Н. Камзанов Өзгеретін жол жабындарын жөндеуге арналған автоматты жол кескіш // Қазақстан өндіріс көлігі. 2025. Том. 22. № 88. 33–44 бет. (Орыс тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2025.88.04.003>.

Мүдделер қақтығысы: Авторлар осы мақалада мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ДОРОЖНАЯ ФРЕЗА ДЛЯ РЕМОНТА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ С ПЕРЕМЕННОЙ КОЛЕЙНОСТЬЮ

Н. Камзанов

Satbayev University, Алматы, Казахстан.

E-mail: nuke963@mail.ru

Нурбол Камзанов — PhD, Satbayev University, Алматы, Казахстан

E-mail: nuke963@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-6996-1365>.

© Н. Камзанов

Аннотация. Настоящее исследование посвящено изучению точностного управления фрезерованием колеи на автомобильных дорогах Республики Казахстан. Проблема колееобразования является одной из основных причин возникновения дорожно-транспортных происшествий, что делает актуальным совершенствование технологий ремонта дорожных покрытий. Целью работы является разработка методов управления автоматизированными дорожными фрезами для повышения ровности покрытия, снижения разброса отклонений профиля дороги и повышения безопасности движения. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: анализ существующих технологий фрезерования колеи, изучение методов управления автоматизированными дорожными машинами, разработка цифровой модели дорожного

покрытия и её интеграция с системой обратной связи, проведение экспериментальных испытаний на стенде с дисковыми фрезами. Использовались современные бесконтактные лазерные датчики, системы числового программного управления и корректирующие переменные перемещения фрезы. Результаты экспериментов показали, что применение точностного управления позволяет уменьшить среднеквадратические отклонения фрезерованной поверхности, компенсировать износ инструментов, температурные деформации и колебания давления в пневмошинах. Это обеспечивает высокую ровность дорожного покрытия, минимизацию боковых наплывов колеи и снижение риска возникновения ДТП. В заключение отмечается, что предложенный метод точностного управления фрезерованием колеи является эффективным инструментом повышения качества ремонта автомобильных дорог. Результаты исследования имеют практическое значение для интеграции в современные системы числового программного управления строительными и дорожными машинами, а также открывают перспективы дальнейшей оптимизации технологических процессов и повышения безопасности дорожного движения.

Ключевые слова: колея, дорожная фреза, точностное управление, цифровая модель, дорожное покрытие, безопасность движения, фрезерование.

Для цитирования: Н. Камзанов Автоматизированная дорожная фреза для ремонта дорожных покрытий с переменной колеиностью // Помышленный транспорт Казахстана. 2025. Т. 22. No. 88. Стр. 33–44. (На рус.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2025.88.04.003>.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение.

Выбор темы исследования обусловлен необходимостью повышения эффективности ремонта дорожных покрытий в условиях переменной колеиности. На протяжении последних десятилетий техника и технологии дорожного строительства в Республике Казахстан значительно модернизировались. Появились новые автоматизированные дорожные машины — автогрейдеры с системами «Профиль», самоходные катки с регулируемой вибрацией и скоростными режимами, мощные отечественные и импортные фрезы, ресайклеры, современные автоматизированные асфальтоукладчики (Козбагаров и др., 2020: 31–36). Вместе с этим появились новые материалы и технологии, обеспечивающие однородность смешения и укладки асфальтобетонных покрытий. Однако требования к параметрам работ, их точности и допустимым отклонениям не всегда пересматриваются с учетом новых возможностей техники, что создает проблему обеспечения ровности дорожного покрытия и безопасности дорожного движения (Кульгильдинов и др., 2020: 207–214; Камзанов, 2021: 87–93).

Актуальность исследования определяется возросшим интересом к совершенствованию конструктивных и технологических параметров автоматизированных дорожных фрез, применяемых для устранения выпоров колеи. Колееобразование на автомобильных дорогах является одной из основных причин увеличения риска дорожно-транспортных происшествий (Козбагаров и др., 2021: 98–105). Несмотря на наличие современных технологий, до сих пор отсутствуют исчерпывающие решения, позволяющие обеспечить точное фрезерование дорожного покрытия с минимальными отклонениями размеров, компенсировать износ режущих элементов и влияние колебаний дорожного основания. Это подтверждает как теоретическую, так и практическую значимость темы исследования.

Объектом исследования является процесс фрезерования дорожного покрытия с переменной колеиностью. Предмет исследования — параметры фрезерования, влияющие на ровность поверхности, точность обработки и эффективность работы

автоматизированной дорожной фрезы.

Цель исследования заключается в разработке методики точного фрезерования дорожного покрытия с переменной колеиностью на основе перехода от силового (упругого) замыкания технологической системы к жесткому (координатному) замыканию.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- проанализировать существующие технологии и конструкции автоматизированных дорожных фрез;
- разработать методику экспериментального исследования процесса фрезерования асфальтобетона;
- провести сравнительные эксперименты с упругим и жестким закреплением образцов;
- построить математические модели зависимости усилия подачи от глубины фрезерования и скорости подачи;
- разработать рекомендации по применению жесткого (координатного) замыкания для повышения точности и снижения разброса размеров фрезерованной поверхности.

Методы исследования включают экспериментальные и имитационные испытания, измерение деформаций и виброакустических колебаний, построение регрессионных моделей, использование системы числового программного управления и обратной связи для корректировки параметров фрезы.

Гипотеза исследования заключается в том, что применение жесткого (координатного) замыкания позволяет снизить средние отклонения и разброс параметров фрезерования, что повышает ровность покрытия и безопасность движения на участках с переменной колеиностью.

Значение исследования заключается в возможности более эффективного проведения работ по строительству, ремонту и содержанию автомобильных дорог, обеспечении требуемых эксплуатационных характеристик и повышении безопасности дорожного движения.

Материалы и методы.

Колееобразование на автомобильных дорогах Республики Казахстан является одной из важнейших причин, приводящих к увеличению риска возникновения дорожно-транспортных происшествий, при этом образующиеся выпоры колеи достигают значительных размеров, как по высоте, так и по ширине (Козбагаров и др., 2021: 98–105).

Одновременно изменились и требования к технологии профилирования дорожных покрытий, в том числе и к техническим средствам для выполнения этих работ, а именно, к автоматизированным дорожным фрезам (Кульгильдинов и др., 2020: 207–214). В этой связи совершенствование конструктивных и технологических параметров автоматизированных дорожных фрез, применяемых для устранения выпоров колеи, является актуальной проблемой и требует разрешения.

В настоящее время при проведении ремонтных работ по устранению колеи на дорожных покрытиях стали применять как временную меру технологию фрезерования выпоров (Козбагаров и др., 2020: 31–36). При фрезеровании выпоров (наплыва) обеспечивается требуемый коэффициент сцепления и ровная поверхность дорожного покрытия. Решается задача точного фрезерования наплывов, боковых бугров рядом с колеей. Технология фрезерования самой колеи не изменяется (Камзанов, 2021: 87–93).

Обычно колея заполняется смесью для ямочного ремонта (катионная эмульсия с мелким щебнем, размер фракции 5–10 мм) либо фрезеруется на заданную глубину без требования точности и заполняется асфальтобетонной смесью с последующим уплотнением (Козбагаров и др., 2019: 31–36). Точное фрезерование необходимо для обеспечения ровности и обеспечения безопасности дорожного движения. Погрешность

фрезерования не должна превышать 1–3 мм/м.

В процессе фрезерования изменяется взаимное положение оси вращения фрезы относительно шасси дорожной фрезы и соответственно дорожного покрытия, осуществляются вертикальное корректирующее перемещение. Расстояние от линии резания до оси вращения фрезы будем называть уровнем размерной настройки, т.е. в процессе фрезерования осуществляется корректирующие переменные перемещения для вертикального положения фрезы (Кульгильдинов и др., 2020: 77–82).

Линия резания лежит на уровне исходной поверхности дорожного покрытия вне колеи (Козбагаров и др., 2020: 31–36), для того чтобы не было риска возникновения дорожно-транспортных происшествий (ДТП) и для соответствия техническим требованиям проекта на ремонт колеи. Наплыв представляет собой массу асфальтобетонной смеси, выдавленной из места колеи вправо или влево, с разными размерно-механическими характеристиками (высота, ширина, плотность, форма, прочность, наличие трещин, выкрашиваний, пористость). Будем считать, что переднее и заднее колеса фрезы едут по ровному участку дороги вне колеи (Камзанов, 2021: 87–93).

В новых СДМ применяется компьютерное управление с приводами и рабочими органами. Кроме этого, можно сделать дополнительные контуры управления независимо от основного компьютера, на базе микроконтроллера или промышленного компьютера (Кульгильдинов и др., 2020: 207–214). Управление приводом вертикальных перемещений будет осуществляться путем сложения сигналов, поступающих от основного компьютера и от контура компенсации отклонений размеров фрезерования. Фреза обычно с конструкцией типа Виртген (ФРГ) рекомендуется использовать с свободно-компоновочными зубьями фрезы в корпусе крепления для уменьшения диффузионного износа (Козбагаров и др., 2020: 31–36). Свободно вращающийся режущий элемент постоянно сдвигается нагретой точкой контактирования в бок, вне зоны контактирования участок фрезы успевает остыть. Поэтому не происходит молекулярного диффузионного обмена, а обычный механический износ значителен для жесткозакрепленных инструментов (Кульгильдинов и др., 2020: 77–82).

Результаты и обсуждение.

Используется бесконтактный лазерный датчик, длина базы 250 мм, с погрешностью 0.5 мм типа БОШ, который представляет собой корпус с оптическим глазком приемо-передающей системы, также имеется микропроцессор и выход на компьютерную технику (Козбагаров и др., 2020: 42–45). В системе управления задается установка для сигнала, получаемого с датчика, разница с которой этого сигнала дает отклонения размеров фрезерования. Используется управление обратной связью с помощью корректирующих переменных превращений уровня размерной настройки фрезы (Кульгильдинов и др., 2020: 77–82). Фактически предлагается перейти от кинематического замыкания по силе к кинематическому замыканию по координате (перемещению или приращениям перемещений фрезы), т.к. это позволяет полностью реализовать возможности системы числового программного управления дорожной фрезой (Камзанов, 2021: 87–93).

Это позволяет уменьшить не только текущую среднюю отклонений фрезерования, но и их разброс (среднеквадратическое отклонение, квадратом которого является дисперсия) (Козбагаров и др., 2020: 31–36). Решается задача обеспечения только ровности; задача обеспечения коэффициента сцепления не ставится и не обсуждается.

Для традиционных конструкций строительно-дорожных машин (СДМ) характерен отбор мощности от главного двигателя или применение дополнительного двигателя (Кульгильдинов и др., 2020: 207–214). В ручном управлении обратную связь реализуют через приспособление машиниста к изменяющимся условиям среды. Ранее

фактически использовалось кинематическое замыкание по силе (по отбору мощности гидро- или пневмодавления или по отбору мощности через вращательные элементы). Этот способ управления СДМ позволял лишь воспроизвести или уменьшить исходные отклонения обрабатываемой поверхности дорожного покрытия при фрезеровании. Если размеры припуска и его плотность наплыва становились больше, то фреза испытывала дополнительные вертикальные нагрузки и отклонялась вверх от линии резания, из-за чего образовывались отклонения размеров сфрезерованной поверхности дорожного покрытия, что увеличивало риск возникновения ДТП (Козбагаров и др., 2019: 31–36). Изменения размера этих наплывов могут быть 1–17 см и отличаться на участке ремонта дороги в 5–10 раз. Соответственно, в разы меняется вертикальная составляющая сила резания, вызванная изменением размерных механических параметров наплыва. Поэтому возникает задача компенсации нежелательных дополнительных вертикальных перемещений фрезы и управления уровнем настройки фрезы в реальном времени (Камзанов, 2021: 87–93).

Используется задание цифровой модели поверхности дорожного покрытия. Как исходная информация для определения уровня размерности настройки фрезы, существующие компоновки фрез предполагают работу режущих элементов фрезы в системе координат фрезы, если взаимодействие происходит через фрезу и колеса или, что более прогрессивно, через фрезу и ролики, катящиеся по дорожному покрытию вне колеи (Козбагаров и др., 2020: 42–45). Второй способ позволяет фрезеровать в системе координат дорожного покрытия и без упругих элементов в виде колес. От СДМ идет только отбор мощности, но это не позволяет компенсировать износ режущих элементов фрезы, ошибки в наладке, температурные деформации. Поэтому сканирующие системы определяют цифровую модель дорожного покрытия вне колеи и производят расчет траектории линий резания. Относительно этой виртуальной линии производится автоматическая или виртуальная наладка инструментов так, чтобы вершины инструментов лежали на расчетной линии (Кульгильдинов и др., 2020: 77–82).

Раньше управление проводилось по мгновенной высоте – среднему значению отклонения фрезерных размеров, а сейчас дополнительно уменьшает разброс отклонений фрезерованной поверхности. Впервые применяется точностное управление фрезерования конкретных элементов автомобильной дороги – устранения наплывов сбоку от колеи, использован принцип управления дорожной фрезой по обратной связи (Камзанов, 2021: 87–93).

При задании закона управления в системе числового программного управления СДМ необходимо задать или определить в реальном времени исходную информацию по среде (Козбагаров и др., 2020: 31–36). Автоматизированные дорожные фрезы широко применяют немеханические кинематические связи (по проводам или радиосигналам) (Козбагаров и др., 2020: 42–45). Раньше использовались зубчатые передачи. Новые виды приводов могут работать с различными видами кинематических замыканий: по скорости, по приращению перемещений, по моменту, по мощности (реализуемой электроэнергией). В работе в качестве основного выбрано управление по приращению перемещений (Камзанов, 2021: 87–93). В немеханических кинематических связях важен принцип управления: управление рассматривается по обратной связи и по возмущениям. Выбрано управление по обратной связи, которое заключается в измерении выходного параметра, определении отклонения фрезерования, умножении на коэффициент подналадки и реализации корректирующего переменного приращения через привод вертикального перемещения фрезы (Козбагаров и др., 2020: 31–36).

Проведены сравнительные имитационные испытания резания асфальтобетонных образцов при упругом и координатном замыкании. При их постановке, реализации и обработке результатов использованы хорошо отработанные и современные методы экспериментальных исследований (А.В. Кочетков, 2021: 54–58). Экспериментальный

стенд был реализован на базе вертикально-фрезерного станка в лаборатории металлорежущих станков Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина. Путем его переналадки ось вращения режущего инструмента была установлена в горизонтальном положении. В качестве модели фрезерного барабана были выбраны типовые дисковые фрезы диаметром 110 и 230 мм (металлорежущий инструмент) (Козбагаров и др., 2020: 42–45). Фотографии разработанного стенда представлены на рисунках 1 и 2.



Рис. 1. Процедура замера деформаций образца асфальтобетонного покрытия с помощью универсальной магнитной измерительной головки.

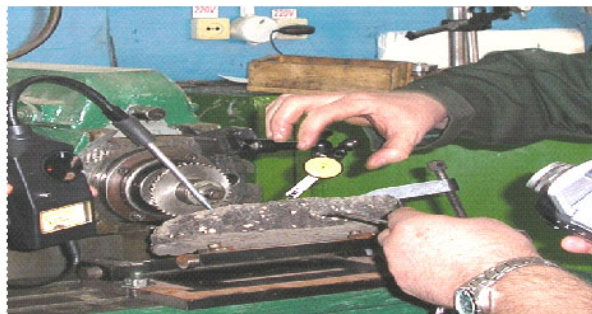


Рис. 2. Измерение виброакустических колебаний в процессе резания с помощью виброизмерительной системы (США)

На рисунке 1 показана процедура замера деформаций образца асфальтобетонного покрытия с помощью универсальной магнитной измерительной головки.

На рисунке 2 показано измерение виброакустических колебаний в процессе резания с помощью виброизмерительной системы (США).

Проводились две серии экспериментов с упругим и жестким замыканием. В первом случае между магнитным зажимным приспособлением и столом фрезерного станка помещался резиновый лист толщиной 5 мм.

Во втором случае магнитное зажимное приспособление жестко крепилось на столе фрезерного станка.

Были выбраны дисковая фреза и образец асфальтобетона с неровной поверхностью.

Пример, в реальный момент времени отклонения размера фрезерования состоял 10 мм, умножаем его на коэффициент подналадки равный - 0,5, получаем -5 мм - величину переменного корректирующего приращения и добавляем его к существующему уровню размерной настройки фрезы.

Этим самым компенсируются случайные изменения размерных механических параметров напыла колеи, также компенсируются изменения давления в пневмошинах, компенсируется износ режущих элементов, тепловые температурные деформации рабочего органа и самой СДМ, компенсируются изменения массовых характеристик фрезы. Фактически компенсируется детерминированная (линейная) и периодическая (коррелирующая) составляющая последовательности отклонения фрезерования. Случайной составляющей управлять нельзя (Козбагаров и др., 2020: 42–45).

Проведены сравнительные имитационные испытания резания асфальтобетонных образцов при упругом и координатном замыкании.

Разработаны методика исследования основных параметров фрезерования. Исследования были направлены на определение зависимости между глубиной фрезерования (h) и скоростью подачи диска (V) на сопротивление подачи (W_0). Эксперименты были проведены на специально изготовленном стенде (рисунок 3).

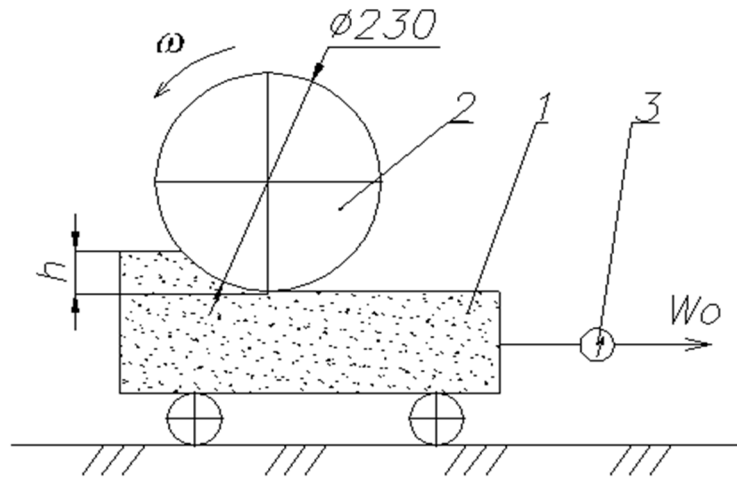


Рис. 3. Схема экспериментального стенда для определения основных параметров фрезерования

1-тележка с образцом асфальтобетона, 2-алмазный диск, 3-динамометр

В качестве константы в экспериментах была взята частота вращения диска, которая обеспечивала линейную скорость резания до 50 м/с. При этом скорость подачи алмазного диска изменялась от 1,8 м/мин до 3 м/мин, а глубина фрезерования h – от 10 до 60 мм. Эксперименты выполнялись с 3-х кратной повторностью в соответствии с разработанным планом факторного эксперимента представленном в таблице 1 с результатами опытов.

Таблица - План и результаты экспериментов

№	План в натуральных переменных		Усилие подачи W_0 (кН)	Остаточные деформации	
	h , мм	V , м/с			
1	10	0,03	3,8	1,8	1,6
2	60	0,03	20,6	2,8	2,4
3	10	0,05	4,2	2,0	1,7
4	60	0,05	22,7	2,1	1,5
5	7,68	0,04	2,6	1,7	2,4
6	77,68	0,04	26,2	2,8	4,6
7	35	0,023	11,2	2,1	3,0
8	35	0,047	13,1	2,2	3,1
9	35	0,04	11,7	2,6	3,1
10-13	35	0,04	12,0	2,7	3,3

Научным результатом является регистрация факта увеличения разброса остаточных деформаций резания (погрешностей) в сравнении жесткого и упругого силовых замыканий.

После обработки результатов эксперимента были получены математические зависимости (усилия подачи W_0 от глубины фрезерования h и скорости подачи V)

$$W_0 = 0,35h + 0,1hV. \quad (1)$$

На основе зависимости (1) было определено среднее значение сопротивления фрезерования q_0 как

$$q_0 = W_0/hB, \quad (2)$$

где B – ширина фрезерования.

Значения q_0 составляет 60-80 кПа и может использоваться для определения

мощности привода N

$$N = 0,5q_0 hBD\omega, \quad (3)$$

где D – диаметр диска, ω - угловая скорость вращения диска.

Экспериментальный стенд реализован на базе горизонтально-фрезерного станка 6М82Г. При этом ставилась задача воспроизвести процесс взаимодействия фрезерного инструмента и асфальтобетона наиболее близко к реальному (Кочетков, 2015: 78–82).

В качестве модели барабана дорожной фрезы была выбрана сборная фреза соотношением диаметра и ширины аналогичная рабочим органам существующих машин. Фреза собиралась из типового металлорежущего инструмента, с учётом особенностей обработки асфальтобетона, были выбраны диски с большим зубом для воспроизведения эффекта выкрашивания (выламывания), а не резания образца.

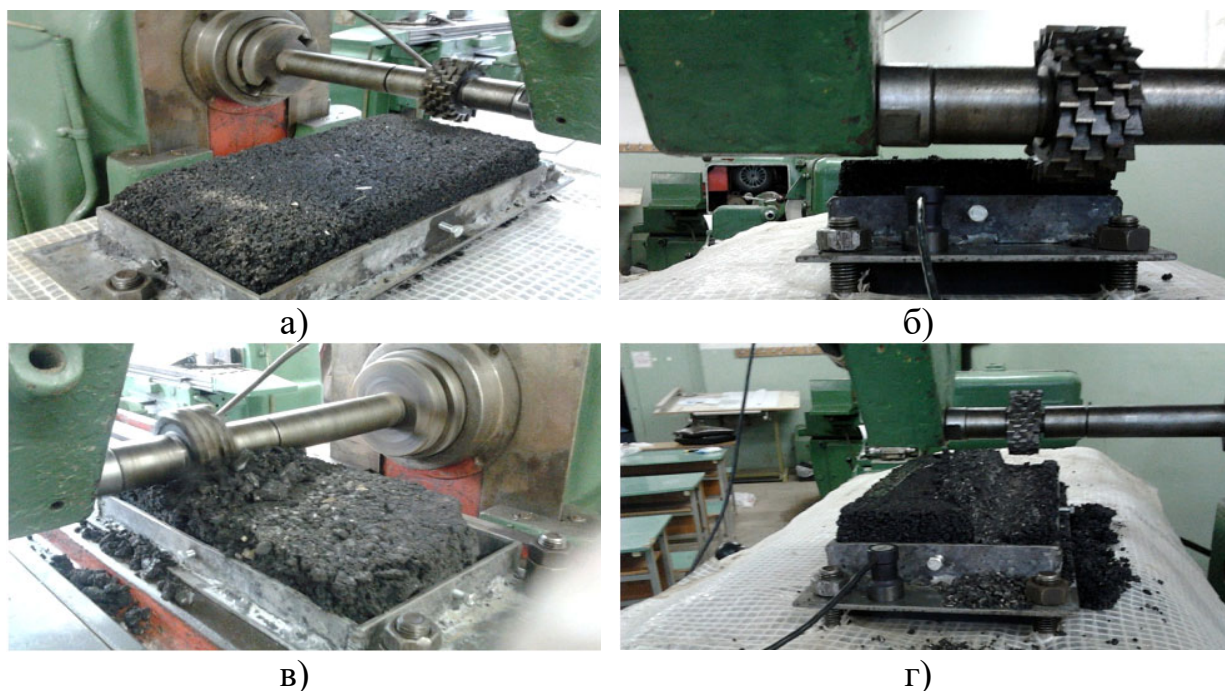


Рис. 4. Эксперимент по имитационному фрезерованию асфальтобетонных образцов

Проводились две серии экспериментов с упругим и жестким замыканием.

Фрезерование производилось навстречу обрабатываемой поверхности (против подачи). Исследовались два режима:

- с упругим элементом (резиновое основание толщиной 20 мм) (рисунок 4 а, б) – имитация фрезерования по силовому замыканию. Закрепление образца происходило на специально разработанном экспериментальном столе установленном на станину через упругий элемент. В этом случае наблюдался повышенный разброс отклонений параметров фрезерования и повышение средней высоты профиля отфрезерованной поверхности.

- в случае, когда образец с асфальтобетоном закреплялся жестко (рисунок 4 в, г) – имитация координатного замыкания, наблюдались уменьшение разброса отклонений размеров фрезерования, по приближенным оценкам, в 2 раза.

Это подтверждает эффективность перехода от замыкания по силе к координатному замыканию или управлению по перемещению.

Фотографии части экспериментов представлены на рисунке 4.

Вне плана эксперимента было проведено фрезерование асфальтобетонного образца по силовому замыканию с использованием в качестве упругих элементов пружин переменной жёсткости, имитирующих различную жёсткость системы ФИП. Наблюдение

показало, что влияние жёсткости системы ФИП на отклонение профиля фрезерования не линейно и нарастает лавинообразно с уменьшением жёсткости системы (повышением её упругости).

Возможно использование разработанных алгоритмов адаптивных знаковых и пропорциональных подналадок. В результате моделирования по исходной выборке было получено уменьшение среднего значения отфрезерованной поверхности выпоров на 20 % при использовании знаковых пульсирующих подналадок переменным импульсом. Сравнение результатов фрезерования асфальтобетонного покрытия с применением дорожных фрез для упругого (силового) и жесткого (координатного) замыкания (рисунок 5).

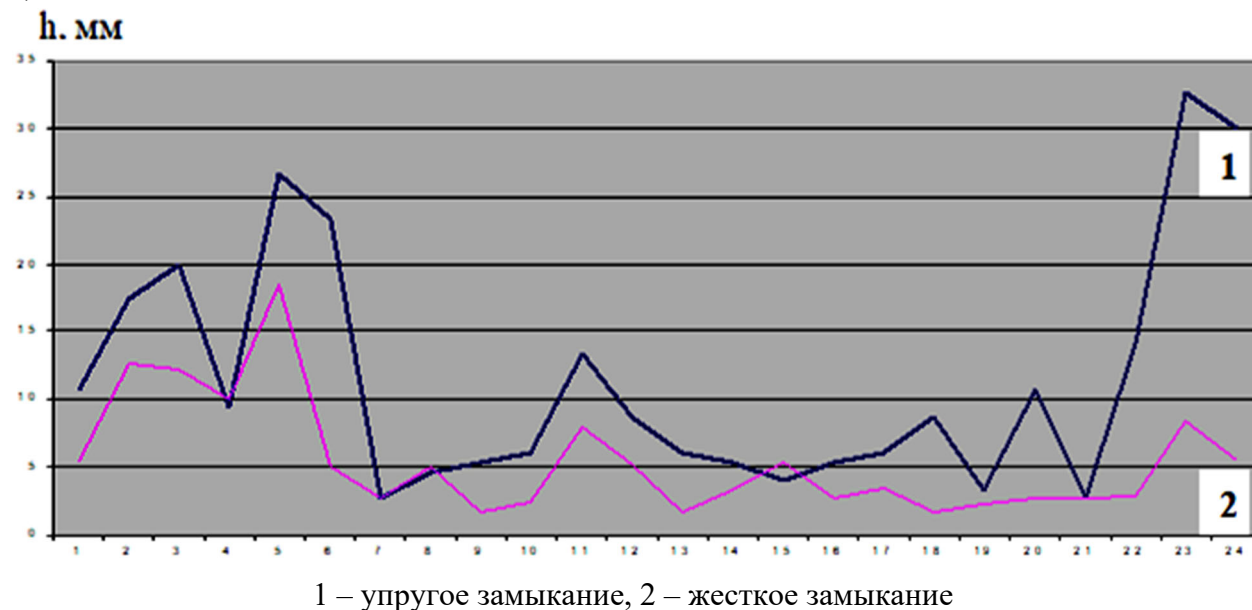


Рис. 5. Сравнение результатов фрезерования дорожного покрытия с применением дорожных фрез

Разработана технологическая схема фрезерования выпоров колеи дорожного покрытия, подтверждена эффективность жесткого (координатного) замыкания технологической схемы фрезерования по сравнению с упругим (силовым) методом.

Использование результатов работы позволит более эффективно проводить работы по строительству, ремонту и содержанию автомобильных дорог, обеспечить требуемые транспортно - эксплуатационные характеристики, сохранность автомобильных дорог и безопасность дорожного движения.

Заключение.

В результате проведённого исследования были реализованы цели и задачи, поставленные в работе, с использованием комплексного подхода, включающего теоретическое обоснование, численное моделирование, экспериментальные испытания и анализ результатов работы автоматизированных дорожных фрез. Основной целью исследования было разработать и обосновать методику точностного управления фрезерованием колеи на автомобильных дорогах Республики Казахстан для повышения ровности дорожного покрытия, обеспечения безопасности дорожного движения и снижения вероятности дорожно-транспортных происшествий.

Для достижения поставленных целей использовались современные методы: бесконтактные лазерные датчики с высокой точностью измерения, системы обратной связи с корректирующими переменными перемещениями фрезы, цифровое моделирование поверхности дорожного покрытия и экспериментальные испытания на стенде с дисковыми фрезами диаметром 110 и 230 мм. Такой комплексный подход позволил максимально точно

воспроизвести реальные условия взаимодействия режущих элементов с асфальтобетоном и оценить влияние факторов, которые ранее не учитывались в традиционных конструкциях строительных и дорожных машин. Среди таких факторов – износ режущих инструментов, температурные деформации рабочих органов и СДМ, изменения механических параметров наплывов колеи, а также колебания давления в пневмошинах.

Экспериментальные результаты показали, что применение управления по приращению перемещений фрезы, а также использование цифровых моделей дорожного покрытия позволяют существенно снизить среднеквадратические отклонения фрезерованной поверхности, уменьшить разброс погрешностей и обеспечить точное соблюдение профиля дорожного покрытия. При этом компенсируются детерминированные и периодические составляющие отклонений, повышается точность профилирования, обеспечивается ровность поверхности и, как следствие, повышается безопасность движения. Фактически впервые применён принцип точностного управления фрезерованием конкретных элементов автомобильной дороги, включая устранение боковых наплывов колеи, что значительно расширяет возможности автоматизированных дорожных машин.

Выводы исследования подтверждают истинность выдвинутого автором тезиса о необходимости применения точностного управления фрезерованием и показывают, что предложенный подход позволяет улучшить качество ремонта дорожного покрытия, уменьшить износ инструментов и повысить экономическую эффективность ремонтных работ. Практическое значение результатов заключается в возможности интеграции разработанных методов управления в современные системы числового программного управления (ЧПУ) СДМ, что открывает перспективы для стандартизации технологических процессов профилирования и ремонта колеи на автомобильных дорогах.

Перспективы дальнейших исследований включают совершенствование алгоритмов управления с учётом различных климатических, эксплуатационных и конструктивных факторов, разработку методов прогнозирования износа режущих инструментов и оптимизацию параметров работы фрез для различных типов дорожных покрытий. Также возможно расширение области применения полученных результатов на реконструкцию и модернизацию существующих дорожных машин, создание автоматизированных систем мониторинга состояния дорожного покрытия и повышение надёжности и безопасности транспортной инфраструктуры в целом.

Таким образом, проведённое исследование не только подтверждает практическую и теоретическую значимость точностного управления фрезерованием колеи, но и вносит вклад в развитие науки о строительстве и эксплуатации автомобильных дорог, создавая основу для дальнейшего совершенствования технологий ремонта дорожных покрытий и повышения безопасности движения на территории Республики Казахстан.

ЛИТЕРАТУРА

Kozbagarov, 2020 — R.A. Kozbagarov, K.A. Zhussupov, E.B. Kaliyev, M.N. Yessengaliyev, A.V. Kochetkov, N.S. Kamzanov. Development of control suspension of attachment of a bulldozer // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. — Volume 4, Number 442. — 2020. — P. 166–174. [Eng.]

Kulgildinov, 2019 — M.S.Kulgildinov, R.A. Kozbagarov, A.U. Dauletkulova, N.S.Kamzanov. Improvement of parameters of road mills for repair works on elimination of ruts on road surfaces // The Scientific Journal of the Modern Education & Research Institute. — The Kingdom of Belgium. — 2019. — №11. — P. 31–36. [Eng.]

Kozbagarov, 2021 — R.A. Kozbagarov, M.V. Taran, K.A. Zhussupov, A.E. Kanazhanov, N.S. Kamzanov, A.V. Kochetkov. Increasing the efficiency of motor graders work on the basis of working elements perfection // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. — Volume 1, Number 445. — 2021. — P. 98–105. [Eng.]

Kozbagarov, 2021a — R.A. Kozbagarov, N.S. Kamzanov, Sh.D. Akhmetova, K.A. Zhussupov, Zh. Kh. Dainova. Improving the methods of milling gauge on highways // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. — Volume 3, Number 447. — 2021. — P. 87–93. [Eng.]

Кульгильдинов, 2020 — Кульгильдинов М.С., Камзанов Н.С., Бегимкулова Э.А. Аналитический обзор методов фрезерования колеи дорожного покрытия и ее выпоров // Вестник КазАТК (специальный выпуск). — Алматы: Казахская академия транспорта и коммуникаций имени М. Тынышпаева. — 2020. — Том 1. — С. 77–82. [Russ.]

Кульгильдинов, 2020b — Кульгильдинов М.С., Камзанов Н.С., Бегимкулова Э.А. Пути совершенствования технологии и алгоритмов автоматического управления фрезерованием колеи // Вестник КазАТК (специальный выпуск). — Том 1. — Алматы: Казахская академия транспорта и коммуникаций имени М. Тынышпаева. — 2020. — С. 207–214. [Russ.]

Кульгильдинов, 2020c — Кульгильдинов М.С., Кочетков А.В., Камзанов Н.С., Бегимкулова Э.А. Жол фрезасының жұмыс органының координаттық тұйықталуы кезінде фрезерлеу процесін эксперименттік зерттеу // Материалы XLIV Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика». — Алматы: КазАТК. — 17.04.2020. — С. 100–103. [Kaz.]

Жунусов, 2021 — Жунусов Б. Жол фрезалау технологиясын жетілдіру // Қазақстан жолдары. — 2021. — № 7. — С. 45–50. [Kaz.]

Иванов, 2019 — Иванов П.А. Modern methods of asphalt milling and road maintenance. — Moscow: Transport Publishing. — 2019. — 184 с. [Eng.]

Сергеев, Ковалев, 2020 — Сергеев В.В., Ковалев А.М. Автоматизация дорожных машин: теория и практика // Машиностроение. — 2020. — № 12. — С. 65–73. [Russ.]

REFERENCES

Kozbagarov, 2020 – Kozbagarov, R.A., Zhussupov, K.A., Kaliyev, E.B., Yessengaliyev, M.N., Kochetkov, A.V., Kamzanov, N.C. (2020). Development of control suspension of attachment of a bulldozer // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. — Vol. 4, №442. — P.166–174. [in Eng.]

Kulgildinov, 2019 – Kulgildinov, M.S., Kozbagarov, R.A., Dauletkulova, A.U., Kamzanov, N.S. (2019). Improvement of parameters of road mills for repair works on elimination of ruts on road surfaces // The Scientific Journal of the Modern Education & Research Institute. — Kingdom of Belgium. — №11. — P.31–36. [in Eng.]

Kozbagarov, 2021 – Kozbagarov, R.A., Taran, M.V., Zhussupov, K.A., Kanazhanov, A.E., Kamzanov, N.S., Kochetkov, A.V. (2021). Increasing the efficiency of motor graders work on the basis of working elements perfection // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. — Vol.1, №445. — P.98–105. [in Eng.]

Kozbagarov, 2021a – Kozbagarov, R.A., Kamzanov, N.S., Akhmetova, Sh.D., Zhussupov, K.A., Dainova, Zh.Kh. (2021). Improving the methods of milling gauge on highways // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. — Vol.3, №447. — P.87–93. [in Eng.]

Kulgildinov, 2020 – Kulgildinov, M.S., Kamzanov, N.S., Begimkulova, E.A. (2020). Analiticheskiy obzor metodov frezerovaniya kolei dorozhnogo pokrytiya i ee vyporov [Analytical review of methods of milling road rut and its defects] // Vestnik KazATK (special issue). — Almaty: Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshepaev. — Vol.1. — P.77–82. [in Russ.]

Kulgildinov, 2020b – Kulgildinov, M.S., Kamzanov, N.S., Begimkulova, E.A. (2020). Puti sovershenstvovaniya tekhnologii i algoritmov avtomaticheskogo upravleniya frezerovaniem kolei [Ways to improve technology and algorithms of automatic rut milling control] // Vestnik KazATK (special issue). — Vol.1. — Almaty: Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshepaev. — P.207–214. [in Russ.]

Kulgildinov, 2020c – Kulgildinov, M.S., Kochetkov, A.V., Kamzanov, N.S., Begimkulova, E.A. (2020). Zhol frezasynyn zhymys organynyn koordinattik tuykhtaluy kezinde frezerleu protsesin eksperimentalnyi zertteu [Experimental study of milling process during coordinate closure of road milling machine working body] // Materials of XLIV International Scientific-Practical Conference “Innovative Technologies in Transport: Education, Science, Practice”. — Almaty: KazATK. — 17.04.2020. — P.100–103. [in Kaz.]

Zhunusov, 2021 – Zhunusov, B. (2021). Zhol frezalau tekhnologiyasyn zhetildiru [Improvement of road milling technology] // Qazaqstan zholdary. — 2021. — №7. — P.45–50. [in Kaz.]

Ivanov, 2019 – Ivanov, P.A. (2019). Modern methods of asphalt milling and road maintenance. — Moscow: Transport Publishing. — 184 p. [in Eng.]

Sergeev, Kovalev, 2020 – Sergeev, V.V., Kovalev, A.M. (2020). Avtomatizatsiya dorozhnykh mashin: teoriya i praktika [Automation of road machines: theory and practice] // Mashinostroenie. — 2020. — №12. — P.65–73. [in Russ.]