



# Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Теоретический анализ способов пассивного шлифования рельсов

Андрей Ильиных<sup>a,\*</sup>, Виктор Банул<sup>b</sup>, Денис Воронцов<sup>c</sup>

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

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4234-6216>, [asi@stu.ru](mailto:asi@stu.ru), <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4257-2686>, [banul@ngs.ru](mailto:banul@ngs.ru),  
<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3819-781X>, [voroncovds@stu.ru](mailto:voroncovds@stu.ru)

### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.923

#### История статьи:

Поступила: 15 июня 2022  
 Рецензирование: 29 июня 2022  
 Принята к печати: 05 июля 2022  
 Доступно онлайн: 15 сентября 2022

#### Ключевые слова:

Шлифование рельсов  
 Пассивное шлифование  
 Эффективность механической обработки  
 Производительность шлифования

#### Финансирование:

Исследование выполнено при финансовой поддержке субсидий из Федерального бюджета на развитие кооперации российских образовательных организаций высшего образования, государственных научных учреждений и организаций реального сектора экономики в целях реализации комплексных проектов по созданию высокотехнологических производств.

#### Благодарности:

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Существуют различные технологии механической обработки рельсов, предназначенные для устранения дефектов на поверхности катания и продления их жизненного цикла. Наиболее распространенной является технология шлифования рельсов вращающимися шлифовальными кругами с применением рельсошлифовальных поездов. Основной ее недостаток – низкая рабочая скорость перемещения шлифовального поезда, требующая организации технологических окон с остановкой движения поездов по перегону. Для выполнения профилактического шлифования рельсов с минимальным съемом металла с головки рельса в последние годы получают распространение технологии пассивного шлифования с применением шлифовальных кругов. Пассивное шлифование – это когда на шлифовальном круге отсутствует мощность для активного его вращения. Такие методы позволяют достигать высоких скоростей движения шлифовального поезда, а работы можно осуществлять в графике движения поездов без закрытия перегона. В настоящее время технологии пассивного шлифования являются относительно новыми и не обладают необходимой научной базой для осуществления оптимизации процесса механической обработки. **Цель работы.** Теоретические исследования кинематического и силового анализа двух методов пассивного шлифования рельсов: периферией и торцом шлифовального круга. **Методология проведения работы:** кинематический и силовой расчет схем шлифования рельсов. **Результаты и их обсуждение.** В рамках теоретических исследований проведен кинематический и силовой анализ двух методов пассивного шлифования, на основании которого определены оптимальные условия их реализации. Установлено, что метод пассивного шлифования периферией круга имеет большую на 20 % производительность и энергоэффективность процесса перед торцевым пассивным шлифованием за счет большей скорости вращения шлифовального круга при равных усилиях его прижатия к рельсу. При этом пассивное шлифование торцом круга отличается большим в 2 раза диапазоном изменения как скорости вращения шлифовального круга, так и усилия его прижатия, что позволяет при равных скоростях движения шлифовальных поездов достичь большего съема металла. В заключении сформулированы перспективные задачи дальнейших исследований в области пассивного шлифования рельсов.

**Для цитирования:** Ильиных А.С., Банул В.В., Воронцов Д.С. Теоретический анализ способов пассивного шлифования рельсов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 3. – С. 22–39. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.3-22-39.

## Введение

На сегодняшний день в условиях интенсификации работы железных дорог вопросам содержания железнодорожного пути и, в частности, рельсов уделяется особое внимание. Одним из

#### \*Адрес для переписки

Ильиных Андрей Степанович, д.т.н., доцент  
 Сибирский государственный университет путей сообщения,  
 ул. Дуси Ковальчук, 191,  
 630049, г. Новосибирск, Россия  
 Тел.: 8 (383) 328–04–13, e-mail: [asi@stu.ru](mailto:asi@stu.ru)

приоритетных направлений, которое позволяет продлить жизненный цикл рельсов, является технология их шлифования в условиях железнодорожного пути [1–3]. Задачи, возлагаемые на данный вид технологического воздействия, обширные и могут заключаться как в предотвращении образования дефектов контактно-усталостного характера, так и удалении уже имеющихся дефектов и формировании требуемого профиля рельсов [4]. В связи с этим в зависимости от поставленных задач разделяют шлифование превентивное (предупредительное, профилактическое), ремонтное (корректирующее) и восстановительное (профилирующее). Каждый из указанных подходов определяет технологию его реализации [5]. Так, восстановительное шлифование характеризуется необходимостью большого съема металла с рельса при относительно невысоких скоростях движения рельсошлифовального поезда (РШП), а, в свою очередь, превентивное шлифование должно выполняться на максимальных скоростях дви-

жения РШП с относительно небольшим съемом металла рельса (см. таблицу). Эффективно реализовать такой диапазон режимов работы на одном виде технологического оборудования невозможно [6–8]. Применяемые на сегодняшний день рельсошлифовальные поезда типа RR–48, РШП–48 и РШП–48К ограничиваются следующими режимами шлифования: рабочая скорость РШП от 4 до 8 км/ч; средний съем металла от 0,05 до 0,3 мм за проход. При этом реализуется схема «активного» шлифования, которая заключается в плоском торцевом шлифовании вращающимися абразивными кругами с частотой вращения 3600 об/мин, которые приводятся во вращение электродвигателями. Таким образом, использование указанных типов рельсошлифовальных поездов в профилактических целях крайне не эффективно, поскольку невозможно производить работы по шлифованию на скоростях РШП, превышающих 8 км/ч, даже при минимальном съеме металла.

### Технологические воздействия по шлифованию рельсов

#### Technological impacts of rail grinding

Технологическое воздействие / Technological impact	Цель воздействия / The purpose of the impact	Технология обработки / Machining technology
Превентивное (предупредительное, профилактическое) / Preventive (prophylactic)	Недопущение образования поверхностных дефектов рельсов / Preventing the formation of surface defects in rails	Незначительный съем металла (до 0,1 мм) на больших скоростях движения (до 90 км/ч) / Insignificant metal removal (up to 0.1 mm) at high speeds (up to 90 km/h)
Ремонтное (корректирующее) / Repair (corrective)	Удаление поверхностных дефектов рельсов, устранение волнообразного износа, корректировка поперечного профиля рельса / Removal of surface defects of rails, elimination of wave-like wear, correction of the cross profile of the rail	Большой съем металла (до 1,5 мм) на отдельных участках головки рельса на средних скоростях движения (до 15 км/ч) / Heavy metal removal (up to 1.5 mm) in certain sections of the rail head at medium speeds (up to 15 km/h)
Восстановительное (профилирующее) / Restorative (profiling)	Восстановление поперечного (ремонтного) профиля рельсов, перепрофилирование старогодных рельсов и при переукладке рельсов в кривых участках пути / Restoration of the transverse (repair) profile of rails, reprofiling of old-year rails and when relaying rails in curved track sections	Большой съем металла (до 3,5 мм) по всему поперечному профилю рельса на малых скоростях движения (до 6 км/ч) / Heavy metal removal (up to 3.5 mm) along the entire transverse profile of the rail at low speeds (up to 6 km/h)

Еще одним фактором, оказывающим значительное влияние на эффективность процесса шлифования рельсов, – это необходимость организации технологических окон для производства работ. Существующие скорости работы РШП (до 8 км/ч) не позволяют их использовать в рамках расписания движения пассажирских и грузовых составов, что приводит к необходимости закрытия для движения целых перегонов – организация технологических окон и, как следствие, к возникновению больших финансовых затрат, вызванных уменьшением пропускных способностей участков железнодорожного пути [9].

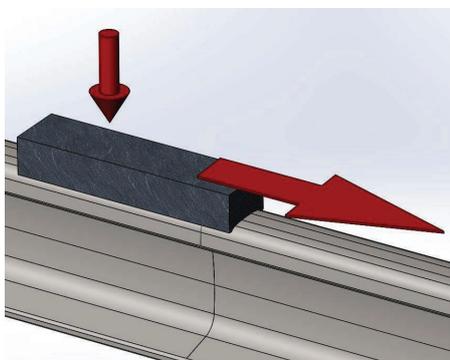
На основании вышеизложенного актуальной проблемой путевого комплекса железных дорог является расширение технологических возможностей рельсошлифовальных поездов. Ключевой задачей в решении указанной проблемы является повсеместное увеличение рабочей скорости рельсошлифовальных поездов с целью исключения или, как минимум, сокращения продолжительности технологических окон. Наиболее перспективным является повышение скоростей РШП при выполнении работ по профилактическому и корректирующему шлифованию с незначительными съемами металла рельса [10, 11].

Технология шлифования рельсов с момента своего появления была направлена прежде всего на недопущение образования волнообразного износа рельсов, пробуксовок и поверхностных дефектов на наиболее нагруженных участках

пути, т. е. носила профилактический характер. С этой целью начиная с 60-х годов XX века применялась технология пассивного шлифования рельсов [12]. Термин – «пассивное» в данном случае характеризует отсутствие у абразивного инструмента дополнительных движений (как правило, вращательного или возвратно-поступательного) за счет специальных приводных механизмов. Шлифование происходит только за счет прижатия и продольного перемещения инструмента.

Реализация данной технологии на отечественных железных дорогах осуществлялась при помощи так называемых рельсошлифовальных вагонов (РШВ), которые также выполняли функцию рельсооткалывания. В движение эти вагоны приводились локомотивом. Принцип их работы заключался в прижатии к рельсу с постоянным усилием абразивных брусков (рис. 1, а), которые находились на ходовых тележках вагонов между колесными парами (рис. 1, б). Таким образом, при движении вагонов производилось шлифование поверхности катания головки рельса.

Данная технология шлифования предполагала рабочее перемещение РШВ на достаточно высоких скоростях – до 60 км/ч и не требовала организации технологических окон. При этом она обладала рядом существенных недостатков, таких, как быстрое засаливание абразивных брусков и необходимость их приработки под конкретный поперечный профиль рельса. Кроме того, в процессе шлифования формировались только продольные риски на обработанной по-



а



б

Рис. 1. Рельсошлифовальный вагон РШВ:

а – принципиальная схема шлифования; б – общий вид шлифовального оборудования РШВ

Fig. 1. Railgrinder RShV:

а – grinding schematic diagram; б – general view of the grinding equipment

верхности рельса, что снижало эффективность удаления металла.

В силу указанных недостатков и низкой эффективности процесса брускового пассивного шлифования к середине 90-х годов XX века он был практически полностью заменен на технологию шлифования рельсов с применением «активных» рабочих органов – вращающихся шлифовальных кругов. Но, как было отмечено ранее, РШП, реализующие технологию активного шлифования рельсов, значительно ограниченные по скорости рабочего перемещения, могут работать только в «окно» и, как правило, используются для ремонтного и восстановительного шлифования. Таким образом, вопрос организации превентивного шлифования рельсов усложнялся отсутствием соответствующего оборудования, способного шлифовать рельсы на больших скоростях движения.

С растущей плотностью и скоростью грузовых и пассажирских перевозок, развитием высокоскоростного движения потребность в профилактическом шлифовании без нарушения движения поездов только возрастала. В этой связи в начале 2000-х годов немецкой компанией Stahlberg-Rönsch (SRL) был предложен способ пассивного высокоскоростного шлифования рельсов периферией шлифовального круга – High Speed Grinding (HSG), который в некоторой степени исключал недостатки известного брускового пассивного шлифования [13–14] (далее – метод HSG).

В методе HSG предложено производить одновременное шлифование верхней и боковой рабочих поверхностей головки рельса с помощью цилиндрических шлифовальных кругов. Эти круги имеют возможность свободного вращения вокруг своей оси и прижимаются соответствующим механизмом к головке рельса под заданным углом к направлению движения. Вращение шлифовальных кругов осуществляется за счет действия сил трения между поверхностями рельса и круга при продольном перемещении абразивного инструмента (рис. 2, а). Таким образом, в ходе самопроизвольного проворачивания шлифовального круга обеспечивается непрерывная обновляемость рабочей поверхности абразивного инструмента и, как следствие, исключается его засаливание [14, 15].

В 2007 году компания SRL построила машину, работающую по методу HSG. Новый рельсошлифовальный поезд RC-01 включал 96 шлифовальных кругов (рис. 2, б) и мог производить шлифование на скоростях до 80 км/ч, удаляя при этом слой металла толщиной около 0,05 мм за проход. На тот момент RC-01 был первым в мире и единственным рельсошлифовальным поездом, который применялся для шлифования рельсов без закрытия перегона и вписывался в рамки регулярного графика движения грузовых и пассажирских поездов. RC-01 работал на основных направлениях и высокоскоростных линиях Deutsche Bahn Netz AG [14, 15].

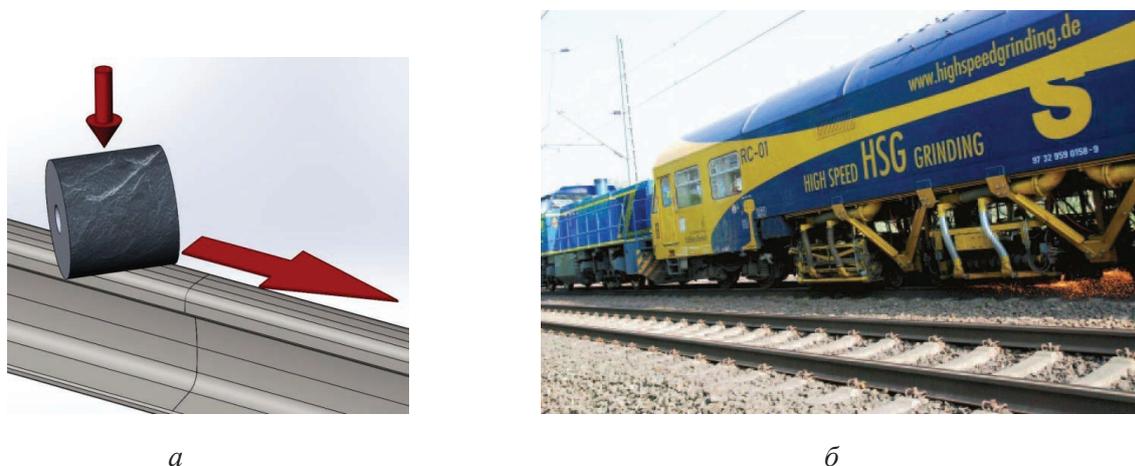


Рис. 2. Рельсошлифовальный поезд RC-01:

а – принципиальная схема шлифования; б – общий вид шлифовального оборудования RC-01

Fig. 2. Railway grinding train RC-01:

а – grinding schematic diagram; б – general view of the grinding equipment

В дальнейшем компания SRL вошла в состав группы компаний Vossloh, и на сегодняшний день метод HSG является ее уникальной технологией. С помощью данной технологии, а также на основе накопленного опыта эксплуатации шлифовального поезда RC-01 в Vossloh разработали и в 2010 году изготовили новый рельсошлифовальный поезд – HSG-2 (рис. 3). В новой машине был использован все тот же метод HSG (см. рис. 2, а), при этом максимальная рабочая скорость поезда была увеличена до 100 км/ч [15].

Новая шлифовальная машина позволила Vossloh стать первой частной компанией, предоставляющей услуги по профилактическому техническому обслуживанию высокоскоростных участков железных дорог в Европе и Китае.

При всех положительных моментах у метода HSG имеется и недостаток. Основной отрицательной стороной метода пассивного шлифования периферией шлифовального круга является

необходимость приработки абразивного инструмента под обрабатываемый поперечный профиль рельса.

Так, в начальный момент обработки шлифовальный круг имеет цилиндрическую форму и его контакт с рельсом осуществляется по поверхности катания (рис. 4, а). В процессе шлифования абразивный круг начинает изнашиваться и принимать очертания профиля рельса, при этом контакт круга с рельсом расширяется (рис. 4, б). При дальнейшей обработке абразивный круг полностью прирабатывается и охватывает шлифованием как верхнюю, так и боковую рабочую поверхности рельса (рис. 4, в).

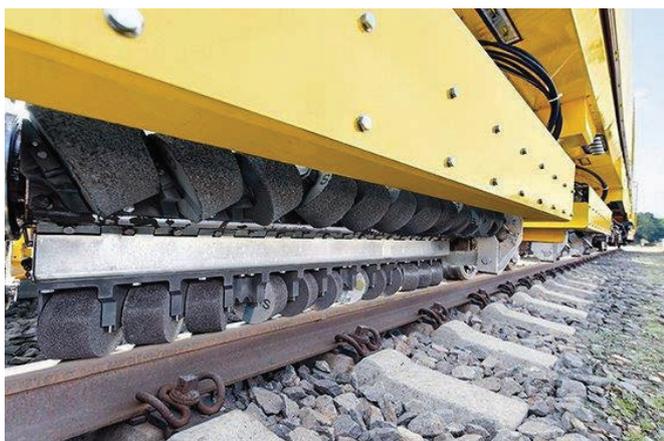
Таким образом, от момента начала шлифования до полной приработки абразивного инструмента должно пройти определенное количество времени. С учетом того, что рабочая скорость рельсошлифовального поезда составляет около 100 км/ч, поезд проезжает значительную часть пути, на которой профиль рельса остается не полностью обработанным. Кроме того, следует отметить, что геометрия поперечного профиля рельса на различных участках железнодорожного пути может быть неодинакова, т. е. можно предполагать, что при определенных условиях, абразивные круги могут частично находиться в состоянии приработки до полного своего износа. Особенно это характерно при наличии кривых участков пути различного радиуса, спусков или подъемов, участков торможения или разгона на обрабатываемом перегоне.

Для исключения указанного недостатка метода HSG в Сибирском государственном университете путей сообщения (СГУПС) предложен способ пассивного шлифования торцом абразивного круга [16]. В предлагаемом способе расположение шлифовальных кругов относительно рельса аналогично методу активной обработки вращающимися шлифовальными кругами, применяемому на рельсошлифовальных поездах типа РШП (рис. 5), при этом абразивный инструмент не имеет привода от электродвигателя и свободно закреплен на оси вращения.

Шлифование в данном случае происходит за счет прижатия торца абразивного круга к обрабатываемой поверхности рельса и одновременной его установки с эксцентриситетом  $e$  относительно соответствующей дорожки шлифования (рис. 6). Тем самым обеспечивается пассивное



а



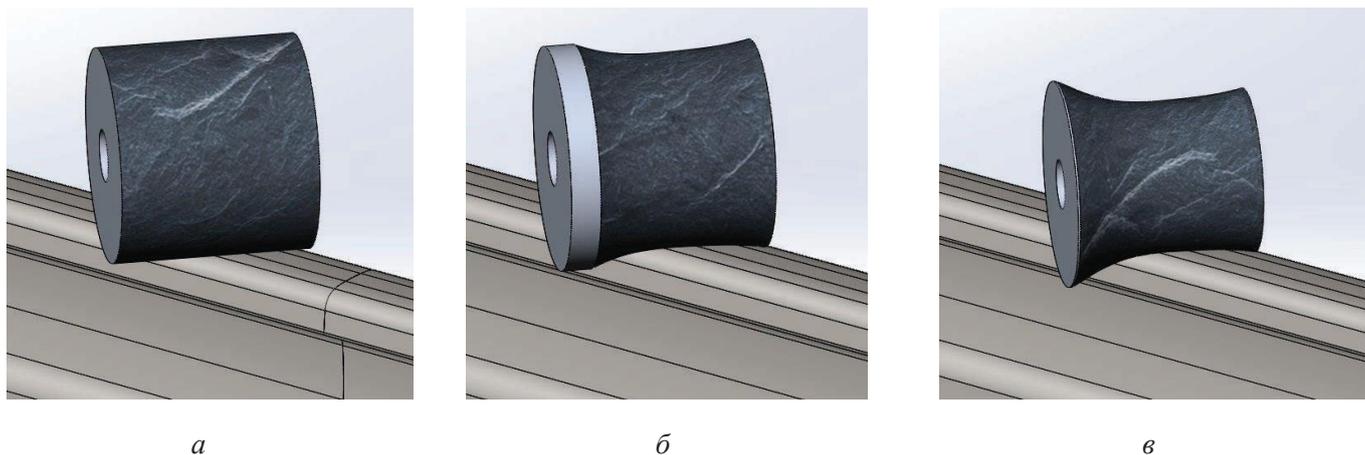
б

Рис. 3. Рельсошлифовальный поезд HSG-2:

а – общий вид HSG-2; б – общий вид шлифовального оборудования HSG-2

Fig. 3. Railway grinding train HSG-2:

а – general view of HSG-2; б – general view of grinding equipment HSG-2

*a**б**в*

*Рис. 4.* Схема приработки абразивного круга в технологии HSG:

*a* – начало работы; *б* – процесс приработки; *в* – приработанный инструмент

*Fig. 4.* The scheme of breaking-in of an abrasive wheel by HSG technology:

*a* – process beginning; *б* – breaking-in process; *в* – broken-in tool

*a**б*

*Рис. 5.* Шлифовальное оборудование рельсошлифовальных поездов типа РШП:

*a* – общий вид шлифовального оборудования РШП; *б* – схема расстановки шлифовальных кругов по поперечному профилю рельса

*Fig. 5.* Grinding equipment of RShP rail grinding trains:

*a* – general view of the grinding equipment RShP; *б* – scheme of the grinding wheels arrangement along the rail transverse profile

вращение шлифовального круга, за счет действия сил трения по мере линейного перемещения рельсошлифовального поезда [16] (далее – метод СГУПС).

Дополнительным преимуществом метода, предложенного СГУПС, является возможность его реализации на базе существующей конструкции рельсошлифовальных поездов типа РШП, а также возможность совмещения технологий пассивного и активного шлифования в одной путовой машине.

Оценка возможности применения тех или иных способов обработки рельсов для заданных условий эксплуатации может быть осуществлена только с помощью имеющейся научной базы, которая применительно к пассивному шлифованию рельсов на сегодняшний день отсутствует в силу своей ограниченной применимости. Кроме того, технология пассивного шлифования рельсов является относительно новой и характеризуется небольшим количеством исследований в этой области и, как следствие, ограниченным

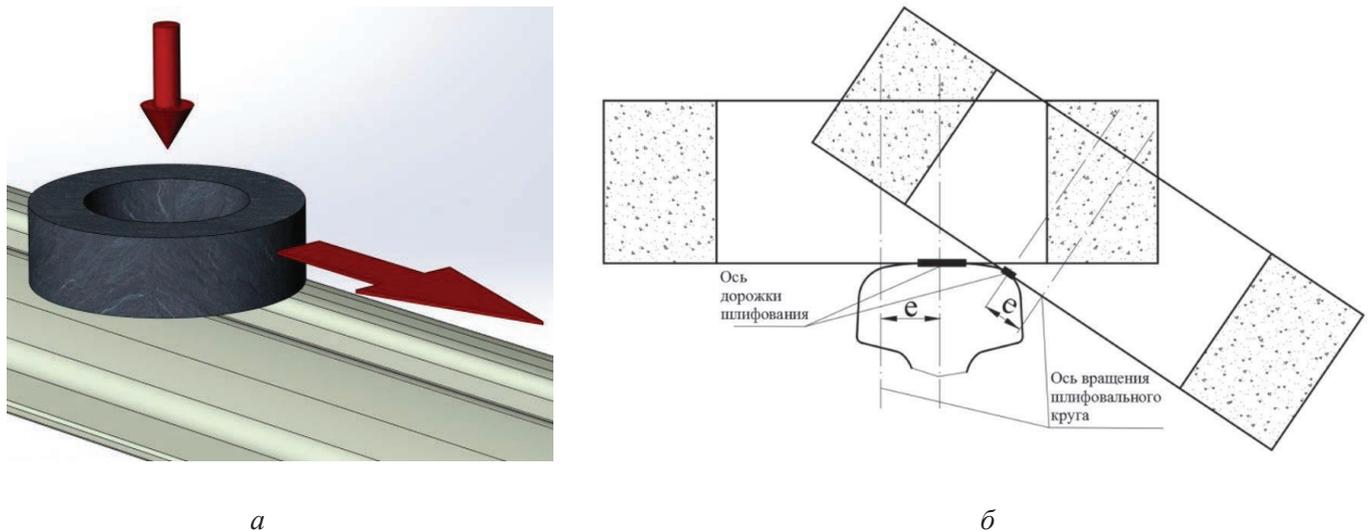


Рис. 6. Способ пассивного шлифования СГУПС:  
 а – принципиальная схема шлифования; б – схема формирования эксцентриситета

Fig. 6. Passive grinding method by STU:

а – grinding schematic diagram of; б – formation of eccentricity diagram

количеством публикаций, что подтверждается в работах.

Таким образом, **целью исследований**, представленных в данной статье, являлось проведение сравнительного теоретического анализа двух рассмотренных схем пассивного шлифования рельсов по методам HSG и СГУПС с позиции эффективности их применения при механической обработке рельсов.

### Теоретические исследования

Эффективность процесса шлифования рельсов определяется, прежде всего, производительностью механической обработки, которая складывается из скорости линейного перемещения абразивного инструмента (скорости рельсошлифовального поезда) и съема металла с поверхности рельса. Если в целях сравнения двух схем шлифования задаться одинаковой скоростью рельсошлифовальных поездов, то ключевым параметром оценки эффективности будет съем металла при обработке. Под съемом металла в данном случае подразумевается аналог припуска на обработку, отличающийся тем, что ввиду отсутствия жесткости технологической системы величина удаляемого слоя металла определяется не настроечным размером технологического оборудования, а усилием прижатия шлифовального круга к рельсу [17].

Исходя из теории резания единичным зерном [18–20] удаляемый слой металла при шлифовании определяется глубиной рисков, формируемых абразивными зёрнами и их количеством. В свою очередь, глубина рисков определяется силой прижатия шлифовального круга к обрабатываемой поверхности, а их количество – частотой вращения шлифовального круга. Таким образом, потенциальная производительность рассматриваемых схем «пассивного» шлифования будет определяться развиваемой скоростью вращения шлифовального круга и его вращающим моментом. В комплексе эти два параметра будут определять возможную к реализации мощность резания. На основании вышеизложенного для решения поставленной задачи был проведен кинематический и силовой анализ двух рассматриваемых схем шлифования. В ходе анализа были приняты следующие допущения.

1. В анализе приняты идеализированные условия взаимодействия шлифовального круга с рельсом.

2. Движение шлифовального поезда передает силовое воздействие на шлифовальный круг через рельс, т. е. рассматривается воздействие рельса на шлифовальный круг.

3. Рассматривается взаимодействие шлифовального круга с рельсом в точке контакта, рас-

полагающейся на его периферии. В эту точку приходится силовое воздействие от движения шлифовального поезда.

4. Коэффициент резания металла принимает-ся как коэффициент трения. При этом в анализе не учитывается площадь взаимодействия шлифовального круга с рельсом.

5. В анализе приняты идентичные условия реализации схем шлифования. В сравнительных расчетах принимались одинаковые значения коэффициентов трения, усилий прижатия, диаметров шлифовального круга и скоростей шлифовального поезда.

С учетом поставленной задачи с точки зрения кинематического анализа наибольший интерес в рассматриваемых схемах шлифования представляет определение возможной скорости шлифовального круга в зависимости от скорости перемещения шлифовального поезда. Для определения возможных скоростей шлифовальных кругов рассмотрим расчетные схемы взаимодействия шлифовального круга с рельсом при различных схемах шлифования, которые представлены на рис. 7 (вид сверху).

Для представленных схем скорость вращения шлифовального круга будет определяться по следующим соотношениям:

для метода HSG:

$$V_c = V_t \cos \alpha, \quad (1)$$

где  $V_c$  – скорость вращения шлифовального круга, м/с;  $V_t$  – скорость движения шлифовального поезда, м/с;  $\alpha$  – угол разворота шлифовального круга относительно направления движения, град.;

для метода СГУПС:

$$V_c = \frac{V_t}{\cos \varphi}, \quad (2)$$

где  $\varphi$  – угол, определяющий точку контакта шлифовального круга с рельсом в зависимости от его смещения относительно оси рельса, град.;

$$\cos \varphi = \frac{e}{R}, \quad (3)$$

где  $e$  – эксцентриситет, м (смещение оси вращения шлифовального круга относительно дорожки шлифования (см. рис. 6));  $R$  – радиус шлифовального круга, м (в дальнейших расчетах принято  $R = 125$  мм).

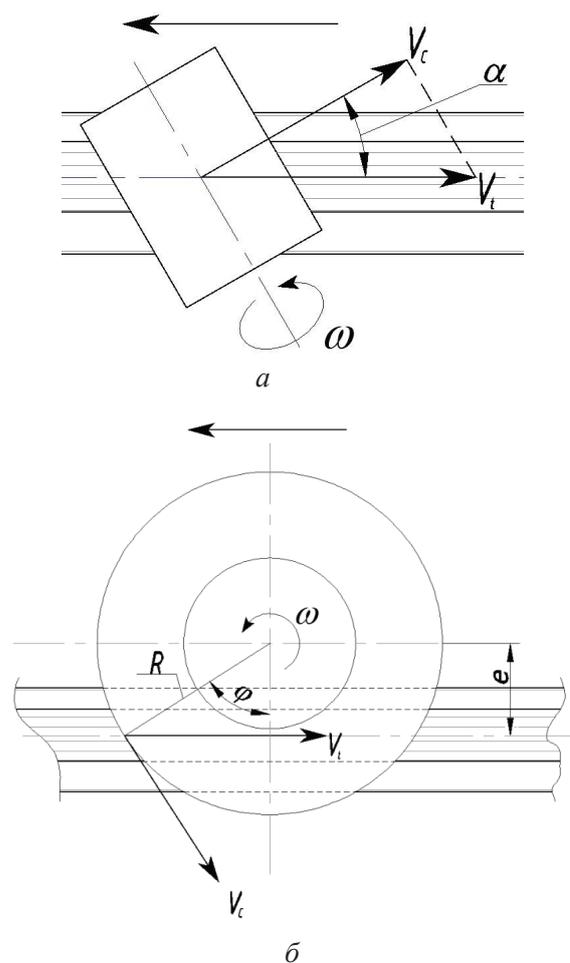


Рис. 7. Схемы кинематического взаимодействия шлифовальных кругов:

*a* – способ HSG; *б* – способ СГУПС

Fig. 7. Kinematic interaction schemes of grinding wheels:

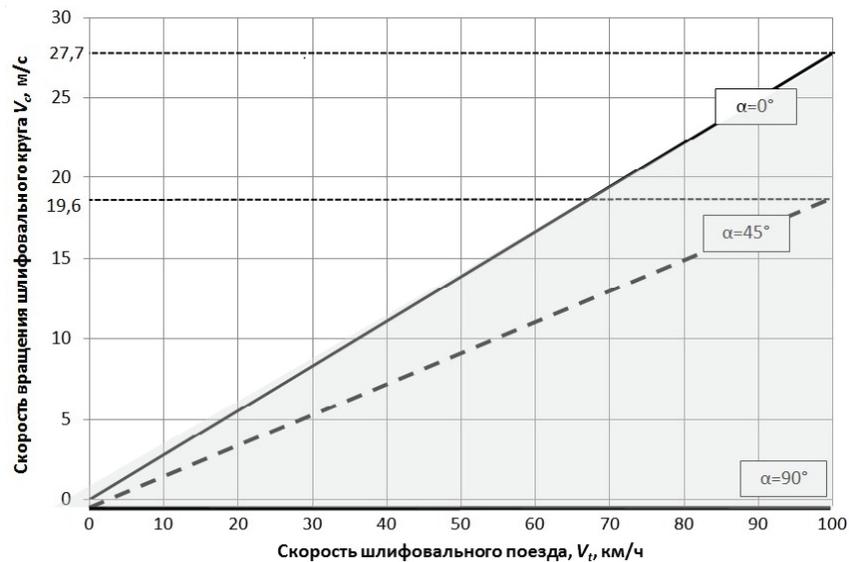
*a* – HSG method; *б* – STU method

С учетом формулы (3) выражение (2) примет следующий вид:

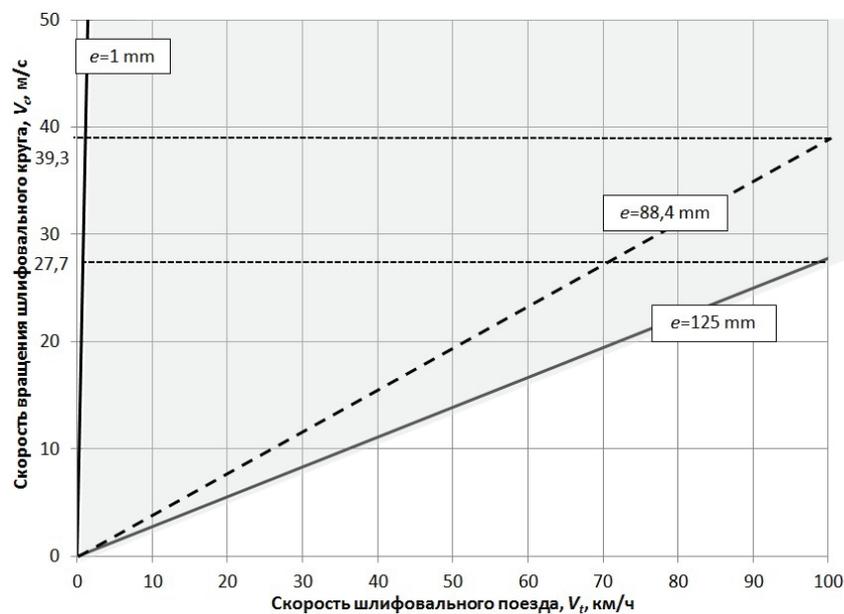
$$V_c = \frac{V_t R}{e}. \quad (4)$$

Графически зависимости (1) и (4) представлены на рис. 8. Из графиков видно, что в обеих схемах шлифования увеличение скорости шлифовального круга происходит пропорционально увеличению скорости шлифовального поезда. При этом значительное влияние на степень изменения скорости шлифовального круга оказывает угол  $\alpha$  для схемы HSG и эксцентриситет  $e$  для схемы СГУПС.

Серым цветом на графиках выделены области возможных значений скорости шлифовального круга в зависимости от исходных условий.



а



б

Рис. 8. Зависимость скорости вращения шлифовального круга от скорости движения шлифовального поезда:

а – способ HSG; б – способ СГУПС

Fig. 8. Dependence of a grinding wheel rotation speed on grinding train speed:

а – HSG method; б – STU method

На графике (рис. 8, а) видно, что в схеме шлифования HSG скорость шлифовального круга может достичь максимального значения 27,7 м/с при скорости поезда 100 км/ч и  $\alpha = 0^\circ$ . Фактически это свидетельствует о вращении–качении шлифовального круга без проскальзывания. Это значит, что при  $\alpha = 0^\circ$  процесса срезания стружки происходит не будет независимо от скорости движения поезда.

Рассмотрение схемы шлифования СГУПС из графика (рис. 8, б) показывает, что в отличие от схемы HSG скорость круга 27,7 м/с – это минимально возможное значение для скорости поезда 100 км/ч и реализуется эта скорость при максимальном эксцентриситете  $e$ , который равен радиусу шлифовального круга ( $e = 125$  мм). При уменьшении эксцентриситета  $e$  скорость шлифовального круга значительно увеличивается

и при значениях  $e$ , близких к нулю, теоретически может достигать 3500 м/с (выходит за область представленного графика).

Таким образом, при прочих равных условиях схема шлифования СГУПС изначально обладает более высокой скоростью шлифовального круга, что свидетельствует о возможно большей потенциальной производительности процесса шлифования. Однако обособленный кинематический анализ не дает полного представления об эффективности рассматриваемых схем механической обработки.

Рассмотрим силовое воздействие на шлифовальный круг, которое возникает при реализации рассматриваемых схем шлифования. Расчетные схемы представлены на рис. 9. Движение шлифовального поезда передает через рельс силовое воздействие  $F_t$  на шлифовальный круг, которое, в свою очередь, раскладывается на силу, приводящую шлифовальный круг во вращение  $F_r$ , и силу  $F_g$ , препятствующую вращению, которую условно можно принять за силу непосредственного шлифования (силу резания). При этом следует отметить, что в обоих

случаях силовое воздействие от шлифовального поезда  $F_t$  одинаковое и определяется зависимостью

$$F_t = Q\lambda, \quad (5)$$

где  $Q$  – сила прижатия шлифовального круга к обрабатываемой поверхности головки рельса, Н;  $\lambda$  – коэффициент взаимодействия шлифовального круга с поверхностью рельса. Данный коэффициент представляет собой аналог коэффициента трения, зависящий от свойств абразивного инструмента (зернистость, материал абразивного зерна и др.) и обрабатываемой поверхности рельса. Определяется данный коэффициент эмпирическим путем на основании отношения силы трения к реакции силы, направленной по нормали к поверхности касания, возникающей при прижатии шлифовального круга к рельсу. С учетом того, что в настоящей работе проводится сравнительный анализ двух схем шлифования, принимаются равные значения  $\lambda$  для обеих схем шлифования. Для упрощения дальнейших сравнительных расчетов для обеих схем шлифования принимается  $\lambda = 1$ .

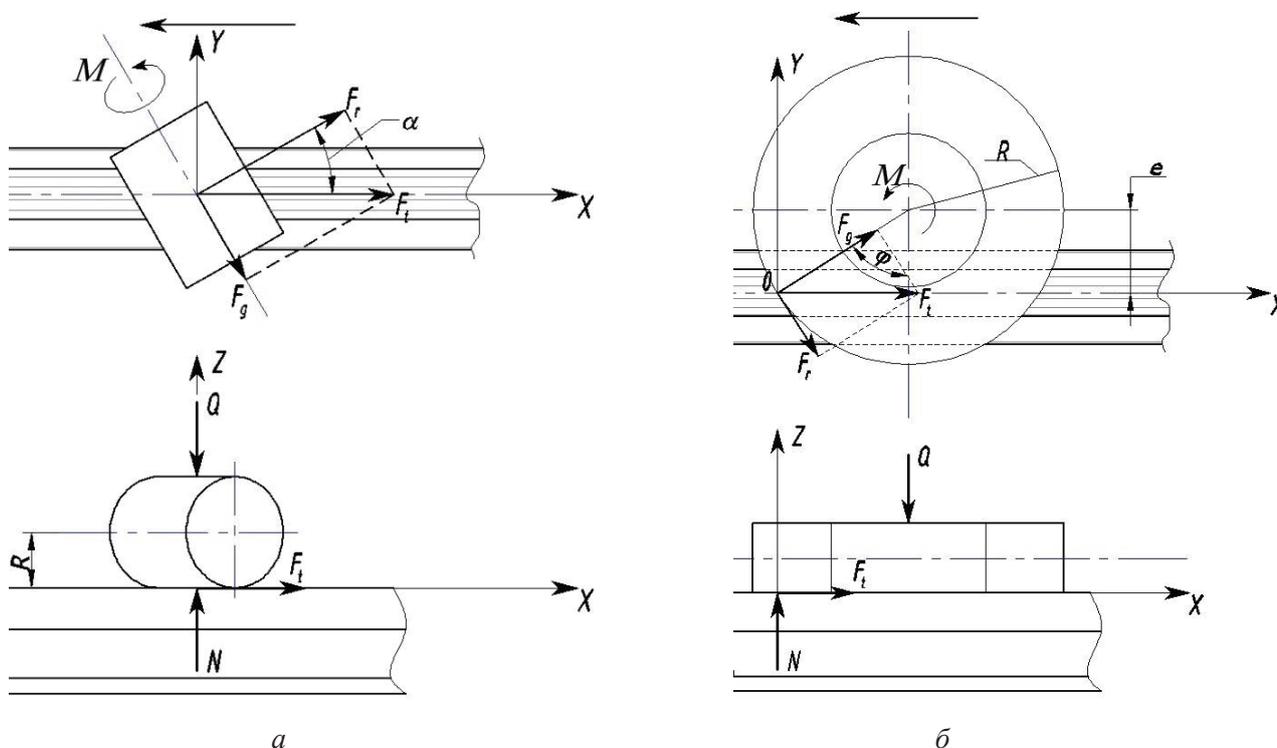


Рис. 9. Схемы силового взаимодействия шлифовальных кругов:

$a$  – способ HSG;  $b$  – способ СГУПС

Fig. 9. Force interaction of grinding wheels schemes:

$a$  – HSG method;  $b$  – STU method

В соответствии с представленными схемами (рис. 9, а) определим составляющие силового взаимодействия шлифовального круга с рельсом. Для способа шлифования HSG составляющие силы определяются соотношениями:

$$F_r = F_t \cos \alpha = Q\lambda \cos \alpha, \quad (6)$$

$$F_g = F_t \sin \alpha = Q\lambda \sin \alpha. \quad (7)$$

Для способа СГУПС:

$$F_r = F_t \cos \varphi = \frac{F_t e}{R} = \frac{Q\lambda e}{R}, \quad (8)$$

$$F_g = F_t \sin \varphi = \frac{F_t \sqrt{R^2 - e^2}}{R} = \frac{Q\lambda \sqrt{R^2 - e^2}}{R}. \quad (9)$$

Из представленных зависимостей (6)–(9) видно, что с увеличением одной из составляющей силового воздействия вторая будет уменьшаться. Соотношения составляющих сил будут определяться углом  $\alpha$  для метода HSG и углом  $\varphi$ , определяющимся эксцентриситетом  $e$ , для метода СГУПС.

В качестве примера произведем расчет по формулам (6)–(9) для всех возможных диапазонов угла  $\alpha$  и эксцентриситета  $e$ . В расчетах примем значения  $Q = 500$  Н и  $\lambda = 1$ ,  $R = 125$  мм. Результаты расчетов графически отображены на рис. 10.

На обоих графиках (рис. 10) видно, что имеется точка пересечения зависимостей составляющих силового воздействия  $F_r$  и  $F_g$ . Те области графиков, где сила  $F_r$ , приводящая шлифовальный круг во вращение, меньше силы резания  $F_g$ , характеризуются тем, что шлифовальный круг имеет меньшую возможность к проворачиванию. При этом, чем больше разница в значениях этих составляющих силы, тем вероятность проворачивания шлифовального круга меньше. Так, при значениях угла  $\alpha$ , близких к  $90^\circ$ , а эксцентриситета  $e$ , близких к нулю, вращение шлифовальных кругов практически исключается, и процесс механической обработки рельса по своему принципу переходит в обычное брусковое шлифование, описанное ранее (см. рис. 1).

Обратная ситуация возникает, когда значение силы  $F_r$  превышает значение силы  $F_g$ . В этом случае свободное проворачивание шлифовального круга начинает преобладать над процессом срезания металла, и при минимальных значениях угла  $\alpha$  и максимальных значениях эксцентриситета  $e$  движение абразивного инструмента фактически переходит во вращение–качение без проскальзывания, при котором процесс механической обработки не происходит.

Точку пересечения графиков в данном случае можно считать условием оптимизации значений угла  $\alpha$  или же эксцентриситета  $e$  для соответствующих методов шлифования, при которых будет осуществляться максимально эффективная механическая обработка поверхности рельса с равномерным вращением шлифовального круга, исключаящее его засаливание и потерю работоспособности.

Исходя из условия  $F_r = F_g$  совместное решение уравнений (6) и (7) для метода HSG показывает, что  $\cos \alpha = \sin \alpha$ , что соответствует  $\alpha = 45^\circ$ , которое и можно считать оптимальным значением угла разворота шлифовального круга. Аналогичное решение уравнений (8) и (9) для метода СГУПС показывает, что оптимальное значение эксцентриситета определяется зависимостью

$$e = \frac{R}{\sqrt{2}}, \quad (10)$$

и при принятом радиусе шлифовального круга  $R = 125$  мм  $e = 88,4$  мм. Полученные оптимальные значения  $\alpha$  и  $e$  являются постоянными и неизменными, независимо от значений  $Q$  и  $\lambda$ .

Возвращаясь к кинематическому анализу, можно сопоставить скорости вращения шлифовальных кругов для полученных оптимальных значений  $\alpha$  и  $e$  (см. рис. 8). Так, при значении  $\alpha = 45^\circ$  и при скорости рельсошлифовального поезда 100 км/ч скорость шлифовального круга для метода HSG составит 19,6 м/с. Для метода СГУПС при прочих равных условиях при значении  $e = 88,4$  мм скорость шлифовального круга составит 39,3 м/с, что свидетельствует о потенциале метода СГУПС в части большей производительности механической обработки.

Выполненный по отдельности кинематический и силовой анализ рассматриваемых методов шлифования не позволяет в полной мере оценить эффективность процессов механической

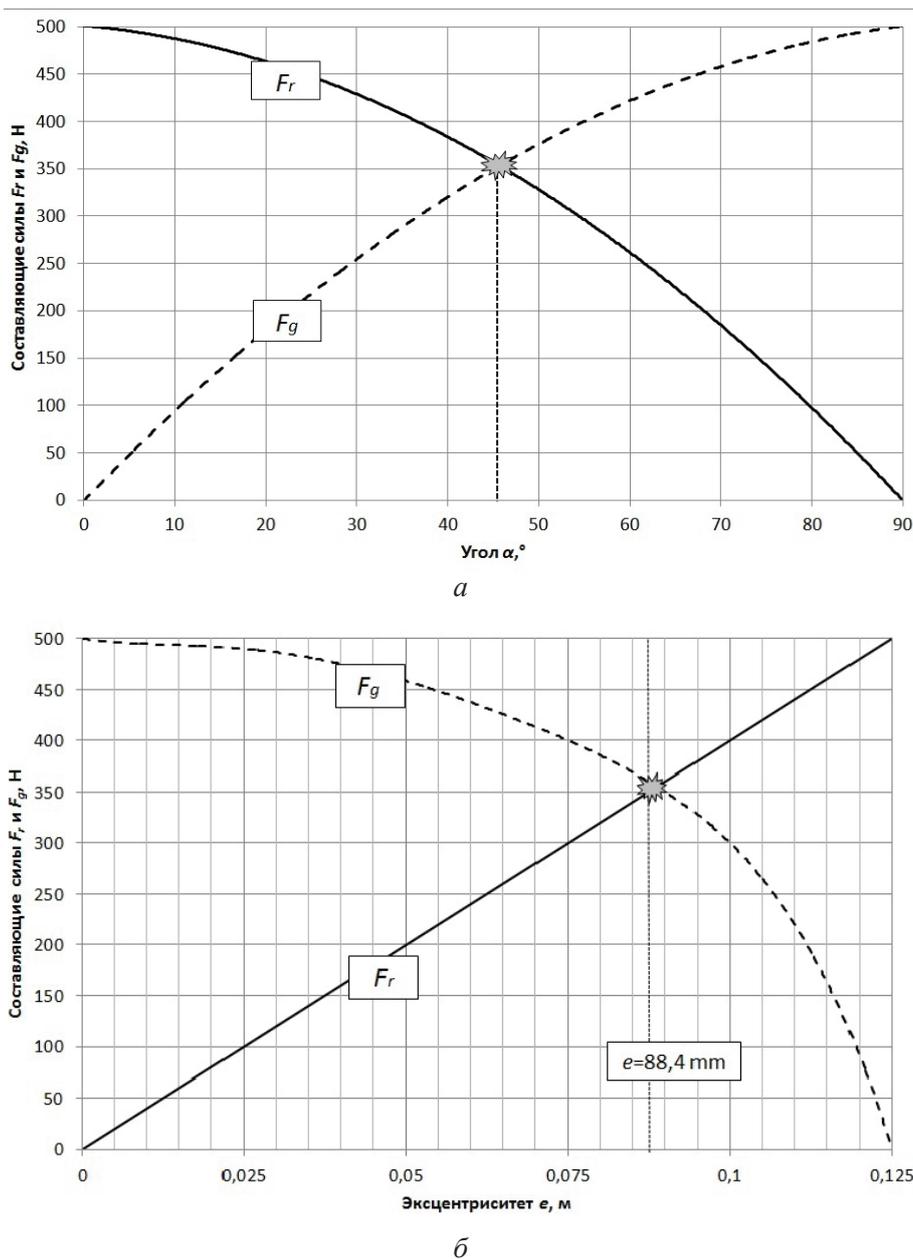


Рис. 10. Графики изменений составляющих силового воздействия на шлифовальный круг при  $Q = 500$  Н,  $\lambda = 1$  и  $R = 125$  мм:  
 а – способ HSG; б – способ СГУПС

Fig. 10. Graphs of variance in components of force action on a grinding wheel at  $Q = 500$  N,  $\lambda = 1$  and  $R = 125$  mm:  
 а – HSG method; б – STU method

обработки. С целью сопоставления полученных результатов определим скорость вращения шлифовального круга как функцию от силового воздействия на абразивный инструмент. Для этого воспользуемся законом изменения кинетической энергии. При этом, если задаться ограничением, что начальная кинетическая энергия равна нулю, т. е. движение начинается из состояния покоя, то уравнение будет иметь следующий вид:

$$T - T_0 = \sum_{n=1}^k A_k, \tag{11}$$

где  $T$  – кинетическая энергия рассматриваемой системы, Дж;  $T_0$  – начальная кинетическая энергия рассматриваемой системы, Дж;  $A_k$  – работа  $k$ -й силы, действующей на шлифовальный круг, Дж.

В общем виде кинетическая энергия для рассматриваемых случаев будет вычисляться по формуле

$$T = \frac{mV_c^2}{2} + \frac{J\omega_c^2}{2}, \quad (12)$$

где  $\omega_c$  – угловая скорость вращения шлифовального круга, рад/с;  $J$  – момент инерции шлифовального круга, кг·м<sup>2</sup>.

Если опустим определение моментов инерции и угловой скорости шлифовальных кругов, то формула (12) примет следующий вид для рассматриваемых методов шлифования:

для метода HSG:

$$T = mV_c^2; \quad (13)$$

для метода СГУПС:

$$T = \frac{5}{4}mV_c^2, \quad (14)$$

где  $m$  – масса шлифовального круга, кг.

Из расчетных схем (см. рис. 9) видно, что работу совершает только вращающий момент шлифовальных кругов, который определяется по следующим формулам:

для метода HSG:

$$M = F_r R = Q\lambda R \cos \alpha; \quad (15)$$

для метода СГУПС:

$$M = F_r R = Q\lambda e. \quad (16)$$

Таким образом, работа вращающего момента шлифовального круга для обоих способов будет определяться по формуле

$$A = M\varphi_c, \quad (17)$$

где  $M$  – вращающий момент, образуемый силой  $F_r$  при взаимодействии шлифовального круга с поверхностью рельса, Н·м;  $\varphi_c$  – угол поворота шлифовального круга относительно расчетной оси вращения в единицу времени  $t$ , определяемый через угловую скорость  $\omega_c$  по формуле

$$\varphi_c = \omega_c t. \quad (18)$$

С учетом формул (15), (16) и (18) зависимость для определения работы шлифовальных кругов (17) примет следующий вид:

для метода HSG:

$$A = Q\lambda V_c \cos \alpha t; \quad (19)$$

для метода СГУПС:

$$A = \frac{Q\lambda e V_c}{R} t. \quad (20)$$

Подставив формулы (13), (14), (19) и (20) для соответствующих методов обработки в уравнение (11) и решив его относительно скорости шлифовального круга  $V_c$ , получим:

для метода HSG:

$$V_c = \frac{Q\lambda \cos \alpha}{m} t; \quad (21)$$

для метода СГУПС:

$$V_c = \frac{4Q\lambda e}{5mR} t. \quad (22)$$

Полученные зависимости позволяют учесть силовые и кинематические составляющие рассматриваемых процессов пассивного шлифования рельсов и в первом приближении оценить их эффективность.

## Результаты и их обсуждение

Для ранее определенных оптимальных значений  $\alpha = 45^\circ$  и  $e = 88,4$  мм произведем расчет по полученным зависимостям (21) и (22), принимая прочие равные условия: диапазон изменения усилия прижатия  $Q$  от 100 до 1000 Н,  $m = 10$  кг,  $\lambda = 1$ . Результаты расчетов графически представлены на рис. 11.

Из графика (рис. 11) видно, что при одном и том же усилии прижатия шлифовального круга к рельсу  $Q$  скорость его эффективной работы по методу HSG на 20 % превышает скорость, возникающую при методе СГУПС. Например, при  $Q = 450$  Н эффективная работа шлифовального круга при методе HSG будет достигаться при  $V_c = 31,8$  м/с, а при методе СГУПС – при  $V_c = 25,5$  м/с. Таким образом, можно сделать заключение, что при равных значениях  $Q$  производительность по методу HSG на 20 % больше, чем по методу СГУПС. При этом следует отметить, что в соответствии с кинематикой процесса обработки при одинаковой скорости шлифовального круга по методу СГУПС практически в 2 раза превышает скорость круга

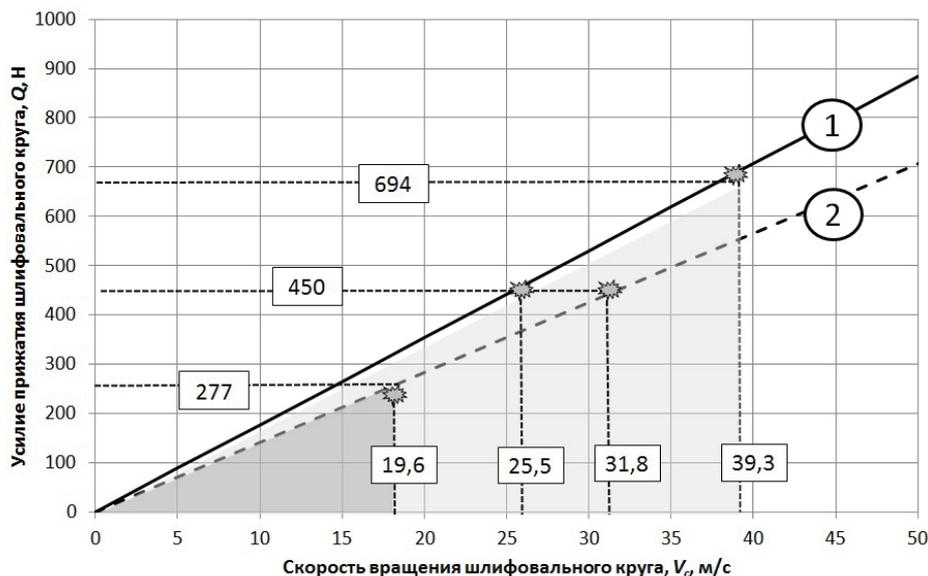


Рис. 11. Зависимость скорости вращения шлифовального круга от усилия его прижатия к рельсу при оптимальных значениях  $\alpha = 45^\circ$  и  $e = 88,4$  мм:

1 – способ СГУПС; 2 – способ HSG

Fig. 11. The dependence of a grinding wheel rotation speed on the force of its pressing against rail at optimal values  $\alpha = 45^\circ$  and  $e = 88.4$  mm:

1 – STU method; 2 – HSG method

по методу HSG. Так, при скорости поезда  $V_t = 100$  км/ч максимально возможная скорость шлифовального круга для метода HSG составляет  $V_c = 19,6$  м/с, а для метода СГУПС  $V_c = 36,3$  м/с (см. рис. 8). Таким образом, технология пассивного шлифования, реализуемая по методу HSG, изначально будет ограничена максимально достижимой скоростью шлифовального круга и соответствующим ей усилием прижатия. На графике (рис. 11) область возможных значений  $V_c$  и  $Q$  для метода HSG показана темно-серым цветом.

Метод СГУПС в рассматриваемом случае имеет более широкий диапазон изменения скорости вращения шлифовального круга и усилия его прижатия и, как следствие, большую возможность к увеличению съема металла. Светло-серая область – область возможных значений  $V_c$  и  $Q$  для метода СГУПС. Эти области показаны в качестве примера применительно к скорости шлифовального поезда 100 км/ч. В целом полученные результаты теоретических исследований коррелируются с полученными экспериментальными данными, представленными в работах [21, 22].

## Заклучение

Проведенный теоретический анализ двух методов пассивного шлифования рельсов с применением шлифовальных поездов позволяет сделать следующие выводы.

1. Технология пассивного шлифования, реализуемая по методу HSG, имеет большую производительность и энергоэффективность процесса механической обработки в сравнении с методом СГУПС за счет большей скорости вращения шлифовального круга при равных усилиях его прижатия к рельсу.

2. Метод пассивного шлифования СГУПС отличается большим диапазоном изменения как скорости вращения шлифовального круга, так и усилия его прижатия. Это позволяет при равных с методом HSG скоростях движения шлифовальных поездов достичь большей скорости шлифования поверхности рельса и добиться большего съема металла за счет более сильного прижатия шлифовального круга к рельсу.

3. Представленный подход позволяет сформировать базу данных оптимальных режимов пассивного шлифования рельсов, на основе которой можно осуществлять аргументированный

выбор усилий прижатия шлифовального круга к рельсу исходя из требуемого съема металла и заданной скорости шлифовального поезда.

4. Проведенный анализ носит идеализированный характер, в котором не учтен ряд существенных параметров, оказывающих значительное влияние как на физические процессы взаимодействия шлифовальных кругов с рельсом, так и на сам процесс механической обработки. При этом он дает общее сравнительное представление об эффективности и возможной производительности рассматриваемых методов пассивного шлифования.

5. Перспективным направлением дальнейших исследований в области пассивного шлифования рельсов является расширение теории взаимодействия шлифовальных кругов с рельсом за счет включения в математическую модель таких параметров, как площадь контакта шлифовального круга с рельсом, структура и зернистость абразивного инструмента и съем металла. Кроме того, ключевой задачей можно считать экспериментальное и теоретическое определение численных значений коэффициента взаимодействия шлифовального круга с рельсом  $\lambda$ .

### Список литературы

1. Rail surface quality analysis according to rail grinding on operational railway track / W. Jeong, J. Hong, H. Kho, H. Lee // Journal of the Korean Society for Railway. – 2021. – Vol. 24, iss. 10. – P. 852–860. – DOI: 10.7782/JKSR.2021.24.10.852.

2. Lundmark J. Rail grinding and its impact on the wear of wheels and rails // Licentiate Thesis. – 2007. – URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:990239/FULLTEXT01.pdf> (accessed: 03.08.2022).

3. 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.

4. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса / У. Дж. Харрис, С.М. Захаров, Дж. Ландгрэн, Х. Турне, В. Эберсен. – М.: Интекст, 2002. – 408 с. – ISBN 978-5-89277-037-0.

5. Ильиных А.С., Бондарев Э.С. Отечественный и зарубежный опыт организации и планирования работ по шлифованию рельсов // Фундаментальные

и прикладные вопросы транспорта. – 2021. – № 1 (2). – С. 11–24. – DOI: 10.52170/2712-9195/2021\_2\_11.

6. 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.

7. Design method of rail grinding target profile based on non-uniform rational B-spline / F. Lin, S. Wang, H. Zhang, W. Hu // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2021. – Vol. 235, iss. 8. – P. 946–956. – DOI: 10.1177/0954409720972819.

8. 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.

9. 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. 2. – P. 672–681. – DOI: 10.1007/978-3-030-37919-3\_67.

10. Сулов А.Г., Бишутин С.Г., Захаров Л.А. Инновационные технологии рельсообработки высокоскоростных железных дорог // Научно-технологические исследования в машиностроении. – 2020. – № 8. – С. 11–17. – DOI: 10.30987/2223-4608-2020-8-11-17.

11. 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.

12. Funke H. Rail grinding. – Berlin: Transpress, 1986. – 153 p.

13. Taubert M., Püschel A. Speed grinding rail // International Railway Journal. – 2009. – N 7. – P. 31–33.

14. Скоростное шлифование рельсов // Железные дороги мира. – 2010. – № 7. – С. 68–71.

15. Высокоскоростное шлифование рельсов // Железные дороги мира. – 2011. – № 8. – С. 62–66.

16. Патент № 2759298 Российская Федерация. Способ обработки поверхности головки рельса и устройство для его осуществления: № 2021103701: заявл. 12.02.2021; опубл. 11.11.2021 / А.С. Ильиных, В.В. Банул.

17. Особенности формирования технологического процесса плоского шлифования торцом круга при упругой подвеске шлифовальной головки / В.А. Аксенов, А.С. Ильиных, 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.

18. *Doman D., Warkentin A., Bauer R.* A survey of recent grinding wheel topography models // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2006. – Vol. 46, iss. 3. – P. 343–352. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.05.013.

19. 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 and Manufacture*. – 2005. – Vol. 45, iss. 12–13. – P. 1468–1473.

20. Designed a passive grinding test machine to simulate passive grinding process / P. Liu, W. Zou, J. Peng, X. Song, F. Xiao // *Processes*. – 2021. – Vol. 9, iss. 8. – P. 1317. – DOI: 10.3390/pr9081317.

21. Study on the effect of grinding pressure on material removal behavior performed on a self-designed passive grinding simulator / P. Liu, W. Zou, J. Peng, X. Song, F. Xiao // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11, iss. 9. – P. 4128. – DOI: 10.3390/app11094128.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2022 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](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Theoretical analysis of passive rail grinding

Andrey Ilinykh <sup>a,\*</sup>, Viktor Banul <sup>b</sup>, Denis Vorontsov <sup>c</sup>

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

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4234-6216>, [asi@stu.ru](mailto:asi@stu.ru), <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4257-2686>, [banul@ngs.ru](mailto:banul@ngs.ru),

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3819-781X>, [voroncovds@stu.ru](mailto:voroncovds@stu.ru)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 15 June 2022

Revised: 29 June 2022

Accepted: 05 July 2022

Available online: 15 September 2022

#### Keywords:

Rail grinding

Passive grinding

Machining efficiency

Grinding performance

#### 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.

#### Acknowledgements

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

### ABSTRACT

**Introduction.** There are different rail machining technologies designed to eliminate defects on the tread surface and extend the life cycle of rails. The most used is the technology of grinding rails with rotating grinding wheels using rail-grinding trains. Its main disadvantage is the low working speed of the grinding train that requires the organization of track possessions with stopping the movement of trains along the haul. To perform preventive rail grinding with minimal metal removal from the rail head, passive grinding technologies using grinding wheels have become widespread in last years. Passive grinding is when there is no power on the grinding wheel to rotate it actively. Such methods make it possible to achieve high speeds of the grinding train, and the work can be carried out in the train schedule without closing the stage. Currently, passive grinding technologies are relatively new and do not have the necessary scientific basis for optimizing the machining process. **The aim of the work** is to perform theoretical studies of kinematic and force analyzes of two methods of rail passive grinding: the periphery and the end face of the grinding wheel. **Methodology** of the work is kinematic and power calculations of rail grinding schemes. **Results and discussion.** Within the framework of theoretical studies, a kinematic and force analysis of two methods of passive grinding are carried out, on the basis of which the optimal conditions for its implementation are determined. It is established that the method of passive grinding by the periphery of the wheel has a 20 % higher productivity and energy efficiency of the process before end passive grinding due to the higher rotation speed of the grinding wheel with equal forces of pressing it to the rail. At the same time, passive grinding with the end of the wheel is distinguished by a twice greater range of change in both the speed of the grinding wheel rotation and the force of its pressing that makes it possible to achieve greater metal removal at equal speeds of the grinding trains. In conclusion, promising tasks for further research in the field of passive rail grinding are formulated.

**For citation:** Ilinykh A.S., Banul V.V., Vorontsov D.S. Theoretical analysis of passive rail grinding. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 3, pp. 22–39. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.3-22-39. (In Russian).

### References

1. Jeong W., Hong J., Kho H., Lee H. Rail surface quality analysis according to rail grinding on operational railway track. *Journal of the Korean Society for Railway*, 2021, vol. 24, iss. 10, pp. 852–860. DOI: 10.7782/JKSR.2021.24.10.852.
2. Lundmark J. Rail grinding and its impact on the wear of wheels and rails. *Licentiate Thesis*, 2007. Available at: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:990239/FULLTEXT01.pdf> (accessed 03.08.2022).

#### \* Corresponding author

Ilinykh Andrey S, D.Sc. (Engineering), Professor  
Siberian Transport University,  
191 Dusy Kovalchuk st.,  
630049, Novosibirsk, Russian Federation  
Tel.: 8 (383) 328-03-92, e-mail: [asi@stu.ru](mailto:asi@stu.ru)



3. 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.
4. Zakharov S., Kharris W.J., Landgren J., H. Tourny, Ebersöhn W. *Guidelines to Best practices For heavy haul Railway operations: Wheel and rail Interface issues*. Virginia Beach, Va., International Heavy Haul Association, 2001 (Russ. ed.: Kharris U.Dzh., Zakharov S.M., Landgren Dzh., Turne Kh., Ebersen V. *Obobshchenie peredovogo opyta tyazhelovesnogo dvizheniya: voprosy vzaimodeistviya koleasa i rel'sa*. Moscow, Intekst Publ., 2002. 408 p. ISBN 978-5-89277-037-0).
5. Ilinykh A.S., Bondarev E.S. Otechestvennyi i zarubezhnyi opyt organizatsii i planirovaniya rabot po shlifovaniyu rel'sov [The national and overseas experience to organizing and planning works of the grinding rails]. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy transporta = Fundamental and Applied Issues of Transport*, 2021, no. 1 (2), pp. 11–24. DOI: 10.52170/2712-9195/2021\_2\_11
6. 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.
7. Lin F., Wang S., Zhang H., Hu W. Design method of rail grinding target profile based on non-uniform rational B-spline. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2021, vol. 235, iss. 8, pp. 946–956. DOI: 10.1177/0954409720972819.
8. 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.
9. 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. 2, pp. 672–681. DOI: 10.1007/978-3-030-37919-3\_67.
10. Suslov A.G., Bishutin S.G., Zakharov L.A. Innovatsionnye tekhnologii rel'soobrabotki vysokoskorostnykh zheleznykh dorog [Innovation technologies of rail working for high-speed railways]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2020, no. 8, pp. 11–17. DOI: 10.30987/2223-4608-2020-8-11-17.
11. 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.
12. Funke H. *Rail grinding*. Berlin, Transpress, 1986. 153 p.
13. Taubert M., Püschel A. Speed grinding rail. *International Railway Journal*, 2009, no. 7, pp. 31–33.
14. Skorostnoe shlifovanie rel'sov [Speed rail grinding]. *Zheleznye dorogi mira = Railways of the World*, 2010, no. 7, pp. 68–71.
15. Vysokoskorostnoe shlifovanie rel'sov [High-speed rail grinding]. *Zheleznye dorogi mira = Railways of the World*, 2011, no. 8, pp. 62–66.
16. Ilinykh A.S., Banul V.V. *Sposob obrabotki poverkhnosti golovki rel'sa i ustroistvo dlya ego osushchestvleniya* [Method of processing head rail surface and device for implementation]. Patent RF, no. 2759298, 2021.
17. 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. Mashinostroenie, materialovedenie = Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2016, vol. 18, no. 4, pp. 34–47. DOI: 10.15593/2224-9877/2016.4.03.
18. Doman D., Warkentin A., Bauer R. A survey of recent grinding wheel topography models. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, vol. 46, iss. 3, pp. 343–352. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.05.013.
19. 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 and Manufacture*, 2005, vol. 45, iss. 12–13, pp. 1468–1473.
20. Liu P., Zou W., Peng J., Song X., Xiao F. Designed a passive grinding test machine to simulate passive grinding process. *Processes*, 2021, vol. 9, iss. 8, p. 1317. DOI: 10.3390/pr9081317.
21. Liu P., Zou W., Peng J., Song X., Xiao F. Study on the effect of grinding pressure on material removal behavior performed on a self-designed passive grinding simulator. *Applied Sciences*. 2021, vol. 11, iss. 9, pp. 4128. DOI:10.3390/app11094128.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.