



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov











Экспериментальные исследования режимов скоростного шлифования рельсов

Андрей Ильиных^{1, а, *}, Александр Пикалов^{2, б}, Владимир Милорадович^{2, в}, Марина Галай^{1, д}

¹ Сибирский государственный университет путей сообщения, ул. Дуси Ковальчук, 191, 630049, Россия

² Центр инфраструктурных технологий АО «СТМ», Москва, Подкопаевский переулок, д. 4Б, 109028, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0002-4234-6216>,  asi@stu.ru, ^б  <https://orcid.org/0000-0002-9584-9896>,  pikalov.2023@internet.ru,

^в  <https://orcid.org/0000-0002-8258-5801>,  vmiloradovich@internet.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-7897-1750>,  galayms@mail.ru.

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.923

История статьи:

Поступила: 17 мая 2023

Рецензирование: 29 мая 2023

Принята к печати: 16 июня 2023

Доступно онлайн: 15 сентября 2023

Ключевые слова:

Шлифование рельсов
 Абразивная обработка
 Режимы шлифования
 Железнодорожный путь

Финансирование

Результаты исследований, представленных в статье, получены с использованием мер государственной поддержки на развитие кооперации российских образовательных организаций высшего образования, государственных научных учреждений и организаций реального сектора экономики, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства, предусмотренных постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 по теме «Высокопроизводительная технология скоростного шлифования рельсов и оборудование для ее реализации на основе интеллектуальных цифровых модулей», соглашение № 075-11-2022-014 от 08 апреля 2022 г.

Благодарности

Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнауки № 13.ЦКП.21.0034).

АННОТАЦИЯ

Введение. Шлифование рельсов в условиях железнодорожного пути является приоритетным направлением по продлению его жизненного цикла за счет своевременного удаления дефектов на поверхности катания и формирования требуемого поперечного профиля. На сегодняшний день в России используется 14 рельсошлифовальных поездов марки РШП-48. При этом у большинства рельсошлифовальных поездов заканчивается срок эксплуатации. Поэтому разработка принципиально нового рельсошлифовального поезда с повышенной производительностью является актуальной задачей. В СГУПС ведутся работы совместно с Калужским заводом «Ремпутьмаш» по созданию нового рельсошлифовального поезда РШП 2.0. В основу рельсошлифовального поезда РШП 2.0 положена технология скоростного шлифования рельсов, которая основана на повышении рабочей скорости рельсошлифовального поезда за счет увеличения частоты вращения шлифовальных кругов и задания им угла атаки. **Цель работы:** исследование режимов шлифования рельсов на специально разработанной установке УРШ, реализующей технологию скоростного шлифования рельсов за счет увеличения частоты вращения шлифовальных кругов до 5000 об/мин. **Методы исследования.** Контроль частоты вращения шлифовальных кругов производился электронным тахометром ИТ-5-ЧМ «Термит» и лазерным тахометром «Мегеон 18005». Измерение угла атаки шлифовального круга осуществлялось цифровым трехосевым акселерометром-инклинометром АЦт 90. Оценка усилия прижатия шлифовального круга к рельсу проводилась тензорезисторными датчиками М50-0,5-С3. Измерение поперечного профиля головки рельса до и после шлифования и оценку съема металла осуществляли рельсовым профилографом ПР-03. Контроль ширины дорожки шлифования производился штангенциркулем ШЦЦ-I-300-0,01. Шероховатость поверхности образца рельса после механической обработки измерялась портативным прибором TR200. **Результаты и обсуждение.** По результатам исследований на УРШ установлены параметры рабочего оборудования проектируемого рельсошлифовального поезда, реализующего технологию скоростного шлифования рельсов, а также установлено влияние режимов шлифования на формирование параметров качества обработанной поверхности рельса и определены оптимальные значения усилий прижатия шлифовального круга к рельсу.

Для цитирования: Экспериментальные исследования режимов скоростного шлифования рельсов / А.С. Ильиных, А.С. Пикалов, В.К. Милорадович, М.С. Галай // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 19–35. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.3-19-35.

*Адрес для переписки

Ильиных Андрей Степанович, д.т.н., доцент
 Сибирский государственный университет путей сообщения,
 ул. Дуси Ковальчук, 191,
 630049, г. Новосибирск, Россия
 Тел.: +7 (383) 328-04-13, e-mail: asi@stu.ru

Введение

Процесс шлифования рельсов активно применяется на сети российских железных дорог с начала 2000-х годов. Технология зарекомендовала себя как единственная позволяющая продлить жизненный цикл рельса [1, 2]. Реализуется эта технология с применением рельсошлифовальных поездов типа РШП-48, являющихся полной копией швейцарских поездов фирмы Speno (модификации RR) разработки 80-х годов XX века [3]. Основными задачами шлифования рельсов (рис. 1, а) являются создание необходимого профиля рельса для обеспечения наилучшего взаимодействия колеса с рельсом, а также удаление дефектов, которые образуются на поверхности катания рельсов [4–6]. Для обработки сложного профиля рельсов шлифование производится путем наклона шлифовальных кругов под разными углами (рис. 1, б).

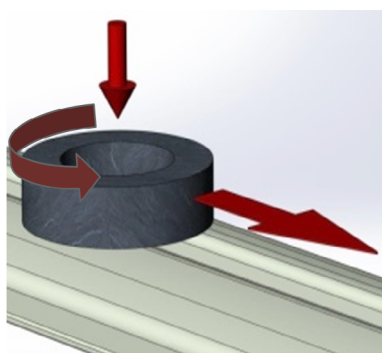
Следует отметить, что рельсошлифовальные поезда, которые эксплуатируются на сети железных дорог, имеют ограничения по скорости до 8 км/ч и по частоте вращения шлифовальных кругов – до 3600 об/мин [3]. При таких параметрах у рельсошлифовальных поездов отмечается низкая производительность, которая обуславливает необходимость закрытия для движения перегонов на время производства работ по шлифованию рельсов, что приводит к значительным финансовым поте-

рям [7]. Таким образом, вопрос повышения производительности рельсошлифовальных поездов является крайне актуальным для развития железнодорожной отрасли.

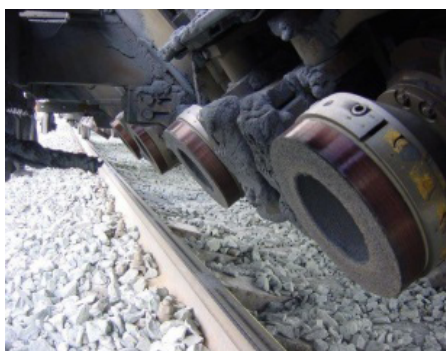
Всего за все время в России был изготовлен 21 рельсошлифовальный поезд. Начиная с 2021 года в связи с техническим состоянием машин и окончанием срока их эксплуатации началось выбытие рельсошлифовальных поездов из эксплуатации. По состоянию на конец 2022 года на сети железных дорог России работает 14 поездов РШП-48, которые, учитывая их низкую производительность, не обеспечивают потребности железных дорог в шлифовании рельсов.

На основании вышеизложенного холдингом «Синара – Транспортные машины», являющимся единственным поставщиком услуги по шлифованию рельсов для компании ОАО «РЖД», в 2021 году было принято решение о создании принципиально новой машины – рельсошлифовального поезда РШП 2.0 (рис. 2).

В основу работы нового поезда положена технология скоростного шлифования рельсов, которая была разработана в СГУПС в конце 2000-х годов [8] и прошла предварительную промышленную апробацию [9]. Новая технология была предложена исходя из теории резания при абразивной обработке [10–12], в соответствии с которой увеличение рабочей скорости рельсошлифовального поезда невозможно без пропорционального увеличения частоты враще-



а



б

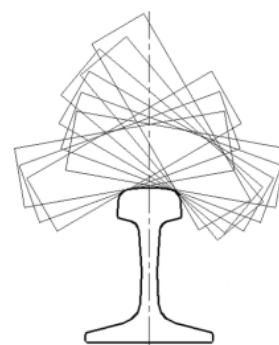


Рис. 1. Схема шлифования рельсов рельсошлифовальным поездом:

а – схема плоского шлифования рельсов торцом круга; б – наклон шлифовальных головок при обработке профиля рельсов

Fig. 1. Schematic representation of rail grinding by a rail grinding train:

а – a schematic representation of flat grinding of rails with the end of the wheel; б – the inclination of the grinding heads when processing the rails' profile



Рис. 2. Рельсошлифовальный поезд РШП 2.0

Fig. 2. Rail grinding train RSHP 2.0

ния шлифовального круга. В противном случае повышение подачи может привести к значительному ухудшению параметров качества обработанной поверхности и уменьшению съема металла, а также возможен повышенный износ абразивного инструмента из-за нарушения оптимальных режимов его работы [13]. Таким образом, в технологии скоростного шлифования были реализованы следующие условия.

Первое условие заключается в том, что абразивный круг располагается под углом α к поверхности обрабатываемого рельса (рис. 3) с раскрытием навстречу направлению движения рельсошлифовального поезда (угол атаки). Благодаря такому расположению шлифовального круга достигается равномерный припуск между абразивными зернами, при этом уменьшается износ абразивного инструмента. Наибольшая эффективность при обработке шлифованием

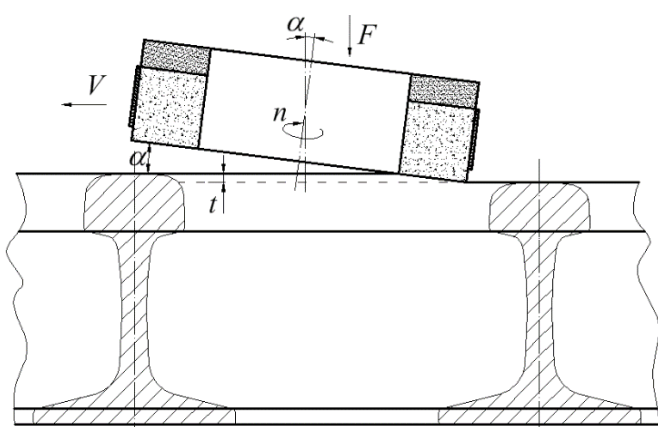


Рис. 3. Схема взаимодействия абразивного инструмента с рельсом при скоростном шлифовании

Fig. 3. Schematic representation of interaction of an abrasive tool with a rail during high-speed grinding

рельсов достигается при правильном выборе угла α , поскольку его величина зависит от съема металла. Угол α принят с учетом размеров шлифовального круга и среднего значения предполагаемого съема металла, он составляет 0,35 градуса в соответствии с формулой

$$\sin \alpha = \frac{t}{(D - d) / 2} = \frac{0,3}{(250 - 150) / 2} = 0,006,$$

где t – предполагаемый съем металла, мм ($t = 0,3$ мм); D – наружный диаметр шлифовального круга, мм ($D = 250$ мм); d – внутренний диаметр шлифовального круга, мм ($d = 150$ мм).

Второе условие заключается в увеличении скорости вращения шлифовального круга. Увеличение скорости вращения приводит к повышению скорости съема металла, а также уменьшается сила резания при той же глубине резания. Предварительно установлено, что повышение частоты вращения шлифовального круга до 5000 об/мин позволит увеличить рабочую скорость рельсошлифовального поезда до 15 км/ч без уменьшения съема металла [9].

Практическое применение принятых технологических решений требует отработки режимов шлифования, которые должны лечь в основу проектирования нового рабочего оборудования рельсошлифовального поезда.

Постановка задач исследований

В настоящее время Калужским заводом «Ремпутьмаш» совместно с Сибирским государственным университетом путей сообщения ведется конструкторская проработка нового рельсошлифовального поезда. В рамках технического проекта закладываются соответствующие характеристики всех систем управления процессом шлифования рельсов, которые зависят от реализуемых режимов работы рельсошлифовального поезда.

Работа рельсошлифовальных поездов характеризуется принципиальными отличиями от шлифования на станках в стационарных условиях [14]. Шлифование рельсов проводится за счет силового замыкания кинематической пары «абразивный круг – обрабатываемая поверхность» (рис. 4). Каждый отдельный шлифовальный круг прижимается к головке рельса

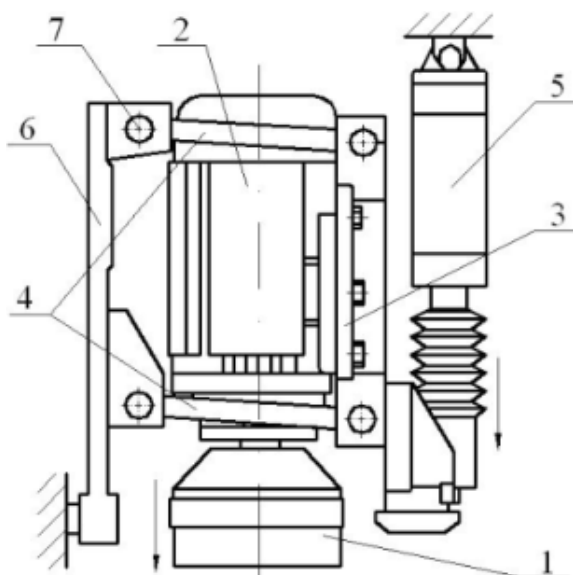


Рис. 4. Схема крепления шлифовальной головки:

1 – абразивный круг; 2 – электродвигатель; 3 – подмоторная плита; 4 – параллелограммная подвеска; 5 – пневмоцилиндр; 6 – плита блока; 7 – ось

Fig. 4. Grinding head attachment pattern:

1 – abrasive wheel; 2 – electric motor; 3 – under-engine plate; 4 – parallelogram suspension; 5 – pneumatic cylinder; 6 – block plate; 7 – axis

пневмоцилиндром через приводной электродвигатель, закрепленный на подмоторной плите. Оси вращения параллелограммной подвески закреплены на торцевой плите блока шлифовальной тележки. Такая конструкция обеспечивает постоянную перпендикулярность оси вращения круга относительно продольной оси рельса. При этом усилие прижатия шлифовального круга к рельсу определяется давлением в пневмоцилиндре, которое автоматически регулируется в зависимости от токовой нагрузки на обмотках электродвигателя в соответствии с принципиальной схемой, представленной на рис. 5.

Указанная особенность процесса шлифования рельсов не позволяет точно реализовывать глубину резания, поскольку съем металла будет формироваться самопроизвольно в зависимости от ряда факторов и с большой долей вероятности будет отличаться от заданного значения. Соответственно нарушится точность формирования профиля рельса [15, 16], а также изменятся условия работы абразивного инструмента [17, 18] и обеспечения качества обработанной поверхности. С целью минимизации отклонений фактического съема металла от заданного (пред-

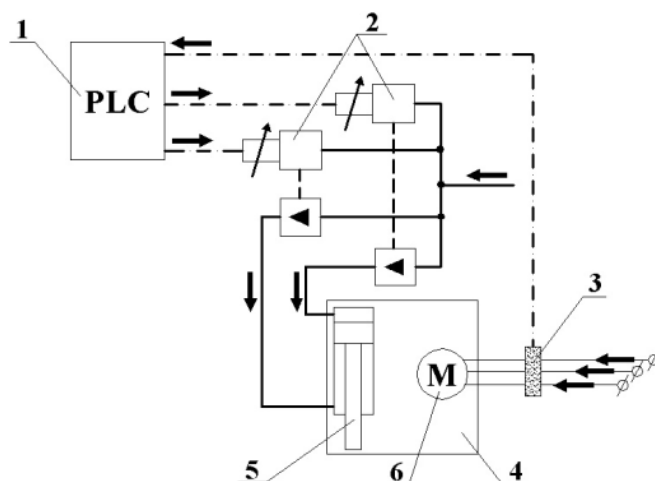


Рис. 5. Общая схема управления усилием прижатия шлифовального круга:

1 – блок управления режимами шлифования; 2 – пропорциональный клапан; 3 – преобразователь регулировочного блока; 4 – шлифовальный блок; 5 – пневмоцилиндр; 6 – электродвигатель привода шлифовального круга

Fig. 5. The pressing force of grinding wheel common control circuit:

1 – grinding modes control unit; 2 – proportional valve; 3 – converter of the adjusting block; 4 – grinding block; 5 – pneumatic cylinder; 6 – grinding wheel drive motor

полагаемого), для которого устанавливаются соответствующие скорость резания и подача, требуется получение эмпирических зависимостей работы всей технологической системы, позволяющих производить дальнейшее проектирование технологических процессов шлифования рельсов для различных условий.

На основании вышеизложенного основной целью проведенных исследований являлось определение оптимальных режимов шлифования рельсов при реализации технологии скоростного шлифования, обеспечивающих максимальную производительность механической обработки с формированием заданных параметров качества обработанной поверхности головки рельса, а также определение основных параметров работы технологического оборудования РШП 2.0, характерных для этих режимов, таких как давление в пневмосистеме прижатия шлифовального круга и токовая нагрузка шлифовальных электродвигателей.

Для реализации поставленной цели решались следующие задачи:

– определение параметров работы пневмосистемы, обеспечивающих требуемые усилия прижатия шлифовального круга к рельсу;

- установление зависимости токовой нагрузки в обмотках электродвигателя от усилия прижатия шлифовального круга к рельсу;
- определение номинальной токовой нагрузки электродвигателя заданным средним значениям усилия прижатия шлифовального круга к рельсу;
- оценка съема металла и шероховатости обработанной поверхности при различных режимах шлифования.

Методика исследований

В настоящее время существует ряд испытательных стендов [19, 20], на которых можно реализовать программу исследовательских испытаний технологии шлифования рельсов. При этом следует отметить, что все имеющиеся на сегодняшний день установки ограничены штатными режимами работы существующих рельсошлифовальных поездов и не позволяют их изменять в достаточно широком диапазоне.

Для выполнения поставленных задач исследования технологии скоростного шлифования рельсов была разработана и изготовлена специальная рельсошлифовальная установка – УРШ.

УРШ состоит из отдельного участка пути длиной 100 м со стандартной колеей 1520 мм (рис. 6, а), по которому перемещается рельсошлифовальная тележка (рис. 6, б). Тележка приводится в движение при помощи привода лебедочного типа, содержащего двигатель, передачу (муфта, тормоз, редуктор одноступенчатый) и барабан с однослойной навивкой (рис. 6, в). В качестве источника энергии используется дизель-генераторная установка (ДГУ) мощностью 200 кВт (рис. 6, г). Работа УРШ в режиме испытаний автоматическая, контролируется системой управления и управляется с персонального компьютера.

Для шлифования используются стандартные рельсы Р50, Р65, Р75, которые устанавливаются по оси пути. При этом уровень головки рабоче-



а



б



в



г

Рис. 6. Общий вид УРШ:

а – участок пути; б – рельсошлифовальная тележка; в – привод; г – ДГУ

Fig. 6. General view of the URSH:

а – section of the railway track; б – rail grinding trolley; в – drive; г – DGS

го рельса (испытательного образца) совпадает с уровнем головки рельса стандартного пути. Закрепление рельса происходит на специальных кронштейнах с возможностью его быстрой смены и возможностью устанавливать рабочий рельс с имитацией различных дефектов реального пути. На рис. 7 представлена схема узла крепления рабочего рельса к стандартному пути.

Рельсошлифовальная тележка представляет собой несамohодную конструкцию на колесах (рис. 8, а) для перемещения по рельсовому пути стандартной колеи. Тележка состоит из основ-

ной рамы, рамы поперечного смещения и рамы поперечного наклона. На основной раме расположена мобильная компрессорная станция для питания пневмоцилиндра прижатия шлифовального круга к рабочему рельсу. На шлифовальной тележке реализована система управления шлифовальной головкой, как на рельсошлифовальном поезде, в соответствии со схемами на рис. 4 и 5 (рис. 8, б).

Рама поперечного наклона с установленным на ней механизмом позволяет обеспечить возможность наклона рамы шлифовального узла

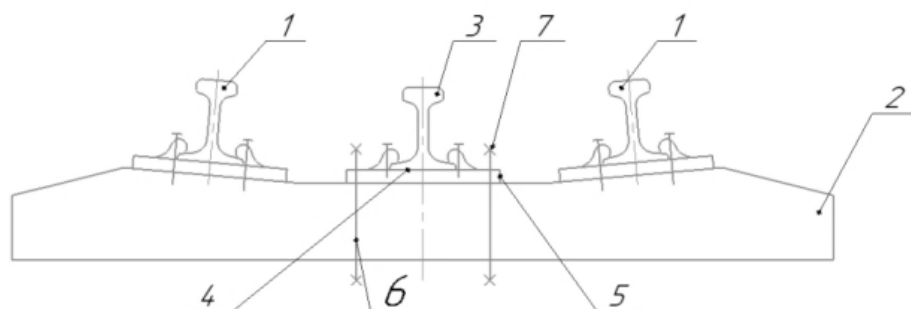


Рис. 7. Узел крепления рабочего рельса:

1 – рельс для перемещения шлифовальной тележки; 2 – шпала; 3 – испытательный образец (рабочий рельс); 4 – проставка; 5 – подкладка; 6 – крепежные шпильки; 7 – гайка

Fig. 7. Mounting unit of the working rail:

1 – rail for moving the sanding trolley; 2 – sleeper; 3 – test sample (working rail); 4 – spacer; 5 – lining; 6 – mounting studs; 7 – nut



а



б

Рис. 8. Устройство шлифовальной тележки:

а – шлифовальная тележка с рамой поперечного смещения; б – шлифовальная люлька с установленной шлифовальной головкой и возможностью поперечного наклона

Fig. 8. Sanding trolley device:

а – grinding trolley with transverse displacement frame; б – a grinding cradle with an installed grinding head and the possibility of transverse inclination

(электродвигателя с кругом) в диапазоне $-20...+70^\circ$ в соответствии со схемой (см. рис. 1, б). Наклон осуществляется при помощи шагового двигателя и передачи «винт – гайка», точность установки требуемого угла составляет $\pm 0,5^\circ$, она обеспечивается кинематикой самой передачи.

В качестве привода шлифовального круга используется штатный электродвигатель РШП, модернизированный для возможности реализации частоты вращения вала 5000 об/мин с моментом на валу электродвигателя, необходимым для обеспечения работы шлифовального круга. Была выполнена следующая модернизация:

1) увеличение номинальной частоты вращения подшипников качения с 4000 до 6700 об/мин за счет замены марки подшипника качения;

2) изменение схемы намотки статора с треугольника (440 В, 60 Гц) на звезду (380 В, 50 Гц) с целью дальнейшего соединения обмоток статора в треугольник для обеспечения повышенной мощности на валу электродвигателя. Фактические расчетные технические характеристики модернизированных шлифовальных электродвигателей представлены в табл. 1.

Рама шлифовального блока устанавливается на осях в подвижной раме поперечного смещения. В раме располагается рычажный механизм с пневматическим приводом, обеспечивающим прижатие шлифовального круга с требуемым

усилием до 3 кН. Механизм также позволяет установить угол атаки шлифовального круга $0,35^\circ$.

Прижатие шлифовального круга к обрабатываемой поверхности рельса осуществляется на основе разности давлений в штоковой и поршневой полостях пневмоцилиндра. Регулировка давлений в полостях пневмоцилиндра осуществляется пропорциональным регулятором давления на основе данных о токовой нагрузке в обмотках шлифовального электродвигателя.

В соответствии с ранее установленными характеристиками технологического процесса скоростного шлифования рельсов УРШ имеет следующие технические характеристики:

– диапазон изменения частоты вращения шлифовального круга – от 3600 до 5000 об/мин;

– диапазон изменения скорости перемещения тележки – от 4 до 30 км/ч;

– диапазон изменения угла наклона шлифовального электродвигателя – от $+20$ до -60° от вертикали;

– угол атаки шлифовального круга составляет $0,35^\circ$ и обеспечивается с раскрытием навстречу рабочему движению тележки;

– диапазон изменения усилия прижатия шлифовального круга к рельсу – от 0 до 5 кН без учета массы шлифовального электродвигателя.

УРШ укомплектовано специальным устройством для тарировки усилия прижатия шлифо-

Таблица 1

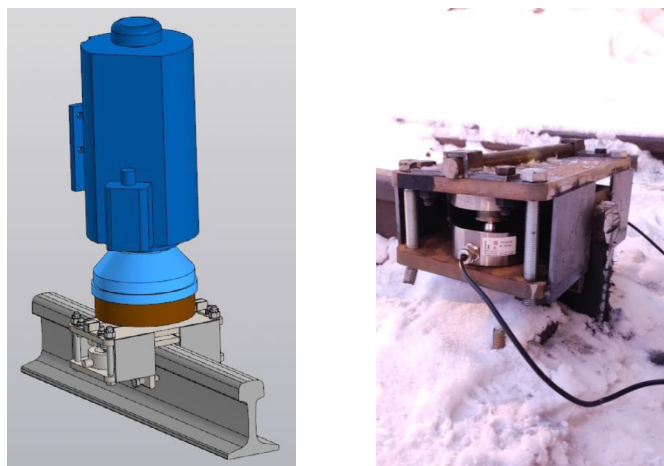
Table 1

Технические характеристики модернизированных электродвигателей

Technical characteristics of modernized electric motors

Схема включения	Режим	Частота тока, Гц	Напряжение, В	Ток, А	Частота вращения, об/мин	Момент на валу, Н·м	Мощность, кВт
Δ	Холостой ход	85	254	24	5100	0	0
	Номинальный режим	85	254	45	5029	49,8	26,2
	Увеличение момента в 1,15 раза от номинального	85	254	56	5019	57,3	30,1
	Увеличение момента в 1,5 раза от номинального	85	254	66	4994	74,7	39,1
	Увеличение момента в 1,63 раза от номинального	85	254	70	4985	81,2	42,4
	Увеличение момента в 2 раза от номинального	85	254	80	4958	99,6	51,7

вального круга к рельсу (рис. 9). Устройство позволяет определять фактическую силу прижатия шлифовального круга к рельсу (в ньютонах) в зависимости от токовой нагрузки в обмотках электродвигателя. Эта зависимость в дальнейшем используется для определения фактических сил резания при работе по значениям токовых нагрузок электродвигателя. Измерение усилия прижатия шлифовального круга к рельсу осуществляется посредством двух датчиков силы.



а

б

Рис. 9. Устройство для тарировки усилия прижатия шлифовального круга к рельсу:

а – 3D-модель устройства; б – общий вид устройства

Fig. 9. Device for calibrating the pressing force of grinding wheel to rail:

а – 3D-model of the device; б – general view of the device

С учетом требований к скоростным шлифовальным кругам [21] исследования технологии скоростного шлифования рельсов осуществлялись с применением шлифовальных кругов «Махаон», рассчитанных на максимальную скорость шлифования 75 м/с (5000 об/мин). Испытания проводились с углом атаки шлифовального круга $0,35^\circ$ на частотах вращения 5000 об/мин. Шероховатость обработанной поверхности оценивалась по параметру R_a .

При проведении исследований использовались следующие средства измерения. Контроль частоты вращения шлифовального круга в процессе шлифования производился электронным тахометром ИТ-5-ЧМ «Термит» и лазерным тахометром «Мегеон 18005». Установка поперечных углов наклона шлифовального электродвигателя и угла атаки шлифовального круга

осуществлялась в соответствии с измерениями цифровым трехосевым акселерометром-инclinометром АЦт 90. Усилие прижатия шлифовального круга к рельсу определялось при помощи тензорезисторного датчика М50-0,5-СЗ, а соответствующее давление в пневмосистеме контролировалось с помощью преобразователей давления ОВЕН ПД100И-ДИ1,6-111-0,5. Для измерения поперечного профиля головки рельса до и после шлифования и оценки съема металла после механической обработки использовался профилограф рельсовый ПР-03. Контроль ширины дорожки шлифования производился штангенциркулем ШЦЦ-I-300-0,01. Шероховатость поверхности образца рельса после механической обработки измерялась портативным прибором TR200.

Результаты и их обсуждение

Перед проведением исследований была выполнена настройка электропривода шлифовальной головки, в ходе которой установлена зависимость токовой нагрузки в обмотках электродвигателя от усилия прижатия шлифовального круга к рельсу.

Для определения параметров пневмосистемы, обеспечивающих требуемое усилие прижатия шлифовального круга к рельсу, и оценки его влияния на режимы работы скоростного электропривода была установлена зависимость силовых параметров от давления в пневмосистеме прижатия шлифовального круга к рельсу (рис. 10).

Из графика (рис. 10) видно, что чем больше давление в пневмосистеме прижатия, тем больше усилие прижатия шлифовального круга к рельсу. При этом установлено, что номинальная сила прижатия реализуется при давлении в пневмосистеме до 0,2 МПа независимо от частоты вращения шлифовального круга.

По результатам испытаний получена зависимость изменения токовой нагрузки в обмотках статора электродвигателя от усилия прижатия шлифовального круга к рельсу. Графически эта зависимость представлена на рис. 11.

На графике (рис. 11) видно, что изменение токовой нагрузки в обмотках статора электродвигателя имеет линейную зависимость от сил, возникающих при шлифовании. При этом установлено, что испытываемому электроприводу

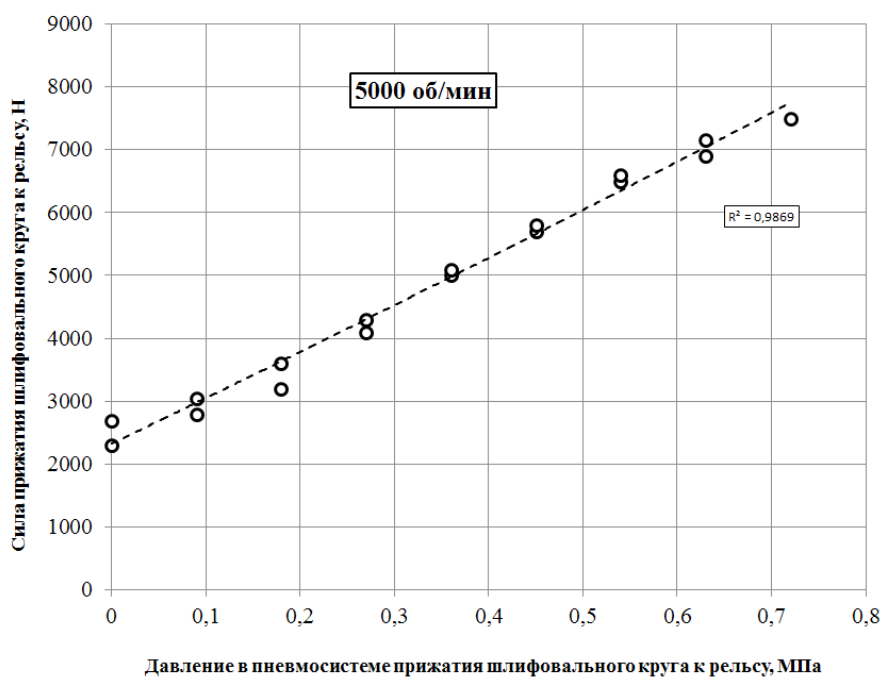


Рис. 10. Зависимость усилия прижатия шлифовального круга к рельсу от давления в пневмосистеме прижатия

Fig. 10. Dependence of the pressing force of grinding wheel to rail on pressure in the pneumatic pressing system

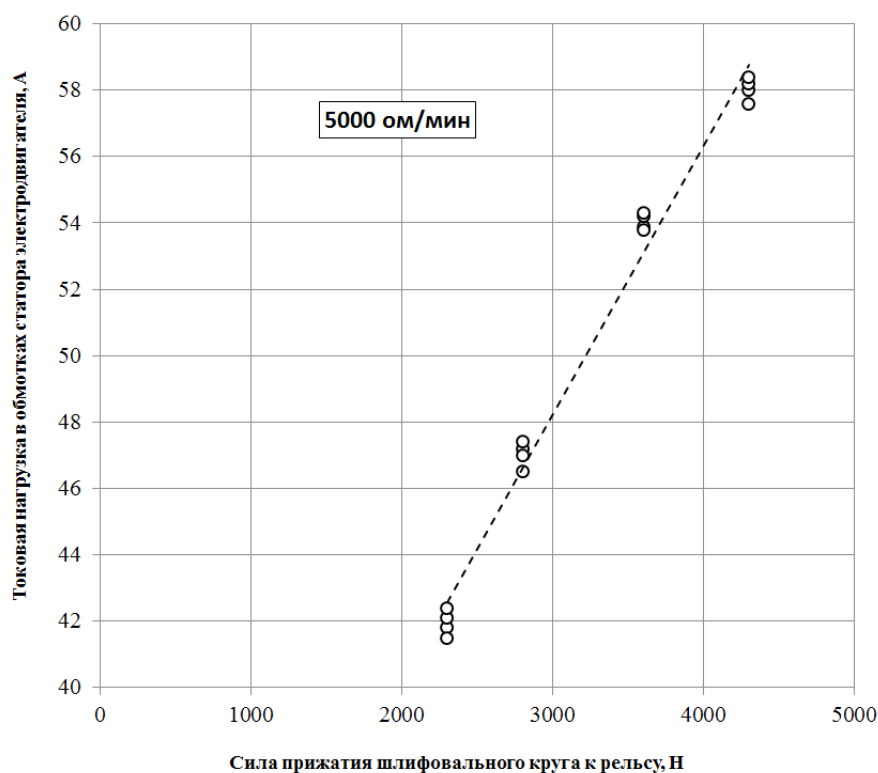


Рис. 11. Зависимость изменения токовой нагрузки в обмотках статора электродвигателя от усилия прижатия шлифовального круга к рельсу

Fig. 11. Dependence of current load change in the stator windings of the electric motor on the force of pressing the grinding wheel to rail

для обеспечения расчетного диапазона номинальной токовой нагрузки 45 А (см. табл. 1) требуется обеспечение усилия прижатия шлифовального круга к рельсу в диапазоне 2500–2800 Н.

Полученные зависимости позволяют регулировать усилие прижатия шлифовального круга к рельсу и обеспечивать номинальные режимы работы скоростного шлифовального электропривода.

Для обеспечения требуемых режимов скоростного шлифования рельсов усилие прижатия

шлифовального круга к рельсу может варьироваться в диапазоне от 0,8 до 1,2 от номинального значения токовой нагрузки (45 А). То есть технологические режимы работы скоростного электропривода по токовой нагрузке составляют от 37 до 53 А, чему соответствует диапазон усилий прижатия шлифовального круга к рельсу 2200–3100 Н.

Результаты испытаний технологии скоростного шлифования рельсов представлены в табл. 2. Графически результаты испытаний представлены на рис. 12–15.

Таблица 2

Table 2

Данные по испытаниям технологии скоростного шлифования рельсов

Test results of high-speed rail grinding technology

№ прохода	Скорость перемещения шлифовальной тележки, км/ч	Частота вращения шлифовального круга, об/мин	Угол поперечного наклона шлифовального электропривода, град	Усилие прижатия шлифовального круга по токовой нагрузке, А	Фактическое усилие прижатия шлифовального круга, Н	Съем металла, мм	Средний съем металла, мм	Шероховатость обработанной поверхности, мкм	Наличие прижогов (+/–)
1	10	5000	–60	51	2706	0,41	0,37	5,8	+
2		5000	–40	51	2704	0,4		5,4	+
3		5000	–20	53	2785	0,37		4,5	+
4		5000	0	55	2827	0,35		4,4	–
5		5000	10	55	2835	0,34		4,8	–
6		5000	20	53	2788	0,32		4,6	–
7	15	5000	–60	51	2712	0,49	0,28	6,2	+
8		5000	–40	51	2710	0,36		5,5	+
9		5000	–20	53	2786	0,25		4,6	–
10		5000	0	55	2832	0,19		3,2	–
11		5000	10	55	2836	0,21		3,8	–
12		5000	20	53	2790	0,20		4,8	–
13	20	5000	–60	51	2706	0,33	0,20	6,6	–
14		5000	–40	51	2704	0,28		5,8	–
15		5000	–20	53	2785	0,22		4,5	–
16		5000	0	55	2827	0,18		3,1	–
17		5000	10	55	2835	0,09		4,2	–
18		5000	20	53	2788	0,12		5,1	–

№ прохода	Скорость перемещения шлифовальной тележки, км/ч	Частота вращения шлифовального круга, об/мин	Угол поперечного наклона шлифовального электродвигателя, град	Усилие прижатия шлифовального круга по токовой нагрузке, А	Фактическое усилие прижатия шлифовального круга, Н	Съем металла, мм	Средний съем металла, мм	Шероховатость обработанной поверхности, мкм	Наличие прижогов (+/-)
25	30	5000	-60	51	2701	0,21	0,11	7,1	-
26		5000	-40	51	2698	0,19		5,7	-
27		5000	-20	53	2783	0,11		4,9	-
28		5000	0	55	2819	0,05		3,6	-
29		5000	10	55	2821	0,07		5,0	-
30		5000	20	53	2785	0,03		5,3	-

Из графика (рис. 12) видно, что максимальный съем металла достигается на максимальных углах наклона шлифовальной головки, где ширина дорожки шлифования минимальна.

Влияние продольной подачи шлифовального круга (скорости перемещения шлифовальной

тележки) на съем металла можно увидеть на рис. 13. С увеличением продольной подачи разница в значениях съема металла увеличивается, что отражено на графике. Для частоты вращения шлифовального круга 5000 об/мин скорость перемещения шлифовальной тележки в 15 км/ч

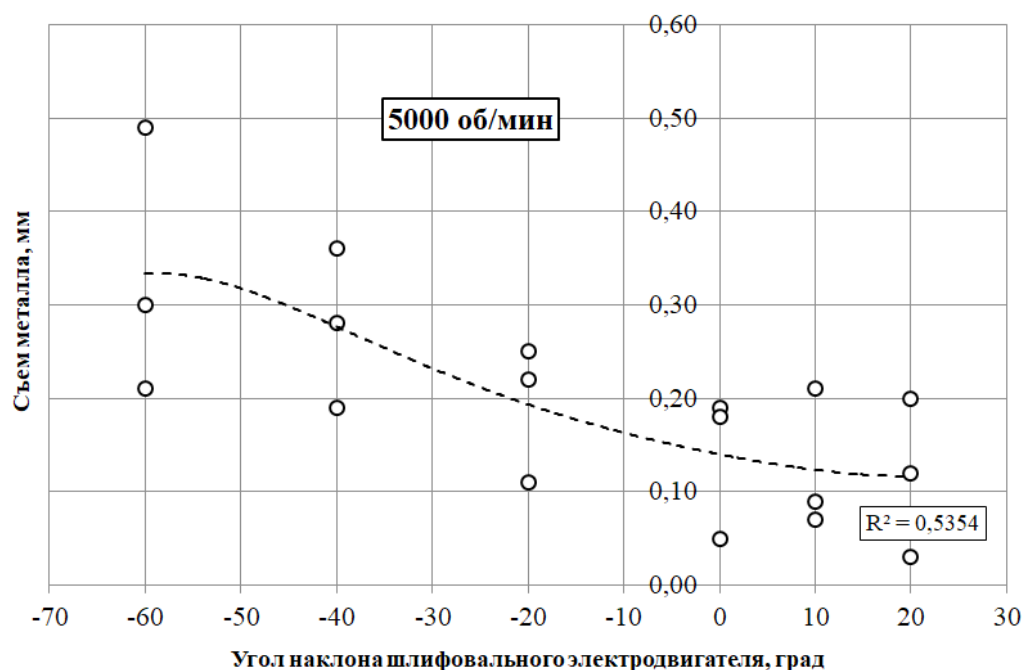


Рис. 12. Съем металла по углам наклона шлифовального электродвигателя

Fig. 12. Removal of metal at the angles of inclination of grinding motor

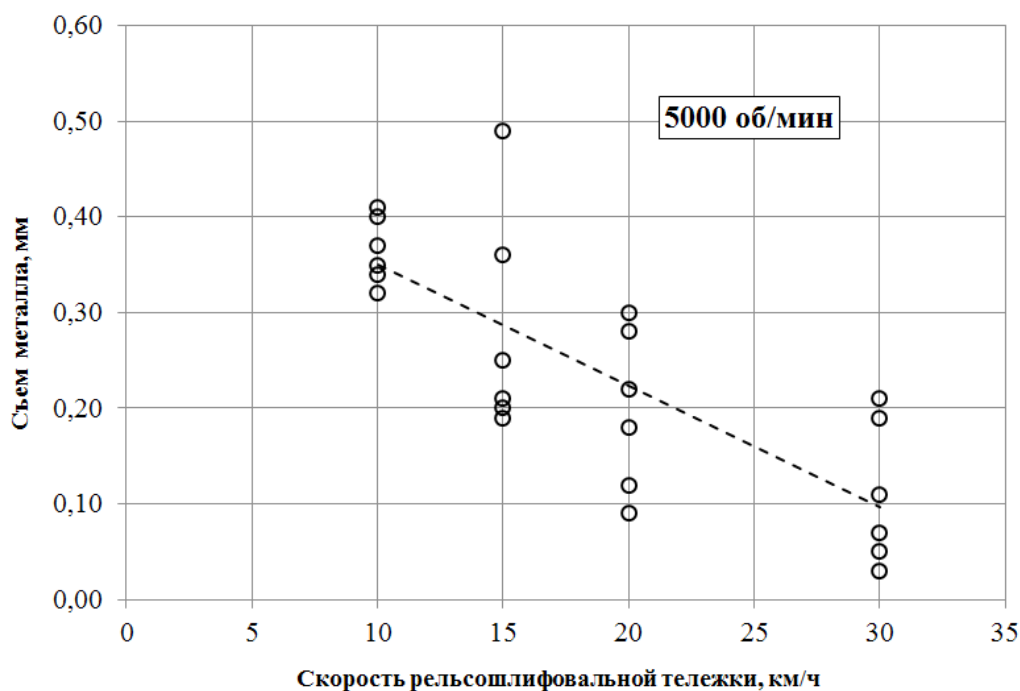


Рис. 13. Зависимость съема металла от режимов шлифования

Fig. 13. Dependence of metal removal on grinding modes

является предельной, после чего с увеличением продольной подачи начинается снижение съема металла. На графике (рис. 13) также можно увидеть, что при 5000 об/мин достижение целевого показателя по съему металла в 0,2 мм возможно на скоростях движения РШП, не превышающих 20 км/ч. Аппроксимируя полученные данные по средним значениям съема металла, можно сделать вывод о возможных режимах работы РШП при скоростном шлифовании по критерию производительности: 5000 об/мин – 15 км/ч; 6000 об/мин – 20 км/ч; 6500 об/мин – 25 км/ч и 7000 об/мин – 30 км/ч.

Приведенные значения справедливы при номинальных значениях усилия прижатия шлифовального круга к рельсу для диапазона токовых нагрузок в обмотках электродвигателя 37–53 А. В дальнейшем при испытаниях опытных образцов электродвигателей промышленного производства эти зависимости требуют уточнения.

Оценка качества отшлифованной поверхности по параметру шероховатости (рис. 14) показала, что характер полученной кривой аналогичен зависимости съема металла по углам наклона шлифовального электродвигателя (рис. 12). Это закономерно, поскольку чем больше угол наклона шлифовального электродвигателя, тем меньше ширина дорожки шлифования,

а удельная нагрузка на единичное зерно больше. Как следствие, внедрение абразивного зерна в обрабатываемую поверхность больше, что дает больший съем металла и соответственно шероховатость поверхности.

Влияние скорости перемещения шлифовальной тележки на формируемую шероховатость поверхности можно увидеть на графике, представленном на рис. 15. На графике видно, что с увеличением рабочей скорости движения шероховатость поверхности возрастает. Это происходит также вследствие влияния количества абразивных зерен, проходящих через элементарную поверхность обрабатываемого рельса. Чем скорость больше, тем таких абразивных зерен будет меньше, а следовательно, шероховатость будет больше. Кроме того, следует отметить, что на всех диапазонах режимов шлифования, использованных при испытаниях, шероховатость формируемой поверхности не превышала установленных нормативной документацией значений по R_a – 6 мкм.

В испытаниях визуально производилась оценка наличия прижогов на отшлифованной поверхности. Проходы, после которых зафиксированы прижоги, отмечены знаком «+» в соответствующем столбце табл. 2. По отмеченным проходам можно установить, что возникновение

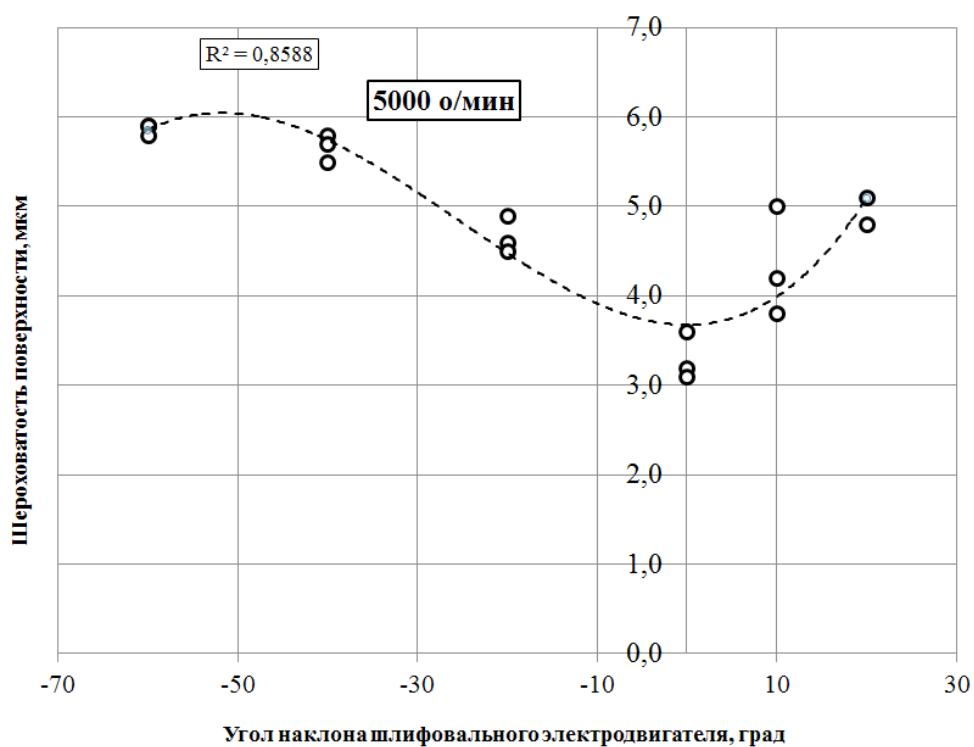


Рис. 14. Шероховатость поверхности по углам наклона шлифовального электродвигателя

Fig. 14. Surface roughness at the angles of inclination of grinding motor

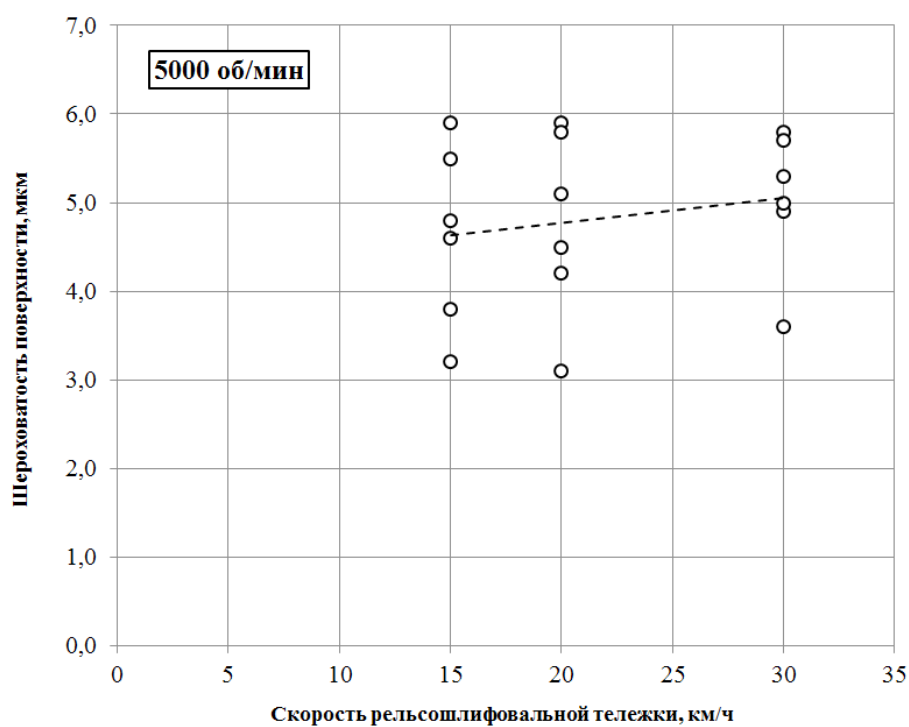


Рис. 15. Зависимость шероховатости обработанной поверхности от режимов шлифования

Fig. 15. Dependence of roughness of the machined surface on grinding modes

прижогов происходит при превышении предельных нагрузок, возникающих во время шлифования. Это характерно при съемах металла, превышающих 0,35 мм.

Выводы

По результатам испытаний установлены следующие параметры рабочего оборудования проектируемого рельсошлифовального поезда, реализующего технологию скоростного шлифования рельсов.

1. Пневмосистема рельсошлифовального поезда должна реализовывать давление прижатия в диапазоне 0,8–1 атм на одну шлифовальную головку для обеспечения необходимого усилия прижатия шлифовального круга к рельсу 2800–2900 Н.

2. Диапазон токовых нагрузок при работе электропривода шлифовальной головки составляет от 37 до 53 А. С учетом долговременной работы электропривода параметры дизель-генераторной установки, системы охлаждения электродвигателей и электропроводка должны быть рассчитаны на максимальную токовую нагрузку с 1,5-кратным запасом, т. е. на 80 А.

3. При производстве и испытании абразивного инструмента для реализации технологии скоростного шлифования рельсов следует учитывать возможные динамические ударные нагрузки величиной до 3500 Н.

Экспериментально определенные параметры позволяют произвести соответствующий выбор комплектующих систем управления рельсошлифовального привода и рабочего оборудования.

Результаты исследований технологии скоростного шлифования рельсов позволяют сделать следующие выводы.

1. Проведенные испытания подтвердили выполнение требований технического задания на рельсошлифовальный поезд 2.0 по производительности. Средняя толщина снятия слоя металла рельса за один проход при максимальной мощности шлифования должна составлять:

- 0,3 мм при рабочей скорости РШП 10 км/ч;
- 0,2 мм при рабочей скорости РШП 15 км/ч.

2. Установлен возможный диапазон формируемой шероховатости обработанной поверхности рельсов в зависимости от режимов шлифования и угла наклона шлифовальной головки.

Возможные значения формируемой шероховатости по R_a – от 3,1 до 5,9 мкм, что соответствует требованиям нормативной документации по содержанию рельсов.

3. Определены допустимые значения режимов шлифования с учетом исключения возникновения прижогов на обработанной поверхности рельса. Наличие прижогов характерно для съема металла более 0,35 мм на скоростях движения шлифовальной тележки до 15 км/ч.

Список литературы

1. Fan W., Liu Y., Li J. Development status and prospect of rail grinding technology for high speed railway // Journal of Mechanical Engineering. – 2018. – Vol. 54, iss. 22. – P. 184–193. – DOI: 10.3901/JME.2018.22.184.
2. Schoch W. Grinding of rails on high-speed railway lines: a matter of great importance // Rail Engineering International. – 2007. – Vol. 36, iss. 1. – P. 6–8.
3. Funke H. Rail grinding. – Berlin: Transpress, 1986. – 153 p.
4. Cuervo P., Santa J., Toro A. Correlations between wear mechanisms and rail grinding operations in a commercial railroad // Tribology International. – 2015. – Vol. 2. – P. 265–273. – DOI: 10.1016/j.triboint.2014.06.025.
5. Long term rail surface damage considering maintenance interventions / V. Krishna, S. Hossein-Nia, C. Casanueva, S. Stichel // Wear. – 2020. – Vol. 460–461. – P. 203462. – DOI: 10.1016/j.wear.2020.203462.
6. Application of grinding to reduce rail side wear in straight track / J. Ding, R. Lewis, A. Beagles, J. Wang // Wear. – 2018. – Vol. 402–403. – P. 71–79. – DOI: 10.1016/j.wear.2018.02.001.
7. Ilinykh A., Matafonov A., Yurkova E. Efficiency of the production process of grinding rails on the basis of optimizing the periodicity of works // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2019. – Vol. 1116. – P. 672–681. – DOI: 10.1007/978-3-030-37919-3_67.
8. Ильиных А.С. Скоростное шлифование рельсов в пути // Мир транспорта. – 2011. – № 3. – С. 56–61.
9. Повышение производительности рельсошлифовальных поездов методом скоростного шлифования / А.С. Ильиных, А.С. Пикалов, М.С. Галай, В.К. Милорадович // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2022. – № 4 (216). – С. 46–56. – DOI: 10.17213/15603644202244656.
10. Doman D., Warkentin A., Bauer R. A survey of recent grinding wheel topography models // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2006. –



Vol. 46, iss. 3. – P. 343–352. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.05.013.

11. Experimental observation of tool wear in rotary ultrasonic machining of advanced ceramics / W. Zenga, Z. Lib, Z. Peib, C. Treadwell // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2005. – Vol. 45, iss. 12–13. – P. 1468–1473.

12. Jeong W., Shin J. Grinding effect analysis according to control variables of compact rail surface grinding machine // *Journal of the Korean Society for Railway*. – 2020. – Vol. 23, iss. 7. – P. 688–695. – DOI: 10.7782/JKSR.2020.23.7.688.

13. Koshin A.A., Chaplygin B.A., Isakov D.V. Adequacy of the operating conditions of abrasive grains // *Russian Engineering Research*. – 2011. – Vol. 31, N 12. – P. 1221–1226.

14. Особенности формирования технологического процесса плоского шлифования торцом круга при упругой подвеске шлифовальной головки / А.С. Ильиных, В.А. Аксенов, М.С. Галай, А.В. Матафонов // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. – 2016. – Т. 18, № 4. – С. 34–47. – DOI: 10.15593/2224-9877/2016.4.03.

15. A laboratory demonstration of rail grinding and analysis of running roughness and wear / M. Mesari-tis, M. Shamsa, P. Cuervo, J. Santa, A. Toro, M. Marshall, R. Lewis // *Wear*. – 2020. – Vol. 456–457. – DOI: 10.1016/j.wear.2020.203379.

16. Satoh Y., Iwafuchi K. Effect of rail grinding on rolling contact fatigue in railway rail used in conventional line in Japan // *Wear*. – 2008. – Vol. 265, iss. 9–10. – P. 1342–1348. – DOI: 10.1016/j.wear.2008.02.036.

17. Modelling and simulation of the grinding force in rail grinding that considers the swing angle of the grinding stone / K. Zhou, H. Ding, S. Zhang, J. Guo, Q. Liu, W. Wang // *Tribology International*. – 2019. – Vol. 137. – P. 274–288. – DOI: 10.1016/j.triboint.2019.05.012.

18. Experimental investigation on material removal mechanism during rail grinding at different forward speeds / K. Zhou, H. Ding, R. Wang, J. Yang, J. Guo, Q. Liu, W. Wang // *Tribology International*. – 2020. – Vol. 143. – P. 106040. – DOI: 10.1016/j.triboint.2019.106040.

19. Influence of rail grinding process parameters on rail surface roughness and surface layer hardness / E. Uhlmann, P. Lypovka, L. Hochschild, N. Schröer // *Wear*. – 2016. – Vol. 366–367. – P. 287–293. – DOI: 10.1016/j.wear.2016.03.023.

20. Jeong W., Shin J. Grinding effect analysis according to control variables of compact rail surface grinding machine // *Journal of the Korean Society for Railway*. – 2020. – Vol. 23, iss. 7. – P. 688 – 695. – DOI: 10.7782/JKSR.2020.23.7.688.

21. Ilinykh A.S. Design of abrasive tool for high-rate grinding // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2017. – Vol. 53. – P. 012024. – DOI: 10.1088/1755-1315/53/1/012024.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2023 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Experimental studies of high-speed grinding rails modes

Andrey Ilinykh^{1, a, *}, Aleksandr Pikalov^{2, b}, Vladimir Miloradovich^{2, c}, Marina Galay^{1, d}

¹ Siberian Transport University, 191 Dusy Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, Russian Federation

² Moscow Center for Infrastructure Technologies JSC "STM", 4B Podkopaevsky pereulok, 109028, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-4234-6216>, asi@stu.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-9584-9896>, pikalov.2023@internet.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0002-8258-5801>, vmiloradovich@internet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7897-1750>, galayms@mail.ru.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 17 May 2023

Revised: 29 May 2023

Accepted: 16 June 2023

Available online: 15 September 2023

Keywords:

Rail grinding
Abrasive processing
Grinding modes
Railway track

Funding

The research was carried out with the financial support of subsidies from the Federal Budget for the development of cooperation between Russian educational institutions of higher education, state scientific institutions and organizations of the real sector of the economy in order to implement complex projects to create high-tech industries. The financial support is stipulated by the Decree of the Government of the Russian Federation of April 9, 2010 No. 218 on the topic "High-performance technology for high-speed rail grinding and equipment for its implementation based on intelligent digital modules", agreement No. 075-11-2022-014 of April 08, 2022.

Acknowledgements

Research was partially conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials".

ABSTRACT

Introduction. Rails' grinding in the conditions of a railway track is a priority for extending its life cycle due to the timely removal of tread surface defects and formation of required transverse profile. Today, 14 RSHP-48 rail grinding trains are used in Russia. At the same time, most rail grinding trains are ending its service life. Therefore, the development of a fundamentally new rail grinding train with increased efficiency is an urgent task. Siberian transport university is working together with the Kaluga plant "Rempumash" to create a new rail grinding train named RSHP 2.0. The rail grinding train RSHP 2.0 is based on the technology of high-speed rail grinding, which is based on increasing working speed of rail grinding train by increasing rotational speed of grinding wheels and setting the angle of attack. **The aim of this work is** to study rails' grinding modes on a specially designed installation URSH, which implements the technology of high-speed grinding rails by increasing speed of grinding wheels rotation up to 5,000 rpm. **Research methods.** Grinding wheel speed control was carried out by IT-5-ChM "Termit" electronic tachometer and "Megeon 18005" laser tachometer. The angle of attack of grinding wheel was measured by digital, three-axis accelerometer-inclinometer ATst 90. The force of pressing grinding wheel to the rail was evaluated by strain-resistive sensors M50-0.5-C3. The measurement of head rail transverse profile before and after grinding and evaluation of metal removal were carried out by a PR-03 rail profiler. The width of grinding track was controlled by ShTsTs-I-300-0.01 caliper. The surface roughness of rail sample after machining was measured by TR 200 portable instrument. **Results and discussion.** Based on research results of CRS, the parameters of the working equipment of designed grinding rail train, which implements the technology of high-speed rail grinding, the influence of grinding modes on the formation of the quality parameters of the machined rail surface are established, and the optimal values of the forces of pressing the grinding wheel to the rail are determined.

For citation: Ilinykh A.S., Pikalov A.S., Miloradovich V.K., Galay M.S. Experimental studies of high-speed grinding rails modes. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 3, pp. 19–35. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.3-19-35. (In Russian).

* Corresponding author

Ilinykh Andrey S., D.Sc. (Engineering), Professor
Siberian Transport University,
191 Dusy Kovalchuk st.,
630049, Novosibirsk, Russian Federation
Tel.: +7 (383) 328-03-92, e-mail: asi@stu.ru



References

1. Fan W., Liu Y., Li J. Development status and prospect of rail grinding technology for high speed railway. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, vol. 54, iss. 22, pp. 184–193. DOI: 10.3901/JME.2018.22.184.
2. Schoch W. Grinding of rails on high-speed railway lines: a matter of great importance. *Rail Engineering International*, 2007, vol. 36, iss. 1, pp. 6–8.
3. Funke H. *Rail grinding*. Berlin, Transpress, 1986. 153 p.
4. Cuervo P., Santa J., Toro A. Correlations between wear mechanisms and rail grinding operations in a commercial railroad. *Tribology International*, 2015, vol. 2, pp. 265–273. DOI: 10.1016/j.triboint.2014.06.025.
5. Krishna V., Hossein-Nia S., Casanueva C., Stichel S. Long term rail surface damage considering maintenance interventions. *Wear*, 2020, vol. 460–461, p. 203462. DOI: 10.1016/j.wear.2020.203462.
6. Ding J., Lewis R., Beagles A., Wang J. Application of grinding to reduce rail side wear in straight track. *Wear*, 2018, vol. 402–403, p. 71–79. DOI: 10.1016/j.wear.2018.02.001.
7. Ilinykh A., Matafonov A., Yurkova E. Efficiency of the production process of grinding rails on the basis of optimizing the periodicity of works. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2019, vol. 1116, pp. 672–681. DOI: 10.1007/978-3-030-37919-3_67.
8. Ilinykh A.S. Skorostnoe shlifovanie rel'sov v puti [Speed rail grinding]. *Mir transporta = World of Transport and Transportation*, 2011, no. 3, pp. 56–61.
9. Ilinykh A.S., Pikalov A.S., Galay M.S., Miloradovich V.K. Povyshenie proizvoditel'nosti rel'soshlifoval'nykh poezdov metodom skorostnogo shlifovaniya [Increasing the performance of rail grinding trains by the method of speed grinding]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Tekhnicheskie nauki = University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series*, 2022, no. 4 (216), pp. 46–56. DOI: 10.17213/15603644202244656.
10. Doman D., Warkentin A., Bauer R. A survey of recent grinding wheel topography models. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, vol. 46, iss. 3, pp. 343–352. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.05.013.
11. Zenga W., Lib Z., Peib Z., Treadwell C. Experimental observation of tool wear in rotary ultrasonic machining of advanced ceramics. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005, vol. 45, iss. 12–13, pp. 1468–1473.
12. Jeong W., Shin J. Grinding effect analysis according to control variables of compact rail surface grinding machine. *Journal of the Korean Society for Railway*, 2020, vol. 23, iss. 7, pp. 688–695. DOI: 10.7782/JKSR.2020.23.7.688.
13. Koshin A.A., Chaplygin B.A., Isakov D.V. Adequacy of the operating conditions of abrasive grains. *Russian Engineering Research*, 2011, vol. 31, no. 12, pp. 1221–1226.
14. Aksenov V.A., Ilinykh A.S., Galay M.S., Matafonov A.V. Osobennosti formirovaniya tekhnologicheskogo protsessa ploskogo shlifovaniya tortsom kruga pri uprugoi podveske shlifoval'noi golovki [Features of formation of the flat grinding technological process by an end face of a circle with an elastic suspension grinding head]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroyeniye, materialovedeniye = Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2016, vol. 18, no. 4, pp. 34–47. DOI: 10.15593/2224-9877/2016.4.03.
15. Mesaritis M., Shamsa M., Cuervo P., Santa J., Toro A., Marshall M., Lewis R. A laboratory demonstration of rail grinding and analysis of running roughness and wear. *Wear*, 2020, vol. 456–457. – DOI: 10.1016/j.wear.2020.203379.
16. Satoh Y., Iwafuchi K. Effect of rail grinding on rolling contact fatigue in railway rail used in conventional line in Japan. *Wear*, 2008, vol. 265, iss. 9–10, pp. 1342–1348. DOI: 10.1016/j.wear.2008.02.036.
17. Zhou K., Ding H., Zhang S., Guo J., Liu Q., Wang W. Modelling and simulation of the grinding force in rail grinding that considers the swing angle of the grinding stone. *Tribology International*, 2019, vol. 137, pp. 274–288. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.05.012.
18. Zhou K., Ding H., Wang R., Yang J., Guo J., Liu Q., Wang W. Experimental investigation on material removal mechanism during rail grinding at different forward speeds. *Tribology International*, 2020, vol. 143, p. 106040. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.106040.
19. Uhlmann E., Lypovka P., Hochschild L., Schröer N. Influence of rail grinding process parameters on rail surface roughness and surface layer hardness. *Wear*, 2016, vol. 366–367, pp. 287–293. DOI: 10.1016/j.wear.2016.03.023.
20. Jeong W., Shin J. Grinding effect analysis according to control variables of compact rail surface grinding machine. *Journal of the Korean Society for Railway*, 2020, vol. 23, iss. 7, pp. 688–695. – DOI: 10.7782/JKSR.2020.23.7.688.
21. Ilinykh A.S. Design of abrasive tool for high-rate grinding. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 53, p. 012024. DOI: 10.1088/1755-1315/53/1/012024.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.