

Максимов И. С., Галанский С. А., Мустафин А. Г.
I. S. Maksimov, S. A. Galansky, A. G. Mustafin

**ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ
РЕЛЬСОВ В ПУТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПОЗИЦИОННЫХ АБРАЗИВНЫХ
ИНСТРУМЕНТОВ**

**OBJECT-ORIENTED DESIGN OF THE RAIL GRINDING PROCESS USING COMPOSITE
ABRASIVE TOOLS**

Максимов Илья Сергеевич – старший преподаватель Самарского государственного университета путей сообщения (Россия, Самара); 443066, Россия, г. Самара, ул. Свободы, 2В; тел. +7(927)694-36-53.

Ilya S. Maksimov – Senior Lecturer, Samara State Transport University (Russia, Samara); 2 V Svoboda str., Samara, 443066, Russia; tel. +7(927)694-36-53.

Галанский Сергей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент Самарского государственного университета путей сообщения (Россия, Самара); 443066, Россия, г. Самара, ул. Свободы, 2В; тел. +7(917)111-72-82.

Sergey A. Galansky – PhD in Engineering, Assistant Professor, Samara State Transport University (Russia, Samara); 2 V Svoboda str., Samara, 443066, Russia; tel. +7(917)111-72-82.

Мустафин Артур Галимзянович – заведующий лабораторией Самарского государственного университета путей сообщения (Россия, Самара); 443066, Россия, г. Самара, ул. Свободы, 2В; тел. +7(987)917-15-06.

Artyr G. Mustafin – Head of the Laboratory, Samara State Transport University (Russia, Samara); 2 V Svoboda str., Samara, 443066, Russia; tel. +7(987)917-15-06.

Аннотация. Приводятся данные о шлифовании рельсов рельсошлифовальными поездами на железных дорогах России и за рубежом. Описаны недостатки шлифования рельсов традиционными абразивными кругами. Показаны новые конструкции композиционных кругов для шлифования рельсов.

Summary. The data on the grinding of rails by rail grinding trains on the railways of Russia and abroad are presented. The disadvantages of grinding rails with traditional abrasive wheels are described. New designs of composite wheels for rail grinding are shown.

Ключевые слова: железнодорожный путь, шлифование рельсов, абразивный круг, композиционный шлифовальный круг для торцевого шлифования.

Key words: railway track, rail grinding, abrasive wheel, composite grinding wheel for face grinding.

УДК 625.144

Большое влияние на процесс шлифования рельсов оказывают физико-механические характеристики абразивного инструмента. При шлифовании термообработанных рельсов с высокой твёрдостью применяют абразивные круги на бакелитовой или керамической связке из электрокорунда нормального или белого (ГОСТ Р 52781-2007). Обычно круги имеют зернистость 125, 100, 80.

Процесс обработки рельсов сопровождается изнашиванием металла и разрушением самого абразива. Последнее представляет собой выкрашивание, раздавливание, образование сколов. Этот процесс связан с непрерывным обновлением изнашивающей способности поверхности твёрдого абразива по отношению к металлу [5].

В механизме внешнесилового воздействия твёрдой абразивной частицы на поверхности изнашивания при скольжении можно выделить два этапа.

Первый этап характеризуется воздействием абразивной частицы на поверхность изнашивания и завершается её внедрением в металл поверхностного слоя. При этом твёрдость и проч-

ность абразивной частицы должны быть существенно выше твёрдости металла изнашиваемой поверхности.

На втором этапе абразивные частицы, внедрившись в металл на определённую глубину, совершают поступательное перемещение по поверхности изнашивания, осуществляя при этом сложный процесс разрушения путём пластического деформирования, микрорезания, упругого отеснения, дробления и т. д.

Интенсивность удаления металла определяется соотношением: прочностных характеристик абразива и металла; твёрдости абразива и обрабатываемого изделия, что определяет способность внедряться в металл и разрушать его при движении путём резания и деформации.

При высоких нагрузках монолитного абразива на обрабатываемый металл может произойти качественное изменение механизма изнашивания; это будет в случае перерастания абразивного изнашивания в тепловое. В условиях высокого разогрева качественно меняются условия взаимодействия абразива и обрабатываемой поверхности, в том числе возможно изменение физико-механических характеристик металла головки рельса – так называемые прижоги металла.

Качество связки и технология термообработки абразивного инструмента (при его изготовлении) при прочих равных условиях взаимодействия абразива и обрабатываемого изделия определяют уровень получаемой шероховатости последнего.

Бакелитовая связка шлифовальных кругов представляет собой бакелитовую смолу в виде порошка и бакелитового лака. Это наиболее распространённая из органических связок. Круги на бакелитовой связке обладают высокой прочностью и эластичностью, устойчивы при переменных нагрузках, но пористость их ниже, чем у кругов на керамической связке. Круги на бакелитовой связке работают при скоростях 35...70 м/с и более. Недостатком данных кругов является то, что если температура круга достигает более 3000 °С, связка быстро выгорает, а зёрна легко выкрашиваются. Под действием щелочных жидкостей бакелитовая связка частично разрушается, а потому применение охлаждающих жидкостей с содержанием соды (для очистки рабочей поверхности круга от стружки) более 1,5 % не рекомендуется.

При изготовлении абразивных кругов на керамической связке между отдельными частицами абразива и связкой образуются пустоты – поры. Порами называют маленькие пустоты в круге, в которых размещается стружка, образующаяся при шлифовании. Если стружка задержится в порах, то при соприкосновении с обрабатываемой поверхностью она нагреется, расплавится и плотно закроет все поры, в результате режущая способность круга снизится. Шлифовальные круги, изготовленные на керамической связке, прочны, обладают хорошей термохимической стойкостью и хорошо сохраняют профиль. Недостаток – высокая хрупкость.

Для повышения эффективности обработки рельсов предложен новый композиционный чашечный шлифовальный круг, который выполнен в виде тела с рабочей абразивной поверхностью, ограниченной внутренней и внешней окружностями, образованный чередующимися режущими элементами двух типов с одинаковой твёрдостью и зернистостью, которые на боковой поверхности круга выполнены в форме трапеций, большие основания которых расположены противоположно друг другу. Причём первый тип режущих элементов представляет собой основу, выполненную из абразивных зёрен на керамической связке, а второй тип – из абразивных зёрен на бакелитовой связке, в то же время указанные элементы выполнены в виде сегментов, равномерно чередующихся по всей плоскости одной из торцевых поверхностей круга, а боковые поверхности каждого из сегментов выполнены в виде спирали, простирающейся от внутренней до внешней окружности тела круга [3].

Ширина каждой спирали режущих элементов на бакелитовой связке, образованной на торцевой поверхности круга от его внутренней до внешней окружности, постоянна, при этом ширина всех спиралей между собой одинакова (см. рис. 1 и 2).

Ширина каждого из сегментов, образованных режущими элементами на керамической связке, больше, чем ширина сегментов, образованных режущими элементами на бакелитовой связке.

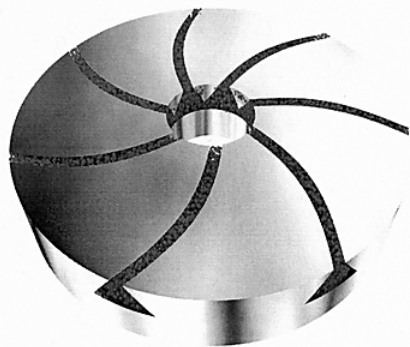


Рис. 1. Чашечный цилиндрический композиционный шлифовальный круг

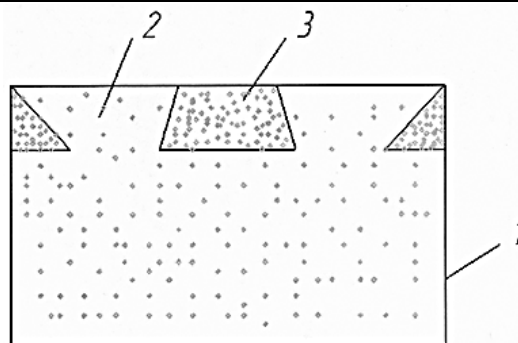


Рис. 2. Вид спереди на часть боковой поверхности круга

Предпочтительно, чтобы трапеции, образованные чередующимися режущими элементами двух типов на боковой поверхности круга, были выполнены равнобокими.

Чашечный цилиндрический композиционный шлифовальный круг (см. рис. 1) выполнен в виде тела с рабочей абразивной поверхностью, ограниченной внутренней (посадочное отверстие) и внешней окружностями.

Поверхность тела круга образована чередующимися режущими элементами двух типов, которые на боковой поверхности круга выполнены в форме равнобоких трапеций, большие основания которых расположены противоположно друг другу. При этом основания трапеций этих элементов, как это видно из рис. 2, ограничены с одной стороны торцевой поверхностью круга, а с другой – пунктирной линией, которая показывает толщину, на которую заделаны режущие элементы на бакелитовой связке. Это толщина составляет $1/3 \dots 1/2$ толщины круга, предпочтительно $1/3$.

Режущие элементы первого типа 2, площадь которых составляет $70 \dots 85$ % от всей площади шлифовального круга, выполнены из абразивных зёрен на керамической связке, а элементы второго типа 3, площадь которых составляет $15 \dots 30$ % от всей площади шлифовального круга, – из абразивных зёрен на бакелитовой связке.

Как видно из рис. 1, указанные элементы 2, 3 выполнены в виде сегментов, равномерно чередующихся по всей плоскости одной из торцевых поверхностей круга. Боковые поверхности каждого из сегментов выполнены в виде спирали, простирающейся от внутренней до внешней окружности тела круга. При этом под боковыми поверхностями понимаются вертикальные плоскости, образованные в местах соприкосновения друг с другом чередующихся сегментов, т. е. у каждого сегмента две боковые вертикальные поверхности. Под сегментом в данном случае понимается часть торцевой поверхности круга, ограниченная частью внутренней и внешней окружностей тела круга, а также двумя боковыми поверхностями каждого из режущих элементов 2, 3.

Вначале корпус шлифовального круга 1 (см. рис. 2) штампуется и спекается с режущими элементами 2 на керамической связке. Режущие элементы 2 в осевом направлении (на боковой поверхности) имеют форму равнобоких трапеций. При этом в поверхности круга образуются впадины, выполненные в виде спирали на одной из его торцевых сторон, которые заполняют абразивной массой на бакелитовой связке той же зернистости, которую имеет абразивная масса на керамической связке, с последующей штамповкой.

Следует отметить, что впадины выполняют таким образом, чтобы ширина (т.е. расстояние между двумя боковыми поверхностями) каждой спирали режущих элементов 3 на бакелитовой связке, образованной на торцевой поверхности круга от его внутренней до внешней окружности, была постоянна, а ширина всех спиралей из элементов 3 между собой также была одинакова. При этом ширина каждого сегмента, образованного режущими элементами на керамической связке 2, больше, чем ширина сегментов, образованных режущими элементами 3 на бакелитовой связке.

Данное обстоятельство продиктовано последующей равномерной обработкой изделий, а также уменьшением радиального и торцевого износа круга.

После этого композиционный шлифовальный круг спекают по технологии производства абразивных кругов на бакелитовой связке. В итоге получается композиционный абразивный круг с чередующимися режущими элементами 2 и 3 с одинаковой твёрдостью и зернистостью, но с разными связками.

Для частей абразивного инструмента на бакелитовой связке (структура абразивного изделия двухсоставная, поры отсутствуют) применяют:

- электрокорунд нормальный марки 16А, 15А, 14А, 13А, 12А (микротвёрдость 20...22 ГПа, механическая прочность 80 %, абразивная способность 82 %, прочность единичного зерна 20 Н);
- карбид кремния чёрный (микротвёрдость 25...27 ГПа, механическая прочность 85 %, абразивная способность 90 %, прочность единичного зерна 25 Н).

Для частей абразивного инструмента на керамической связке (структура абразивного изделия трёхсоставная, при этом средние размеры пор в структуре абразивного изделия 150 мкм – 25...30 % в объёме) применяют:

- легированный электрокорунд хромистый, легированный хромом, марки 34А, 33А, 32А (микротвёрдость 30...32 ГПа, механическая прочность 90 %, абразивная способность 162 %, прочность единичного зерна 30 Н);
- кубический нитрид бора (микротвёрдость 33...36 ГПа, механическая прочность 95 %, абразивная способность 189 %, прочность единичного зерна 35 Н).

В частном примере круги изготовлены из зерна изометрической формы Кф-(1,15-1,46) зернистостью 16...80.

Зернистость абразивного материала на бакелитовой связке F180, а на керамической – F150, согласно ГОСТ Р 52381-2005. Зерновой состав также соответствует требованиям ГОСТ Р 52381-2005.

Композиционный шлифовальный круг на операции торцевого шлифования работает следующим образом.

Режущие элементы 2 на керамической связке шлифовального круга 1 в процессе обработки обладают высокой огнеупорностью, водостойкостью, химической стойкостью и хорошо сохраняют профиль круга. Режущие элементы 3 на бакелитовой связке шлифовального круга 1 обеспечивают безприжоговое шлифование.

Форма режущих элементов 2 и 3 (см. рис. 2) в осевом направлении в виде равнобоких трапеций, большее основание которых расположены противоположно друг другу, обеспечивает их надёжное сцепление. Боковые границы режущих элементов 2 и 3, расположенные по спирали по всей плоскости торца круга, позволяют без ударов внедряться абразивным зёрнам в обрабатываемый металл. Наличие режущих элементов 2 и 3 на торце круга без впадин повышает производительность обработки и, соответственно, увеличивает эффективность процесса шлифования [1].

Проведённые эксплуатационные испытания данного шлифовального круга с новыми конструктивными особенностями показали высокие характеристики как самого круга, так и результатов обработки металлических изделий по сравнению с предшествующими аналогами.

Ниже приведена таблица сравнения результатов испытаний применяемых кругов и новых композиционных кругов, составленная по результатам испытаний (см. табл. 1).

Таблица 1

Сравнение результатов испытаний применяемых кругов и новых композиционных кругов

| Эксплуатационные характеристики (для зерна 13А) | Применяемые шлифовальные круги | Новые композиционные круги |
|---|--------------------------------|----------------------------|
| Уменьшение шероховатости обрабатываемой поверхности | В 1,25...1,4 раза | В 1,55...1,7 раза |
| Снижение тангенсального износа круга | В 1,6...2,2 раза | В 2,5...2,8 раза |
| Повышение режущей способности | В 1,2...1,4 раза | До 1,9 раза |
| Уменьшение линейного износа | В 1,4...1,6 раза | В 1,8...2,2 раза |

Для выбора режимов обработки и условий технологических воздействий предлагаемого шлифовального круга на рельс рассматривается профиль нового рельса типа Р65 (см. рис. 3).

С математической точки зрения задача сводится к решению системы нелинейных алгебраических уравнений вида

$$(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 = (x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2, \quad (1)$$

где i – порядковый номер дорожки шлифования, $i = 1 \dots n$; x_i, y_i – переменные функции $y = f(x)$, характеризующие поперечный профиль рельса.

Для решения системы взяты граничные условия $x_0 = x^*$, $x_n = x^{**}$ – известные величины. Форма профиля рельса задана как кусочно-гладкая кривая, состоящая из трёх дуг окружностей и линейного участка:

$$f(x) = \begin{cases} \sqrt{500^2 - x^2} - 500 & \text{при } 0 \leq x \leq 10,0, \\ \sqrt{80^2 - (x - a_1)^2} - b_1 & \text{при } 10,0 \leq x \leq 24,55, \\ \sqrt{15^2 - (x - a_1)^2} - b_2 & \text{при } 24,55 \leq x \leq 36,5, \\ a_3 \cdot x + b_3 & \text{при } 36,5 \leq x \leq 38,0. \end{cases} \quad (2)$$

Коэффициенты $a_1, b_1, a_2, b_2, a_3, b_3$ рассчитаны при условии совпадения кривых в контрольных точках. Если расположить начало координат в центре поверхности катания рельса, то $x_1 = 10,0, y_1 = -0,1001, x_2 = 24,55, y_2 = -1,7, x_3 = 36,5, y_3 = -15,7, x_4 = 38,0, y_4 = -35,6$.

Используя координаты контрольных точек, составим три системы алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} (10,0 - a_1)^2 + (-0,1001 + b_1)^2 = 80^2, \\ (24,55 - a_1)^2 + (-1,7 + b_1)^2 = 80^2; \\ (24,55 - a_1)^2 + (-1,7 + b_1)^2 = 15^2, \\ (36,5 - a_1)^2 + (-15,7 + b_1)^2 = 15^2; \\ -15,7 = a_3 \cdot 36,5 + b_3 \\ -36,5 = a_3 \cdot 38,0 + b_3. \end{cases}$$

В результате решения получили следующие значения:

$$\begin{aligned} a_1 &= 8,567\ 670\ 519, & b_1 &= -80,087\ 276\ 77, \\ a_2 &= 21,515\ 875\ 25, & b_2 &= -16,389\ 931\ 48, \\ a_3 &= 13,266\ 666\ 67, & b_3 &= -468,533\ 333\ 3. \end{aligned}$$

Таким образом, функция, описывающая поперечный профиль рельса, определена.

Решение системы уравнений (2) аналитически весьма затруднительно, поэтому было использовано приближённое вычисление, основанное на методе усреднения. На первом этапе профиль рельса разбивали точками на отрезки таким образом, чтобы абсциссы располагались равномерно. На втором – последовательно рассматривали пары соседних отрезков, для которых строилась оптимизационная функция следующего вида:

$$F(x) = (x_{i-1} - x)^2 + (f(x_{i+1}) - f(x))^2 - (x - x_{j-1})^2 + (f(x) - f(x_{j-1}))^2,$$

где x_{i+1} и x_{i-1} – граничные точки пары отрезков, имеющих общую точку X .

Очевидно, что если длины отрезков одинаковы, то точка X является корнем уравнения $F(x) = 0$, которое решается численным методом дихотомии. При реализации этого метода необходимо, чтобы функция имела различные знаки на интервале поиска корня.

После того как координаты точек, обеспечивающие равномерное разбиение поперечного профиля, найдены, необходимые углы позиционирования шлифовальных кругов вычисляются через тангенсы угла наклона касательной по формуле

$$\alpha_i = \arctg \left(\frac{f(x_i) - f(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} \right) \cdot \frac{180}{\pi}, \quad i = 1 \dots n.$$

Во время процесса шлифования из-за нелинейности поперечного профиля t рельса разные шлифовальные круги должны снимать различное количество металла. Следовательно, на эти круги должна подаваться различная мощность от электродвигателя. В данной работе считается, что количество металла, снятого с рельса, пропорционально скорости зёрен шлифовального диска в точке контакта и давлению диска на рельс, т. е.

$$m = \lambda \cdot v \cdot N,$$

где λ – коэффициент пропорциональности; v – скорость зёрен шлифовального диска относительно рельса; N – сила давления диска на рельс.

С другой стороны, количество снимаемого металла можно вычислить как разность между истинным и аппроксимированным значениями ширины дорожек шлифования профиля рельса, помноженную на единицу длины.

В данной работе каждый участок профиля рельса, соответствующий какой-либо дорожке шлифования, дополнительно разбивался на 50 линейных отрезков. С использованием этих координат граничных точек отрезков вычислялся интеграл, соответствующий площади криволинейной трапеции, ограниченной истинным контуром рельса на данном участке, прямой $y = 0$ и вертикальными линиями, проходящими через граничные точки отрезка, равного ширине дорожки шлифования [2].

Количество снимаемого металла вычисляется как площадь, равная разности площадей трапеций, соответствующих истинному и шлифованному профилям рельса, помноженных на единицу длины (см. рис. 4).

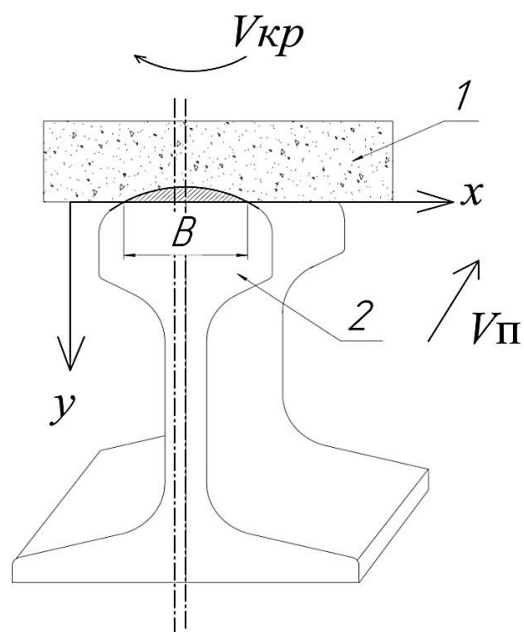
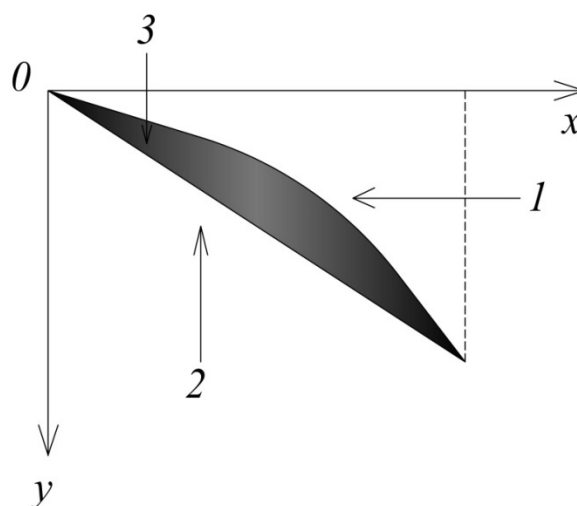


Рис. 3. Схема удаления металла с головки рельса по предполагаемой технологии: 1 – шлифовальный круг; 2 – обрабатываемый рельс; В – полоса шлифования металла



1 – истинный профиль рельса; 2 – профиль дорожки шлифования, 3 – количество снимаемого металла (разность площадей, ограниченных профилями 1 и 2, помноженных на единицу длины)

Рис. 4. К определению количества снимаемого металла

Таким образом, в результате расчётов для каждой дорожки шлифования получается целая область допустимых значений давления и относительной скорости зёрен круга, удовлетворяющих соотношению (1). Поскольку скорость зёрен напрямую связана с угловой скоростью вращения шлифовального круга соотношением

$$v_z = \omega_d \cdot r_z,$$

то в дальнейшем при выборе оптимальных режимов работы можно использовать именно скорость вращения круга.

Для практической реализации алгоритма, описанного в данной работе, использовался язык программирования Delphi. Была составлена программа, позволяющая пользователю в качестве входных данных задавать количество дорожек шлифования и точность вычислений. После окончания расчётов программой предусмотрен вывод на экран графиков начального разбиения профиля рельса, конечного разбиения, соответствующего дорожкам шлифования снимаемого металла (см. табл. 2). В качестве множителя отношения была выбрана площадь снимаемого металла на первой дорожке шлифования. Кроме того, у пользователя имеется возможность сохранять координаты точек равномерного разбиения, углы наклона шлифовальных кругов и распределение количества снимаемого металла в текстовые файлы для дальнейшего анализа [4].

Таблица 2

Связь названий файлов с хранимыми данными

| Название файла | profile coord.txt | angle set.txt | power.txt |
|-----------------|---|---------------------------------|---|
| Хранимые данные | Координаты граничных точек дорожек шлифования на профиле рельса | Углы наклона дорожек шлифования | Распределение количества снимаемого металла по дорожке шлифования |

По вышеописанному методу были сделаны расчёты для двух типов рельсошлифовальных поездов: Speno (112 шлифовальных кругов) и РШП-48 (48 шлифовальных кругов). На рис. 5 и 6 показаны разбиения рабочей поверхности рельса для Speno и РШП-48. Данные о координатах центров дорожек и углах наклона шлифовальных кругов для поездов Speno и РШП-48 приведены в табл. 3 и 4.

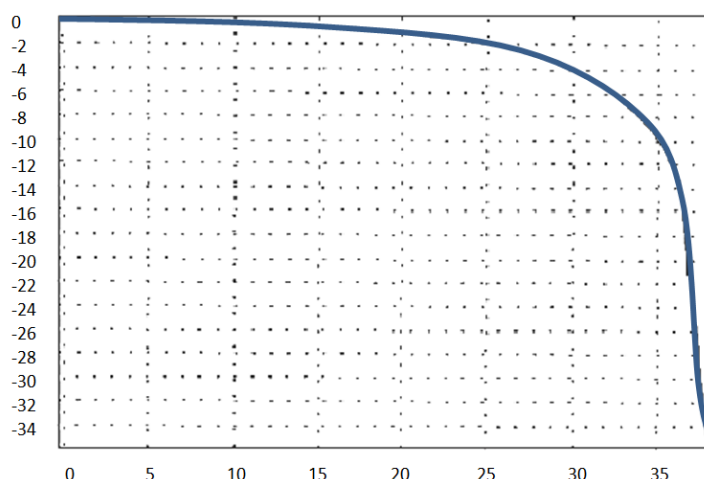


Рис. 5. Схема разбиения контура поверхности рельса на дорожки одинаковой длины для поезда Speno

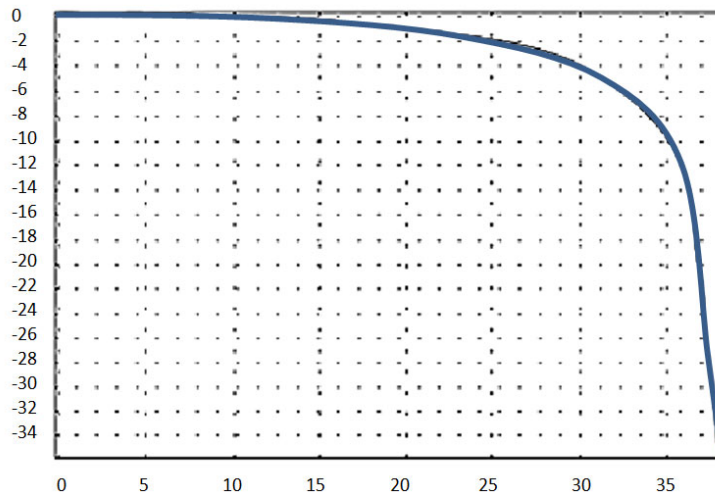


Рис. 6. Схема разбивки контура поверхности рельса на дорожки одинаковой длины для поезда РШП-48

Таблица 3

Координаты центров дорожек шлифования и соответствующие углы наклона для поезда Sreno

| № | Координата X центра дорожки | Координата Y центра дорожки | Угол наклона дорожки | № | Координата X центра дорожки | Координата Y центра дорожки | Угол наклона дорожки |
|----|-----------------------------|-----------------------------|----------------------|----|-----------------------------|-----------------------------|----------------------|
| 1 | 0.574 977 94 | -0.000 66 | -0.065 887 677 | 29 | 31.680 467 61 | -5.374 03 | -42.698 338 57 |
| 2 | 1.724 935 414 | -0.003 31 | -0.197 663 561 | 30 | 32.494 883 3 | -6.1855 | -47.094 094 86 |
| 3 | 2.874 888 09 | -0.0086 | -0.329 439 941 | 31 | 33.244 724 58 | -7.057 02 | -51.489 952 77 |
| 4 | 4.024 828 755 | -0.016 53 | -0.461 216 688 | 32 | 33.925 575 13 | -7.983 48 | -55.885 913 14 |
| 5 | 5.174 758 943 | -0.027 11 | -0.592 994 673 | 33 | 34.533 425 13 | -8.959 43 | -60.281 982 75 |
| 6 | 6.324 671 381 | -0.040 33 | -0.724 773 762 | 34 | 35.064 690 52 | -9.197 91 | -64.678 144 28 |
| 7 | 7.474 558 76 | -0.0562 | -0.856 553 813 | 35 | 35.516 240 31 | -11.0365 | -69.074 399 37 |
| 8 | 8.624 422 499 | -0.074 72 | -0.988 335 686 | 36 | 35.885 414 03 | -12.1255 | -73.470 773 2 |
| 9 | 9.774 255 197 | -0.095 88 | -1.120 034 582 | 37 | 36.170 031 95 | -13.2396 | -77.867 249 28 |
| 10 | 10.923 935 38 | -0.124 05 | -1.687 838 102 | 38 | 36.368 411 91 | -14.3722 | -82.263 803 42 |
| 11 | 12.073 192 54 | -0.166 19 | -2.511 514 276 | 39 | 36.487 634 07 | -15.5162 | -85.836 922 16 |
| 12 | 13.221 747 61 | -0.224 84 | -3.335 206 508 | 40 | 36.572 652 68 | -16.6639 | -85.689 374 18 |
| 13 | 14.369 357 06 | -0.3 | -4.158 910 396 | 41 | 36.659 150 54 | -17.8114 | -85.689 374 18 |
| 14 | 15.515 786 63 | -0.391 65 | -4.982 628 085 | 42 | 36.745 649 94 | -18.959 | -85.689 374 18 |
| 15 | 16.660 802 75 | -0.499 77 | -5.806 362 046 | 43 | 36.832 150 76 | -20.1065 | -85.689 374 18 |
| 16 | 17.804 163 91 | -0.624 35 | -6.630 108 853 | 44 | 36.918 652 9 | -21.2541 | -85.689 374 18 |
| 17 | 18.945 638 26 | -0.765 36 | -7.453 871 81 | 45 | 37.005 156 27 | -22.4017 | -85.689 374 18 |
| 18 | 20.084 995 01 | -0.922 76 | -8.277 654 73 | 46 | 37.091 660 77 | -23.5494 | -85.689 374 18 |
| 19 | 21.221 995 84 | -1.096 54 | -9.101 455 699 | 47 | 37.178 166 3 | -24.697 | -85.689 374 18 |
| 20 | 22.356 403 74 | -1.286 64 | -9.925 273 421 | 48 | 37.264 672 76 | -25.8447 | -85.689 374 18 |
| 21 | 23.487 983 26 | -1.493 04 | -10.749 107 33 | 49 | 37.351 180 04 | -26.9923 | -85.689 374 18 |
| 22 | 24.615 179 24 | -1.721 99 | -12.213 373 15 | 50 | 37.437 688 04 | -28.14 | -85.689 374 18 |
| 23 | 25.729 303 85 | -2.005 35 | -16.325 984 91 | 51 | 37.524 196 65 | -29.2877 | -85.689 374 18 |
| 24 | 26.819 269 65 | -2.370 55 | -20.721 133 3 | 52 | 37.610 705 76 | -30.4354 | -85.689 374 18 |
| 25 | 27.878 068 96 | -2.818 21 | -25.116 389 31 | 53 | 37.697 215 26 | -31.8351 | -85.689 374 18 |
| 26 | 28.899 467 53 | -3.345 71 | -29.511 731 8 | 54 | 37.783 725 04 | -32.7308 | -85.689 374 18 |
| 27 | 29.877 455 59 | -3.949 95 | -33.907 173 79 | 55 | 37.870 234 99 | -33.8785 | -85.689 374 18 |
| 28 | 30.806 276 96 | -4.627 38 | -38.302 702 82 | 56 | 37.956 745 | -35.0262 | -85.689 374 18 |

Таблица 4

Координаты центров дорожек шлифования и соответствующие углы наклона для поезда РШП-48

| № | Координата X центра дорожки | Координата Y центра дорожки | Угол наклона дорожки | № | Координата X центра дорожки | Координата Y центра дорожки | Угол наклона дорожки |
|----|-----------------------------|-----------------------------|----------------------|----|-----------------------------|-----------------------------|----------------------|
| 1 | 1.341 511 | -0.0036 | -0.153 73 | 13 | 32.1983 | -5.945 54 | -45.6455 |
| 2 | 4.024 503 | -0.018 | -0.461 18 | 14 | 33.888 46 | -8.016 25 | -55.9101 |
| 3 | 6.707 395 | -0.046 79 | -0.768 64 | 15 | 35.182 61 | -10.355 | -66.175 |
| 4 | 9.390 106 | -0.090 67 | -1.105 27 | 16 | 36.039 28 | -12.8871 | -76.44 |
| 5 | 12.071 69 | -0.175 31 | -2.510 72 | 17 | 36.470 87 | -15.5284 | -84.9998 |
| 6 | 14.749 55 | -0.337 77 | -4.432 49 | 18 | 36.6887 | -18.2034 | -85.6894 |
| 7 | 17.420 51 | -0.589 94 | -8.276 13 | 19 | 36.890 43 | -20.8797 | -85.6894 |
| 8 | 20.081 57 | -0.093 154 | -8.276 13 | 20 | 37.092 17 | -23.5561 | -85.6894 |
| 9 | 22.729 74 | -1.362 21 | -10.198 | 21 | 37.293 91 | -26.2325 | -85.6894 |
| 10 | 25.346 38 | -1.946 49 | -14.9763 | 22 | 37.495 65 | -28.9089 | -85.6894 |
| 11 | 27.8574 | -2.862 75 | -25.1171 | 23 | 37.697 39 | -31.5853 | -85.6894 |
| 12 | 30.166 26 | -4.209 19 | -35.3812 | 24 | 37.899 13 | -34.2618 | -85.6894 |

Зависимость объёма снимаемого металла от номера дорожки шлифования приведена на рис. 7 и 8.

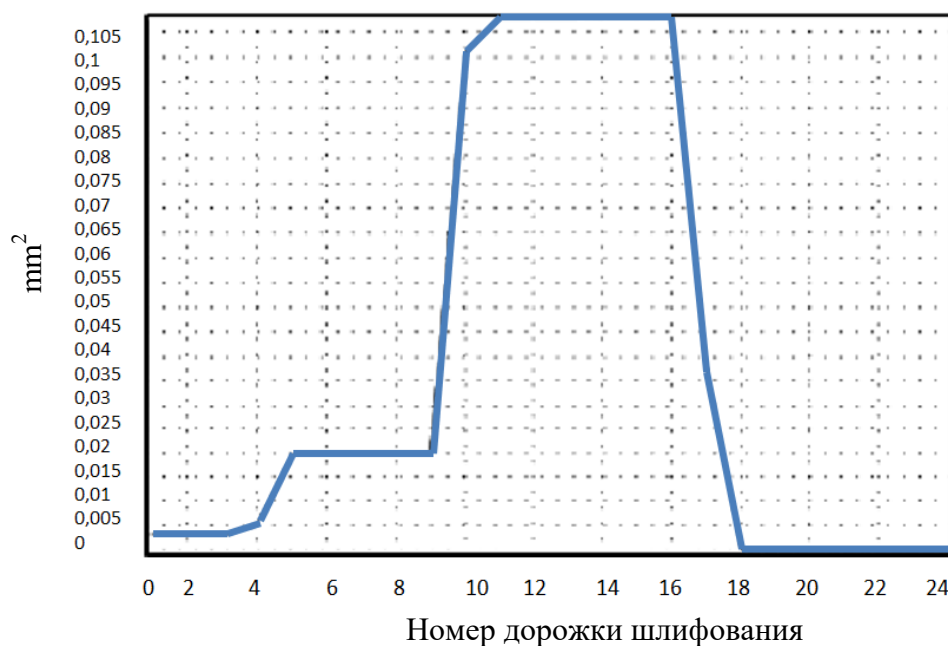


Рис. 7. График к определению площади снимаемого металла по номерам дорожек шлифования поезда Sreno

Видно, что из-за большего количества дорожек для поезда Sreno объём снимаемого металла меньше, чем для поезда РШП-48. Иными словами, поезд Sreno точнее воспроизводит профиль рельса. Значения площади снимаемого металла для обоих типов поездов приведены в табл. 5. Кроме того, в данной работе была вычислена относительная площадь снимаемого металла в поперечном сечении рельса, распределение которой по дорожке шлифования показано на рис. 7 и 8. Видно, что относительные значения площади близки по значению, т. к. уменьшение дорожек шлифования для поезда Sreno происходит равномерно [6].

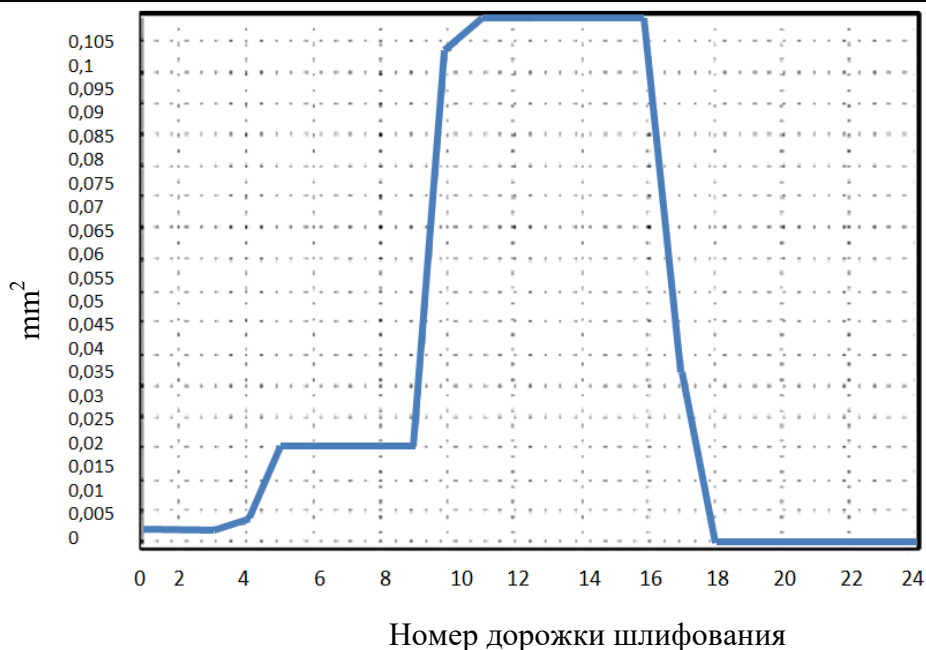


Рис. 8. График к определению площади снимаемого металла по номерам дорожек шлифования поезда РШП-48

Таблица 5

Объем снимаемого металла для рельсошлифовальных поездов Speno и РШП-48

| Для поезда Speno | | | | Для поезда РШП-48 | |
|------------------|--------------------------|-----------|--------------------------|-------------------|--------------------------|
| № дорожки | Объем снимаемого металла | № дорожки | Объем снимаемого металла | № дорожки | Объем снимаемого металла |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 0.000 253 | 29 | 0.008 461 | 1 | 0.003 218 |
| 2 | 0.000 253 | 30 | 0.008 462 | 2 | 0.003 218 |
| 3 | 0.000 253 | 31 | 0.008 462 | 3 | 0.003 218 |
| 4 | 0.000 253 | 32 | 0.008 463 | 4 | 0.004 86 |
| 5 | 0.000 253 | 33 | 0.008 463 | 5 | 0.020 115 |
| 6 | 0.000 253 | 34 | 0.008 464 | 6 | 0.020 116 |
| 7 | 0.000 253 | 35 | 0.008 464 | 7 | 0.020 117 |
| 8 | 0.000 253 | 36 | 0.008 465 | 8 | 0.020 119 |
| 9 | 0.000 274 | 37 | 0.008 465 | 9 | 0.020 12 |
| 10 | 0.000 158 4 | 38 | 0.008 466 | 10 | 0.100 708 |
| 11 | 0.000 158 4 | 39 | 0.008 466 | 11 | 0.107 574 |
| 12 | 0.000 158 4 | 40 | $1.45 \cdot 10^{-16}$ | 12 | 0.107 582 |
| 13 | 0.000 158 4 | 41 | $8.78 \cdot 10^{-16}$ | 13 | 0.107 589 |
| 14 | 0.000 158 4 | 42 | $-4.00 \cdot 10^{-16}$ | 14 | 0.107 597 |
| 15 | 0.000 158 4 | 43 | $-3.66 \cdot 10^{-16}$ | 15 | 0.107 603 |
| 16 | 0.000 158 4 | 44 | $-8.54 \cdot 10^{-17}$ | 16 | 0.107 604 |
| 17 | 0.000 158 4 | 45 | $5.10 \cdot 10^{-16}$ | 17 | 0.038 212 |
| 18 | 0.000 158 5 | 46 | $3.07 \cdot 10^{-16}$ | 18 | $-4.46 \cdot 10^{-16}$ |
| 19 | 0.000 158 5 | 47 | $-1.76 \cdot 10^{-16}$ | 19 | $4.64 \cdot 10^{-16}$ |
| 20 | 0.000 158 5 | 48 | $3.13 \cdot 10^{-16}$ | 20 | $-8.40 \cdot 10^{-16}$ |
| 21 | 0.000 158 5 | 49 | $-1.1 \cdot 10^{-16}$ | 21 | $-3.17 \cdot 10^{-17}$ |
| 22 | 0.006 045 | 50 | $-1.01 \cdot 10^{-16}$ | 22 | $-2.72 \cdot 10^{-15}$ |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----|-----------|----|------------------------|----|------------------------|
| 23 | 0.008 457 | 51 | $4.66 \cdot 10^{-16}$ | 23 | $-4.24 \cdot 10^{-16}$ |
| 24 | 0.008 458 | 52 | $1.38 \cdot 10^{-16}$ | 24 | $3.83 \cdot 10^{-16}$ |
| 25 | 0.008 459 | 53 | $7.01 \cdot 10^{-16}$ | | |
| 26 | 0.008 459 | 54 | $7.38 \cdot 10^{-16}$ | | |
| 27 | 0.008 46 | 55 | $6.98 \cdot 10^{-16}$ | | |
| 28 | 0.008 46 | 56 | $-2.27 \cdot 10^{-16}$ | | |

Выводы

1. Применение новых композиционных шлифовальных инструментов для механической обработки профиля железнодорожных рельсов позволяет повысить режущую способность абразивного инструмента и уменьшить линейный износ шлифовального круга.

2. На основе проведённых исследований установлены зависимости для предлагаемого способа шлифования торцом круга, позволяющие рассчитывать значения удаляемого металла с головки рельса.

3. По результатам моделирования процесса шлифования удалось определить объём удаляемого металла со сложнопрофильной головки рельса при различных углах наклона шлифовального круга.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теоретические особенности формирования поверхности катания головок рельсов при шлифовании / В. Г. Рахчеев, И. С. Максимов, С. А. Галанский, А. Г. Мустафин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № V-1 (53). – С. 65-70.
2. Повышение эффективности приводного механизма стрелочного перевода / С. Н. Иванов, К. К. Ким, М. Ю. Сариллов, М. В. Семибратова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № IV-1 (40). – С. 46-51.
3. Патент № 2697542 Российская Федерация, МПК В24D 7/00 (2006.01). Композиционный шлифовальный круг для торцевого шлифования: № 2019104680: заявлено 19.02.2019: опубликовано 15.08.2019 / Рахчеев В. Г., Максимов И. С., Галанский С. А., Мустафин А. Г., Денисов В. В., Пруссов М. В.; заявитель и патентообладатель Пруссов М. В. – 9 с.
4. Попович, М. В. Путевые машины: моногр. / М. В. Попович, В. М. Бугаенко, Б. Г. Волковойнов. – М.: Транспортная книга, 2009. – 820 с.
5. Галанский, С. А. К методике разработки абразивного инструмента для шлифования рельсов в пути / С. А. Галанский, И. С. Максимов, В. Г. Рахчеев // Наука и образование транспорту. – 2020. – № 2. – С. 105-107.
6. Шумячер, В. М. Повышение надёжности и эффективности рельсошлифовальных инструментов на бакелитовой связке. Теория шлифования. Физико-химические основы / В. М. Шумячер, С. А. Крюков, И. Ю. Орлов. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2021. – 160 с.