

МЕХАНИКА, МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.923.1

А.С. Ильиных, А.В. Матафонов, М.С. Галай

Модель формирования поперечного ремонтного профиля рельсов при механической обработке шлифованием в условиях железнодорожного пути

Основными задачами шлифования рельсов являются формообразование поперечного профиля рельса и удаление дефектов различного происхождения. На сегодняшний день лидером в области шлифования железнодорожного пути является швейцарская фирма Speno, предлагающая технологию обработки рельсов с применением схемы плоского шлифования торцом круга. Данная схема аналогична схеме шлифования на станках. Наряду со схожестью схем шлифования существуют принципиальные отличия, заключающиеся в невозможности назначения глубины резания, в неодинаковой величине съема металла при обработке поверхности катания и рабочего скругления, в различии условий работы шлифовальных кругов на отдельных участках головки рельса. Указанные отличия свидетельствуют о том, что процесс шлифования рельсов в пути нестабилен и, как следствие, не обеспечивает требуемого формообразования поперечного профиля и качества поверхности. С целью повышения точности формирования профиля головки рельса при обработке шлифованием разработана модель, учитывающая параметры абразивного инструмента, геометрические характеристики ремонтных профилей рельсов и технологическое наследование после обработки каждым абразивным инструментом. Основным параметром, сдерживающим применение модели на практике, является глубина резания, которая в существующих технологических процессах шлифования рельсов не предполагает назначения в качестве исходных данных, что приводит к ее самопроизвольному формированию в процессе обработки. Глубина резания может быть определена расчетным путем по зависимостям, устанавливающим взаимосвязь между глубиной резания и кинематическими и силовыми параметрами процесса шлифования. При этом полученное значение глубины резания является предельно допустимым, а его превышение приведет к катастрофическому износу абразивного инструмента. Результаты моделирования поперечного ремонтного профиля рельсов могут быть использованы при проектировании технологических процессов шлифования.

Ключевые слова: абразивная обработка, шлифование рельсов, профиль рельса, качество поверхности.

В современных условиях значительное количество отказов пути происходит из-за накопления в процессе эксплуатации повреждений рельсов. При этом отказ рельса является отказом пути в целом. Проблема продления срока службы рельсов в настоящее время решается совершенствованием старых и разработкой новых технологических процессов восстановления служебных свойств рельсов. Одним из приоритетных направлений в этой области является профильное шлифование.

Шлифование поверхности катания головки рельса в качестве мероприятия по удалению волнообразного износа начали применять в США с конца 1930-х гг. В мировой практике ремонта и технического обслуживания железнодорожного пути понятие восстановления служебных свойств рельсов шлифованием появилось в середине 1960-х гг. [1]. При этом перечень устраняемых дефектов рельсов был расширен за счет внедрения более совершен-

ных методов работы рельсошлифовальных поездов. Согласно руководящим документам Американской инженерной железнодорожной ассоциации (AREA), шлифование рельсов не только устраняет дефекты различного происхождения (волнообразные износы, седловины, механические повреждения, смятия, отслоения и выкрашивания металла, сбитые концы в стыках и др.), но и формирует требуемый поперечный профиль рельсов, обеспечивающий оптимальное взаимодействие колеса с рельсом [2].

На сегодняшний день для шлифования рельсов используются машины и технологии наиболее известных фирм, таких как Fairmont Railway Loram, Jackson Jordan Inc., Pandrol Jacksons Technologies, Plasser & Theurer и др. Признанным лидером в этой области является компания Speno International SA, предложившая технологию обработки рельсов в пути с применением схемы плоского шлифования торцом круга.

В России этот способ получил распространение в середине 1980-х гг. с появлением на Горьковской железной дороге рельсошлифовального поезда URR-112 производства швейцарской фирмы Speno.

В процессе работы рельсошлифовальных поездов приводные электродвигатели со шлифовальными кругами отклонены на различные углы в плоскости, перпендикулярной продольной оси рельса (рис. 1). Таким образом, каждый взятый в отдельности шлифовальный круг, обрабатывая поверхность катания головки рельса, оставляет за собой след – дорожку шлифования, формируя при этом поперечный профиль головки рельса.

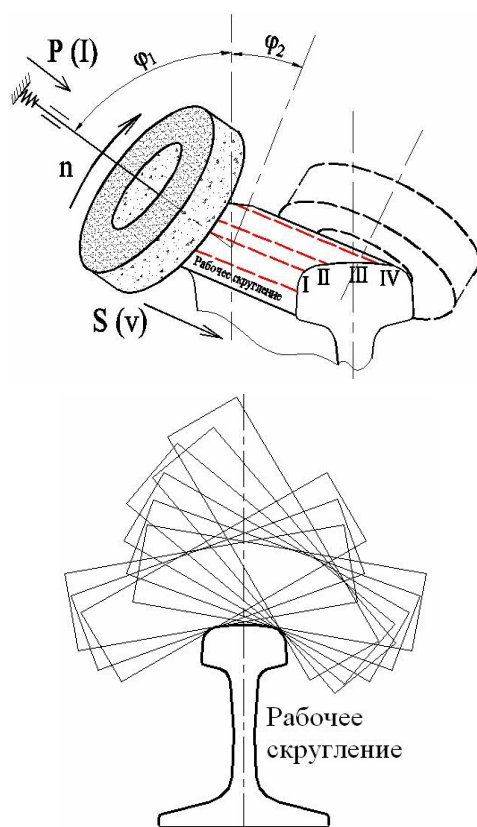


Рис. 1. Схема наклона шлифовальных кругов при формировании профиля рельса

С позиций металлообработки такая схема шлифования представляет собой обдирочное шлифование с высокими скоростями и усилиями. Следует отметить, что схема плоского шлифования торцом круга, реализуемая по методу фирмы Speno, идентична схеме шлифования на станках в стационарных условиях. Основное отличие состоит в наличии упругой подвески привода шлифовальной головки через пневмоцилиндр.

Наряду со схожестью схем шлифования рельсов в пути и шлифования чашечными кругами в стационарных условиях на станках, существуют принципиальные отличия, вносящие существенные изменения в процесс обработки рельсов и влияющие на качество выполняемых работ [3].

Во-первых, шлифование рельсов в пути отличается нестабильностью нагрузки на шлифовальный круг. Это определяется прежде всего постоянно меняющейся в процессе обработки глубиной резания. Обработка рельсов в пути сопряжена с наличием отклонений поверхности волнообразного характера различной длины и величины на большой протяженности, что определяет переменный и длительный характер воздействий со стороны рельса на круг.

Во-вторых, условия резания каждого отдельно работающего круга значительно различаются в зависимости от угла наклона шлифовальной головки. Так, при обработке поверхности катания кругом захватывается большая зона, чем при обработке рабочего скругления головки рельса. Таким образом, на различных участках головки рельса формируется дорожка шлифования разной ширины, и на этих участках соответственно действует различная удельная нагрузка на единичное зерно (рис. 2).

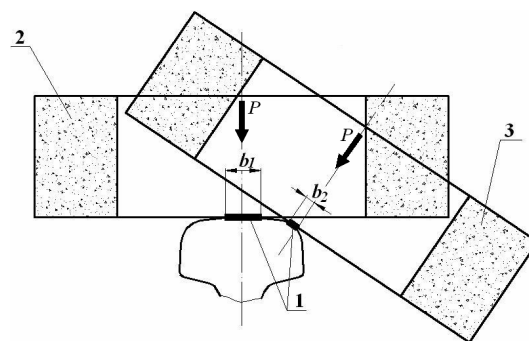


Рис. 2. Схема обработки поперечного профиля рельса:

1 – дорожка шлифования; 2 – обработка поверхности катания; 3 – обработка рабочего скругления; b_1, b_2 – ширина дорожки шлифования, $b_1 > b_2$

В-третьих, существенные различия в работе абразивного инструмента вносят значительные изменения физико-механических свойств рельсов. В процессе эксплуатации железнодорожного пути значительно изменяют-

ся свойства головки рельса по сечению. В первую очередь происходит резкое изменение твердости по периметру головки (рис. 3), что свидетельствует о значительном наклепе металла у рабочей грани. Повышение твердости на отдельных участках головки рельса способствует ужесточению условий работы шлифовальных кругов, которые в итоге определяют конечный результат обработки.

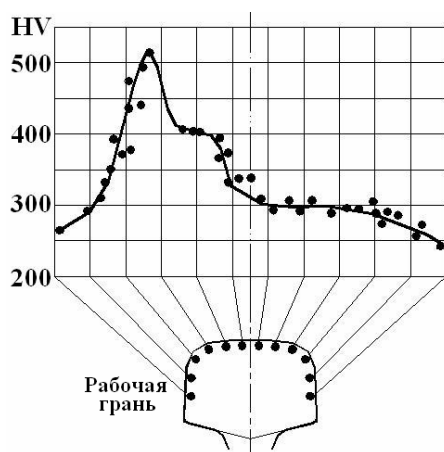


Рис. 3. Изменение твердости по периметру головки рельса

Указанные отличия позволяют сделать вывод, что процесс шлифования рельсов в пути нестабилен. Различные условия работы шлифовальных кругов приводят не только к изменению производительности и неодинаковому износу, но и к разному качеству обработанной поверхности, которое в дальнейшем будет характеризовать различные эксплуатационные свойства определенных участков головки рельса.

Основным документом, регламентирующим процесс шлифования рельсов в пути, является единая нормативная документация, в основе которой лежит технология фирмы Speno и опыт эксплуатации рельсошлифовальных поездов, полученный на европейских железных дорогах [4]. С учетом несоответствия российских и европейских стандартов на рельсы в технологию были внесены некоторые изменения и проведена адаптация к местным условиям эксплуатации, но ожидаемый эффект получен не был. Это объясняется отсутствием в нормативной документации каких-либо рекомендаций по назначению режимов шлифования для определенных условий обработки рельсов и критериев контроля качества выполняемых работ. Кроме

того, из-за большой грузонапряженности российских железных дорог основой проектирования технологического процесса в существующей нормативной документации является формирование требуемого поперечного профиля. С этой целью разработан ряд ремонтных профилей рельсов, которые должны формироваться при обработке определенных участков пути с учетом условий их эксплуатации, износа, грузонапряженности и периодичности обработки. При этом на эксплуатируемых рельсошлифовальных поездах программы расстановки шлифовальных кругов на различные углы ориентированы на формирование профилей рельсов в соответствии с европейскими стандартами и не обеспечивают геометрических параметров ремонтных профилей, представленных в нормативной документации для российских железных дорог.

Отсутствие методики назначения режимов шлифования привело к тому, что на практике шлифование рельсов сводится к удалению поверхностных дефектов без учета формирования поперечного, ремонтного профиля рельсов. Это ведет к существенному сокращению срока службы рельсов по причине еще большего развития дефектов в поверхностных слоях головки рельсов из-за неправильного взаимодействия колеса с рельсом.

Кроме того, диапазон режимов работы существующего рельсошлифовального оборудования (усилие прижатия круга к рельсу, рабочая скорость поезда) изначально определялся из расчета применения шлифовальных кругов зарубежного производства (A.S.I., Slevvers и др.) с определенными эксплуатационными свойствами. В настоящее время используются шлифовальные круги российского производства («Металлист», г. Советск), характеристики которых отличны от зарубежных, и соответственно эффективность их использования на заявленных режимах шлифования вызывает сомнение.

Таким образом, целью исследований является создание модели формирования ремонтного профиля рельсов при шлифовании с учетом параметров рабочего оборудования рельсошлифовального поезда, характеристик абразивного инструмента и обеспечения мак-

симальной производительности выполнения работ.

Основными исходными данными при проектировании технологического процесса шлифования рельсов являются геометрические параметры изношенного и ремонтного профилей рельсов, характеристика абразивного инструмента и допустимые режимы шлифования, а также параметры рабочего оборудования рельсошлифовального поезда.

Геометрические параметры поперечного профиля рельсов в настоящее время определяются в пути различными способами и средствами измерений и, как правило, представляются массивом точек с координатами $(R_i; \varepsilon_i)$, а геометрию профиля можно описать уравнением

$$R = f(\varepsilon), \quad (1)$$

где R – радиус-вектор измеряемой точки профиля, мм; ε – полярный угол в измеряемой точке, град.

Основной задачей рассматриваемой модели является определение ширины дорожки шлифования на обрабатываемом участке профиля рельса (рис. 4) [5]. Для этого необходимо знать, в какой именно точке головки рельса произойдет контакт со шлифовальным кругом, т.е. необходимо определить координаты точки K с учетом угла наклона φ шлифовальной головки.

Торцевую поверхность шлифовального круга представим прямой $m-m$, касательной к профилю рельса в точке K . С учетом того, что искомые координаты одновременно принадлежат касательной и профилю рельса, их зна-

чения определяются совместным решением нормального уравнения прямой $m-m$ с уравнениями параметризации координат точки K , полученных в соответствии с выражением (1):

$$\begin{cases} x_K \cos \psi + y_K \sin \psi - (x_K / \cos \varepsilon_K) \cos(\psi - \varepsilon_K) = 0, \\ x_K = f(\varepsilon_K) \cos \varepsilon_K, \\ y_K = f(\varepsilon_K) \sin \varepsilon_K. \end{cases} \quad (2)$$

При работе шлифовальный круг врезается в поверхность рельса на заданную глубину резания t , которую можно определить по нормали к обрабатываемой поверхности, отложив из точки K отрезок KN , равный значению t .

Проведем через точку N прямую, параллельную касательной $m-m$. Секущая прямая $n-n$ пересекает границы профиля в точках M и L . Расстояние между этими точками определяет ширину дорожки шлифования B :

$$B = \overline{MN} + \overline{NL}, \quad (3)$$

где $\overline{MN} = \sqrt{(x_N - x_M)^2 + (y_M - y_N)^2}$;

$\overline{NL} = \sqrt{(x_L - x_N)^2 + (y_N - y_L)^2}$.

Таким образом, задача определения ширины дорожки шлифования сводится к нахождению координат точек M и L , которые одновременно принадлежат секущей $n-n$ и профилю рельса, т.е. значения координат точек M и L можно определить совместным решением нормального уравнения прямой $n-n$ с уравнениями параметризации координат этих точек:

– для точки M :

$$\begin{cases} x_M \cos \psi + y_M \sin \psi - R_N \cos(\psi - \varepsilon_N) = 0, \\ x_M = f(\varepsilon_M) \cos \varepsilon_M, \\ y_M = f(\varepsilon_M) \sin \varepsilon_M; \end{cases} \quad (4)$$

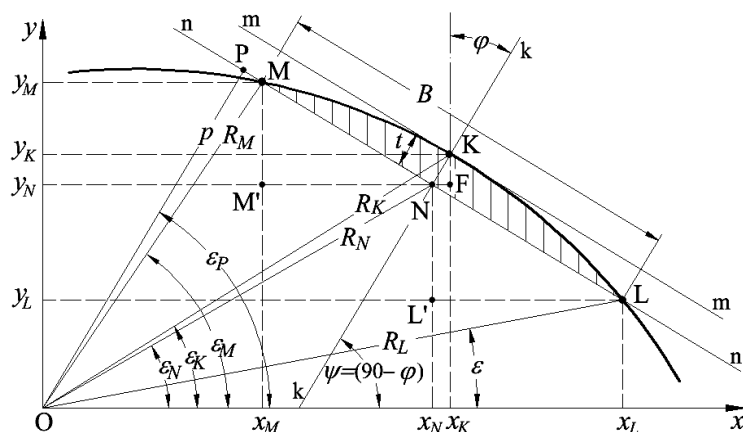


Рис. 4. Схема к определению ширины дорожки шлифования

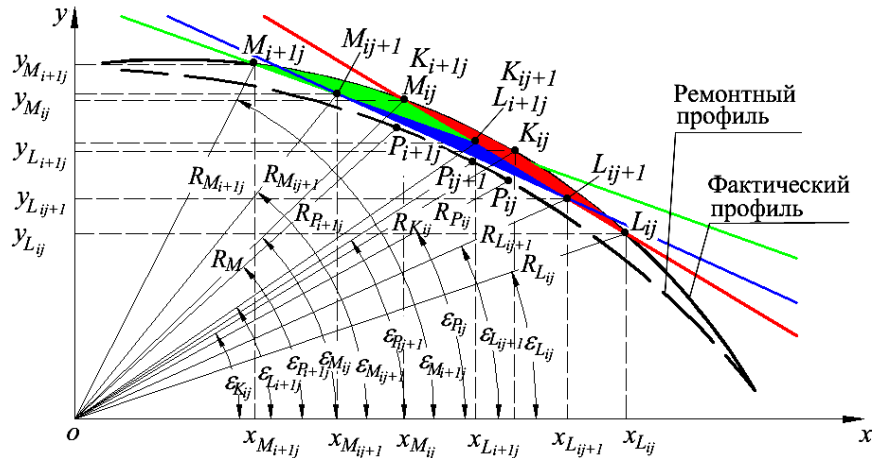


Рис. 5. Схема формообразования поперечного профиля рельса

– для точки L :

$$\begin{cases} x_L \cos \psi + y_L \sin \psi - R_N \cos(\psi - \varepsilon_N) = 0, \\ x_L = f(\varepsilon_L) \cos \varepsilon_L, \\ y_L = f(\varepsilon_L) \sin \varepsilon_L. \end{cases} \quad (5)$$

Совокупность данных о ширине дорожки шлифования в зависимости от глубины резания на каждом отдельном участке профиля дает возможность определения и назначения последовательности формирования ремонтного профиля рельса. Для построения модели формирования ремонтного профиля рельса рассмотрим его участок совместно с фактическим профилем, описываемым уравнением (1) (рис. 5).

В качестве начальной точки для формирования профиля примем точку фактического профиля рельса, координаты которой совпадают с координатами какой-либо точки ремонтного профиля. Предположим, что в соответствии с полученными координатами контакт первого шлифовального круга с поверхностью рельса произойдет в точке K_{ij} . Для этой точки определяется требуемое значение угла наклона шлифовальной головки. С учетом полученного значения глубины резания $t_{расч}$ для данной точки определяются координаты точек M_{ij} и L_{ij} и значения ширины дорожки шлифования. Для последующего абразивного круга точкой контакта с рельсом будет являться точка M_{ij} . Сравнение координат ремонтного профиля с фактическим осуществляется по периметру профиля i и глубине j , которые в конечном итоге определяют необходимое количество проходов рельсошлифовального поезда.

Основным параметром, сдерживающим применение представленной модели на практике, является глубина резания t , которая в существующих технологических процессах шлифования рельсов не предполагает назначения в качестве исходных данных, что приводит к ее самопроизвольному формированию в процессе обработки в зависимости от ряда факторов: усилия прижатия шлифовального круга к рельсу, профиля головки рельса и его физико-механических свойств, режимов обработки и др. [6].

Максимально возможная глубина резания шлифовальным кругом может быть определена из расчета критической нагрузки на единичное зерно:

$$t = \frac{1,25\pi d_3^2 \sigma_{св} K_{стр} v_{ср} (R_{кр} - r_{кр}) Z}{K_1 \tau_c S_n}, \quad (6)$$

где d_3 – диаметр абразивного зерна шлифовального круга, мм; $\sigma_{св}$ – предельная величина напряжений материала связки на растяжение, МПа; $K_{стр}$ – коэффициент структуры шлифовального круга, учитывающий наличие пор в зоне контакта абразивного зерна со связкой; $v_{ср}$ – средняя скорость движения зерен, расположенных на разном расстоянии от оси вращения круга, м/с; $R_{кр}$ – наружный радиус шлифовального круга, мм; $r_{кр}$ – внутренний радиус шлифовального круга, мм; Z – концентрация зерен на рабочей поверхности шлифовального круга, шт./мм²; $K_1 = \sqrt{3,25 \cos \beta_1 / \sin \beta}$, где β – угол между плоскостью сдвига и линией среза, β_1 – угол между линией среза и направлением равнодействующей сил пластического

деформирования срезаемого слоя; τ_c – касательные напряжения, при которых происходит сдвиг в зоне деформации, МПа; $S_{\text{п}}$ – рабочая скорость рельсошлифовального поезда (продольная минутная подача), м/мин [7, 8].

Для сравнения расчетных значений максимально возможной глубины резания t с фактическими значениями, полученными при шлифовании рельсов, проведен эксперимент. Исследования проводились на шлифовальных кругах, изготовленных с использованием циркониевого электрокорунда на бакелитовой связке пяти различных рецептур производства компании «Абразивные заводы Урала»: 35-250×76×150 38А 160 ЧТ2 БУ; 35-250×76×150 38А 100 Т1 БУ; 35-250×76×150 38А 125 СТ3 БУ; 35-250×76×150 38А 125 ВТ1 БУ; 35-250×76×150 38А 200 ЧТ2 БУ. Методика проведения эксперимента заключалась в изменении усилия прижатия шлифовального круга к рельсу при постоянной скорости резания и продольной подаче. Усилие прижатия изменяет глубину резания, фактическое значение которой определялось измерением геометрии поперечного профиля головки рельса до и после шлифования [9].

В качестве критерия, определяющего оптимальность глубины резания, принят коэффициент шлифования $K_{\text{ш}}$, характеризующий

отношение объема удаленного металла к объемному износу инструмента [10]. В соответствии с этим для каждого прохода рельсошлифовального поезда было рассчитано значение $K_{\text{ш}}$. Значение глубины резания, соответствующее максимальному коэффициенту шлифования, являлось наиболее эффективным и сравнивалось с расчетным. Результаты эксперимента представлены на рис. 6.

Проведенный эксперимент показал, что для максимального коэффициента шлифования $K_{\text{ш}}$ расхождение фактически полученных значений глубины резания t с расчетными значениями $t_{\text{расч}}$ в среднем составляет 12 %. В значительной степени на величину указанных расхождений влияет погрешность измерений глубины резания после шлифования.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- 1) модель формирования поперечного ремонтного профиля рельсов инструментами, работающими по схеме плоского шлифования торцом круга, учитывает особенности обработки рельсов в условиях железнодорожного пути, заключающиеся в упругой подвеске шлифовальных головок и большой протяженности обрабатываемой поверхности;
- 2) данная модель учитывает характеристики рельсошлифовального оборудования, па-

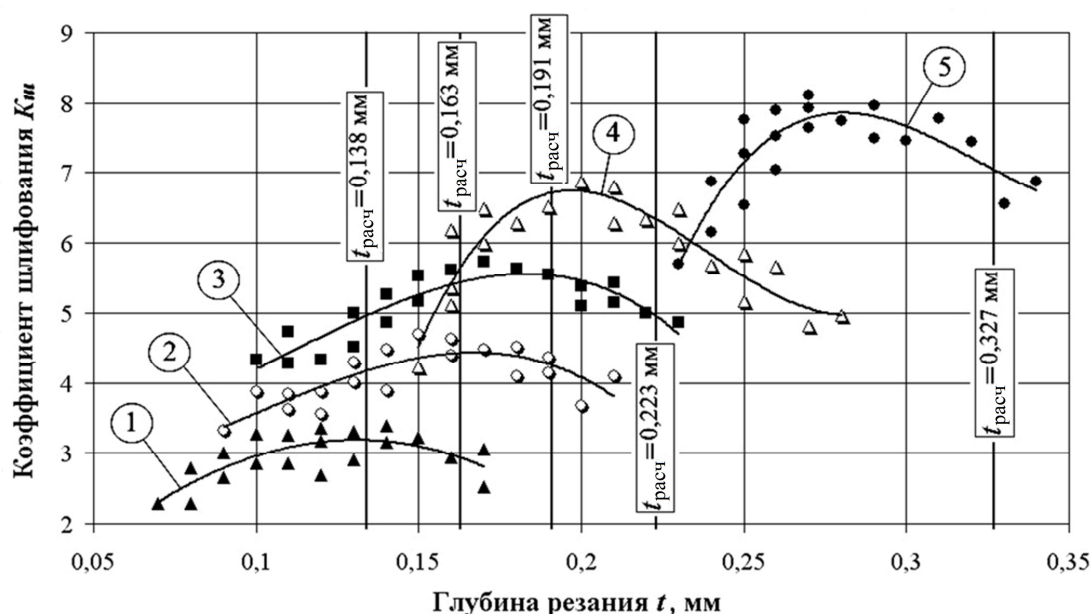


Рис. 6. Влияние глубины резания на коэффициент шлифования для марок шлифовальных кругов: 1 – 35-250×76×150 38А 160 ЧТ2 БУ; 2 – 35-250×76×150 38А 100 Т1 БУ; 3 – 35-250×76×150 38А 125 СТ3 БУ; 4 – 35-250×76×150 38А 125 ВТ1 БУ; 5 – 35-250×76×150 38А 200 ЧТ2 БУ

аметры шлифовальных кругов, физико-механические свойства рельсов и технологические параметры процесса обработки при определении максимальной производительности с требуемым качеством профилирования рельсов и позволяет использовать глубину резания в качестве управляемого параметра механической обработки через контроль усилия прижатия шлифовального круга к рельсу;

3) разработанная модель позволяет обеспечить геометрическую точность головки рельса при формировании ремонтного профиля в соответствии с нормативно-технической документацией, минимизировать количество проходов рельсошлифовального поезда и производить нормирование выполняемых операций.

Библиографический список

1. Никонов А.М. Шлифовка рельсов на железных дорогах Юнион Пэсифик (США) // Железнодорожный транспорт. 1992. Вып. 8. С. 1–3.
2. Kalousek J., Magel E. Rail profile grinding: Heavy-haul and freight applications // Railway Track and Struck. 1997. № 93. Р. 21–22.
3. Ильиных А.С. Особенности современной ресурсосберегающей технологии шлифования рельсов в пути // Политранспортные системы: Материалы VII Всерос. науч.-техн. конф., Красноярск. Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2010. С. 249–253.
4. Технические указания по шлифованию рельсов / ОАО «РЖД». М., 2004. 39 с.
5. Ильиных А.С. Научно-методические основы высокопроизводительной технологии шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути // Вестник СГТУ. 2013. № 1. С. 82–88.
6. Опыт применения рельсошлифовальных поездов с активными рабочими органами на отечественных железных дорогах // В.Г. Альбрехт, А.П. Галуни, Л.Г. Крысанов, А.Н. Русин // Железнодорожный транспорт. 1995. Вып. 3. С. 12–18.
7. Королев А.В., Новоселов Ю.К. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Саратов, 1987. 156 с.
8. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. М.: Машиностроение, 1974. 280 с.
9. Ильиных А.С., Матафонов А.В. Влияние особенностей конструкции рабочего оборудования рельсошлифовальных поездов на процесс обработки рельсов // Тез. VIII Междунар. науч.-техн. конф. «Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке». Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2014. С. 249–252.
10. Аксенов В.А., Ильиных А.С., Матафонов А.В. Применение профильного шлифования рельсов при ремонте и содержании малообслуживаемого пути на участках с различными условиями эксплуатации // Наука и техника транспорта. 2013. № 2. С. 37–40.

A.S. Ilyinykh, A.V. Matafonov, M.S. Galay

The model of the formation of the cross repair profile of rails through the mechanical processing of grinding in the conditions of a railroad track

Abstract. The main objectives of rails grinding is the formation of a rails cross profile and the elimination of various defects. Nowadays the leader in rails grinding is a Swiss company “Speno” suggesting a technology of rail processing using a scheme of flat grinding by an end butt of a wheel. This scheme is similar to the scheme of on-machine grinding. Together with the similarities there are some fundamental differences concerned with impossibility to set a depth of cutting, not identical amount of stripped metal in the processing of tread surface and rounding, a difference in working conditions of the grinding-wheels in different parts of a top of rail. The above mentioned differences indicate that the process of rails grinding in transit is unstable, and, consequently, does not ensure necessary formation of a cross profile and surface quality. To increase the accuracy of the formation of a top of rail profile in the process of grinding, the model considering the parameters of a grinding tool, geometric characteristics of rails repair profiles and technological inheritance after the processing of each grinding tool was developed. The main parameter preventing the model practical application is the depth of cutting which cannot be allocated as initial data in existing technological processes of rails grinding, what leads to its spontaneous formation in the process of grinding. The depth of cutting can be identified by calculating according to the relations between the depth of cutting and kinetic and forceful parameters of grinding. In this

case the value received is maximum permissible and its exceedance will lead to the extreme deterioration of the grinding tool. The results of modeling of the rails cross repair profile can be used in the designing of the grinding technological processes.

Key words: *abrasive processing; rails grinding; rail profile; surface quality.*

Ильиных Андрей Степанович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин». E-mail: asi@stu.ru

Матафонов Алексей Валерьевич – начальник отдела охраны труда, промышленной безопасности и экологии Центральной дирекции по ремонту пути – филиала ОАО «РЖД». E-mail: cdrp@yandex.ru

Галай Марина Сергеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин». E-mail: galayms@stu.ru