

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ РЕЛЬСОВ ПРИ ШЛИФОВАНИИ В УСЛОВИЯХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

А.В. Матафонов, А.Н. Пыко, А.С. Ильиных

Статья посвящена результатам теоретических и экспериментальных исследований, направленных на обеспечение надежности параметров качества обработанной поверхности рельсов при шлифовании в условиях железнодорожного пути. В качестве показателя выбора тех или иных режимов и условий обработки по критерию параметрической надежности предлагается максимум вероятности выполнения задания по параметру шероховатости в заданном интервале. Для различных технологических операций указанная вероятность определяется путем имитационного моделирования, которое осуществляется в виде аддитивных или степенных моделей. Представлена математическая модель надежности технологии шлифования рельсов адекватно отражающая важнейшие технологические параметры функционирования системы и позволяющая проектировать оптимальные технологические процессы.

Для практической реализации разработанной модели проведены исследования по влиянию шероховатости поверхности на циклическую трещиностойкость, контактно-усталостную прочность и износостойкость рельсов, результаты которых позволяют прогнозировать уровень эксплуатационных свойств рельсов на основе полученных значений шероховатости. Изменение шероховатости поверхности рельсов на 20 мкм приводит к изменению её износостойкости на 20–25 %, трещиностойкости и усталостной прочности на 15–20 %. Установлен диапазон изменения шероховатости обработанной поверхности рельса для обеспечения повышенной стойкости рельсов в различных условиях эксплуатации. Так для рельсов, уложенных в кривых участках пути, оптимальная шероховатость должна быть в пределах $R_z = 5 \dots 10$ мкм для обеспечения повышенной износостойкости. Для рельсов на прямых участках пути шероховатость, обеспечивающая повышенную усталостную прочность рельсов должна находиться в пределах $R_z = 35 \dots 50$ мкм. Анализ результатов расчета по надежности технологического обеспечения показал, что надежность обеспечения шероховатости поверхности в требуемых диапазонах для всех штатных программ шлифования не превышает 0,6, что является недостаточным по причине неэффективности применяемых мер по предотвращению появления причин возникновения дефектов при реализации технологии шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути.

Проведена оценка видов, причин и последствий потенциальных дефектов при реализации технологии шлифования рельсов, которая позволила предложить альтернативные технологические решения и увеличить надежность технологического обеспечения шероховатости обработанной поверхности рельсов в установленных диапазонах более чем в 2 раза. Результаты проведенных исследований позволяют повысить уровень технологического обеспечения качества обработанной поверхности рельсового пути за счет учета фактического состояния рельсов и функциональных возможностей используемого оборудования.

Результаты промышленных испытаний показали, что предложенные решения позволили повысить надежность технологического обеспечения качества поверхности рельса при шлифовании в условиях железнодорожного пути до 0,85 при 10%-ном увеличении времени планово-подготовительных работ.

Ключевые слова: абразивная обработка, шлифование рельсов, качество поверхности, шероховатость, технологическое обеспечение.

Важнейшим фактором оптимизации расходов путевого хозяйства железных дорог является применение ресурсосберегающих технологий, позволяющих продлевать межремонтные сроки и снижать трудоёмкость текущего содержания пути. Одним из наиболее перспективных направлений в ресурсосбережении является шлифование рельсов, которое обеспечивает продление срока их службы на 30–40 % и дает значительные преимущества в области экономии материальных ресурсов, безопасности движения и экологии.

На сегодняшний день на железных дорогах России эксплуатируется 21 рельсошлифовальный поезд. Опыт эксплуатации рельсошлифовальных поездов дает основание отметить, что повышение эффективности технологического процесса шлифования рельсов является постоянной задачей в области совершенствования организации работ по ремонту и текущему содержанию рельсового пути.

В целом для профильного шлифования рельсов одним из факторов характеризующих эффективность технологического процесса является обеспечение заданных физико-механических свойств обработанной поверхности, которые в значительной степени определяются параметрами качества обработки [1–5].

В соответствии с действующей нормативно-технической документацией, шероховатость обработанной поверхности и наличие или отсутствие прижогов являются основными параметрами определяющими качество поверхности после шлифования рельсов. Это обусловлено невозможностью проконтролировать в условиях железнодорожного пути другие параметры качества поверхности (микротвердость, остаточные напряжения и др.) [6].

Несмотря на незначительное количество контролируемых параметров качества поверхности, обеспечение их с достаточной степенью надежности невозможно в связи с отсутствием рекомендаций по назначению режимов резания для различных условий шлифования и нестабильностью самого процесса шлифования. В итоге, несоответствие параметров качества поверхности требуемым значениям приводит к снижению эксплуатационной стойкости рельсов.

На основании вышеизложенного, вопрос обеспечения требуемых параметров качества обработанной поверхности рельсов при шлифовании в условиях железнодорожного пути с учетом основных технологических факторов этого процесса, является первоочередной и актуальной задачей для путевого комплекса отрасли.

На машиностроительных предприятиях, используются шлифовальные станки с геометрическим замыканием кинематической цепи «абразивный круг – обрабатываемая поверхность» (рис. 1, б). В этом случае глубина резания t шлифовальным кругом определяется настроечным размером h между базовой поверхностью станка и абразивным инструментом. Жесткость и виброустойчивость такой схемы позволяет обеспечить высокую геометрическую и размерную точность, а также высокое качество обработанной поверхности. При этом глубина резания t является параметром известным и при формировании технологического процесса учитывается при назначении режимов резания.

При шлифовании рельсов в условиях железнодорожного пути используется силовое замыкание кинематической цепи «абразивный круг – обрабатываемая поверхность» (рис. 1, а). При такой схеме шлифовальный круг 2 прижимается к обрабатываемой поверхности пневмоцилиндром 7 через приводной электродвигатель 1, закреплённый на подмоторной плите 5 параллелограммной подвески 8. Такая конструкция обеспечивает строго вертикальное опускание и поднятие шлифовальной головки. Усилие прижатия шлифовального круга к обрабатываемой поверхности определяется давлением в пневмоцилиндре, которое автоматически регулируется в зависимости от токовой нагрузки на обмотках электродвигателя.

На высокую точность обработки данная схема не претендует, а эффективность её применения определяется, прежде всего, повышенной производительностью. Недостатком силового замыкания является невозможность назначения глубины резания t в качестве исходных данных. Глубина резания самопроизвольно формируется в процессе обработки в зависимости от ряда факторов: усилия прижатия, геометрии и физико-механических свойств обрабатываемой поверхности, режимов обработки и др. Все это приводит к снижению эффективности шлифования с применением данной схемы.

В связи с этим большое значение имеет вопрос установления и анализа параметров технологического процесса абразивной обработки с учетом специфики шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути и их влияния на качество обработанной поверхности и как следствие на эксплуатационные свойства рельсов.

На рис. 2 выделена группа причин, которая потенциально может приводить к формированию дефектов на поверхности катания рельсов и как следствие к возможным возникновениям отказов железнодорожного пути после проведения рельсошлифовальных работ. Эти причины определяются, прежде всего, недостаточной надежностью самого технологического процесса шлифования

рельсов. Технологический рельсошлифовальный комплекс является сложной динамической системой с большим числом взаимосвязей и характеризуется многими выходными параметрами. Чтобы обеспечить требуемое качество и его надежность при шлифовании рельсов, система сама должна обладать высокой надежностью, что связано со степенью совершенства технологического процесса, его стабильностью, методами контроля и другими факторами [7–9].

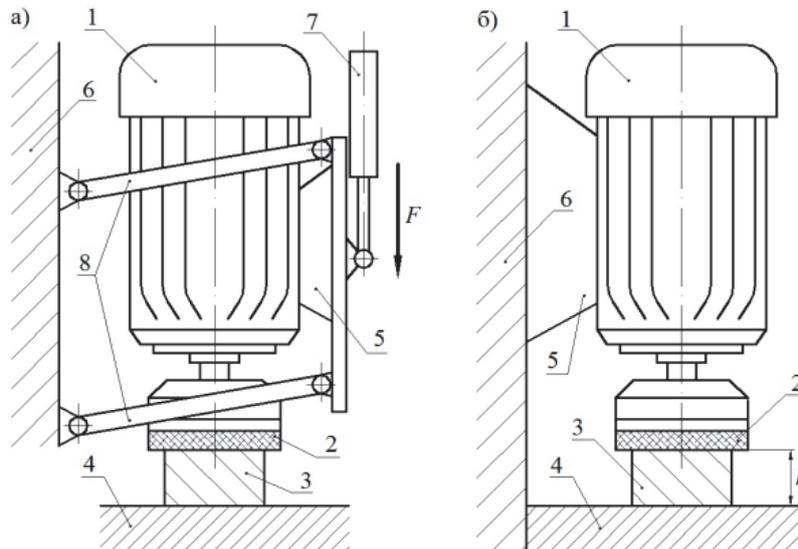


Рис. 1. Принципиальные схемы шлифования торцом круга: 1 – шлифовальный электродвигатель; 2 – шлифовальный круг; 3 – обрабатываемая деталь; 4 – базовая поверхность; 5 – подмоторная плита; 6 – станина; 7 – пневмоцилиндр; 8 – параллелограммный механизм



Рис. 2. Классификация дефектов рельсов, связанных с технологией шлифования

Одной из характерных особенностей любого технологического процесса механической обработки является взаимозависимости его качественных и количественных показателей. Нередко эти две характеристики технологического процесса вступают в противоречие – повышение производительности процесса может привести к снижению качества выполняемых работ и наоборот. Поэтому надежность технологического процесса должна быть обеспечена по обоим показателям [10–12].

Анализ характера взаимосвязи технологически обеспечиваемых и контролируемых параметров обработанной поверхности рельса с условиями обработки показывает, что точностью и макроотклонением профилей рельсов в наилучшей степени можно управлять при помощи настройки конструктивных параметров рабочего оборудования, а так же подбора ремонтных профилей

рельсов в соответствии с их фактическим состоянием. Параметры качества обработанной поверхности и физико-механические свойства поверхностного слоя обеспечиваются оптимальным соотношением режимных параметров (табл. 1). При этом влияние случайных факторов на формирование качества обрабатываемой поверхности приводит к различной надежности при его технологическом обеспечении.

Надежность технологической системы шлифования рельсов зависит от надежности подсистем, осуществляющих технологические операции, структуры системы, определяющей взаимосвязь и последовательность выполнения технологических операций. Выход любого параметра, определяющего показатели качества шлифования рельсов или производительность, за допустимые пределы приводит к параметрическому отказу, несмотря на то, что система может продолжать функционировать. Поэтому поведение технологической системы удобно оценивать параметрической надежностью системы.

Технологическая система, обеспечивающая осуществление технологического процесса шлифования рельсов, представляет собой сложную динамическую систему, в которой объединены рельсошлифовальное оборудование, средства контроля и управления, транспортное устройство, обрабатывающий инструмент, конструкторская и технологическая документации и, наконец, люди, управляющие процессом.

Структуру технологического процесса шлифования рельсов можно условно разделить на технологические подсистемы, обеспечивающие осуществление отдельных операций и характеризующиеся самостоятельными входными и выходными параметрами.

К входным технологическим параметрам относятся режимы резания, конструктивные особенности рельсошлифовального оборудования и погрешность его настройки, фактическое состояние обрабатываемой поверхности рельса, параметры абразивного инструмента и др. К выходным технологическим параметрам относятся показатели качества шлифования рельсов и производительность на данной i -й операции [13, 14].

Таблица 1
Взаимосвязь параметров качества шлифования рельсов с условиями их обработки

Параметр		Параметры качества шлифования рельсов					
		Точность поперечного профиля рельса	Средняя высота волн продольного профиля рельса, W_z , мм	Шероховатость поверхности, R_z , мкм	Глубина наклепанного слоя, h , мм	Остаточные напряжения в поверхностном слое, $\pm\sigma_{ост}$, МПа	Наличие прижогов
Параметры шлифования рельсов	Скорость рельсошлифовального поезда v_n , км/ч	0	0	+	+	+	-
	Скорость резания v_p , м/с	0	0	-	-	+	+
	Усилия прижатия шлифовального круга к рельсу F_z , Н	0	-	+	+	+	+
	Угол наклона шлифовальной головки φ	\pm	0	\pm	\pm	\pm	\pm
	Твердость участка обрабатываемой поверхности рельса НВ	0	0	-	-	-	\pm
	Жесткость технологической системы	-	-	+	0	0	0
	Исходные геометрические параметры головки рельса	+	+	0	0	0	0

Примечание. Знак «+» означает прямую зависимость между параметрами обработки и параметрами качества обработанного рельса, знак «-» означает обратную зависимость.

В качестве показателя выбора тех или иных технологических параметров обработки рельсов по критерию параметрической надежности предлагается максимум вероятности P выполнения задания по одному из параметров качества обработанной поверхности рельса Y в заданном интервале:

$$P\{Y \in (\bar{Y} + \delta\bar{Y}; \bar{Y} - \delta\bar{Y})\} = \max, \quad (1)$$

где \bar{Y} – средняя величина регламентированного параметра качества обработанной поверхности рельса (например, шероховатость R_z); $\delta\bar{Y}$ – допустимая величина изменения регламентированного параметра.

Для различных технологических операций при различных Y и $\delta\bar{Y}$ величина P определяется путем имитационного моделирования которое осуществляется в виде аддитивных или степенных моделей:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_i X_i + \dots + \beta_k X_k; Y = \beta_0 X_1^{\beta_1} X_2^{\beta_2} \dots X_i^{\beta_i} \dots X_k^{\beta_k}. \quad (2)$$

Здесь X_i – i -й фактор технологической операции; $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ – истинные значения коэффициентов, которые являются случайными нормальнораспределенными величинами.

В основу построения имитационных моделей положен физико-статистический подход, концепция которого заключается в том, что структура модели технологической операции формируется на основе анализа причинно-следственных связей факторов механической обработки и внешней среды, а выходные параметры определяются статистическими методами. В качестве таких моделей могут служить зависимости, представленные в исследованиях [15–20]:

$$R_z = 840,95 \frac{S^{0,888} t^{0,402}}{n^{0,433}} k,$$

$$R_z = 193 \cdot t + 34 \cdot d_3 + 0,15 \cdot S - 0,44 \cdot v - 16,$$

$$R_z = 14\varphi + 811Z + 220I - 0,0008\varphi^3 - 1444Z^3 - 0,04I^3 - 0,06\varphi^2 Z - 11\varphi Z^2 + 0,003\varphi^2 I - 0,04\varphi I^2 + 161Z^2 I - 7ZI^2 + 0,9\varphi ZI - 3863,$$

где t – глубина резания шлифовальным кругом, мм; d_3 – диаметр абразивного зерна шлифовального круга, мм; S – рабочая скорость рельсошлифовального поезда (продольная минутная подача), м/мин; v – средняя скорость резания, м/с; n – частота вращения шлифовального круга, об/мин; k – коэффициент, учитывающий зернистость инструмента и ширину дорожки контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью; φ – угол наклона шлифовальной головки, град; I – токовая нагрузка на шлифовальных электродвигателях, А; Z – диаметр зерна шлифовального круга, мм.

Если в моделях (2) величины X_i являются случайными, то для математического ожидания и дисперсии параметра качества обработанной поверхности рельса получим:

$$M\{Y\} = \exp\left(\ln M\{\beta_0\} + \sum_{i=1}^k \ln X_i M\{\beta_i\}\right); \quad (3)$$

$$S^2\{Y_i\} = \exp\left(\ln S^2\{\beta_0\} + \sum_{i=1}^k (\ln X_i)^2 S^2\{\beta_i\}\right). \quad (4)$$

Если в моделях (2) случаен один или несколько факторов X_i , то $M\{Y_i\}$ и $S^2\{Y_i\}$ определяются путем обработки результатов машинного эксперимента над имитационными моделями по схеме, которая представлена на рис. 3.

В качестве исходных данных используются результаты построения имитационных моделей, конструкторские и технологические ограничения:

1. Имитационная модель для параметра Y : $Y = f(\beta_0, \beta_i, X_i)$.
2. Имитационная модель скорости изменения параметра Y в процессе функционирования технологической системы: $Y = f(\xi_0, \xi_i, X_i)$.
3. Математические ожидания и среднеквадратические отклонения коэффициентов и случайных факторов: $M\{\beta_i\}, S\{\beta_i\}, M\{\xi_i\}, S\{\xi_i\}, M\{X_i\}, S\{X_i\}$.
4. Допустимые пределы изменения параметров качества обработанной поверхности рельса Y_{\max} и Y_{\min} и время безотказного их обеспечения T .
5. Допустимые пределы варьирования технологических режимов обработки $X_{i\max}$ и $X_{i\min}$.
6. Доверительная вероятность и допустимые абсолютные ошибки определения оценки $M\{Y_i\}$ и $S^2\{Y_i\}$ (величины a и d).

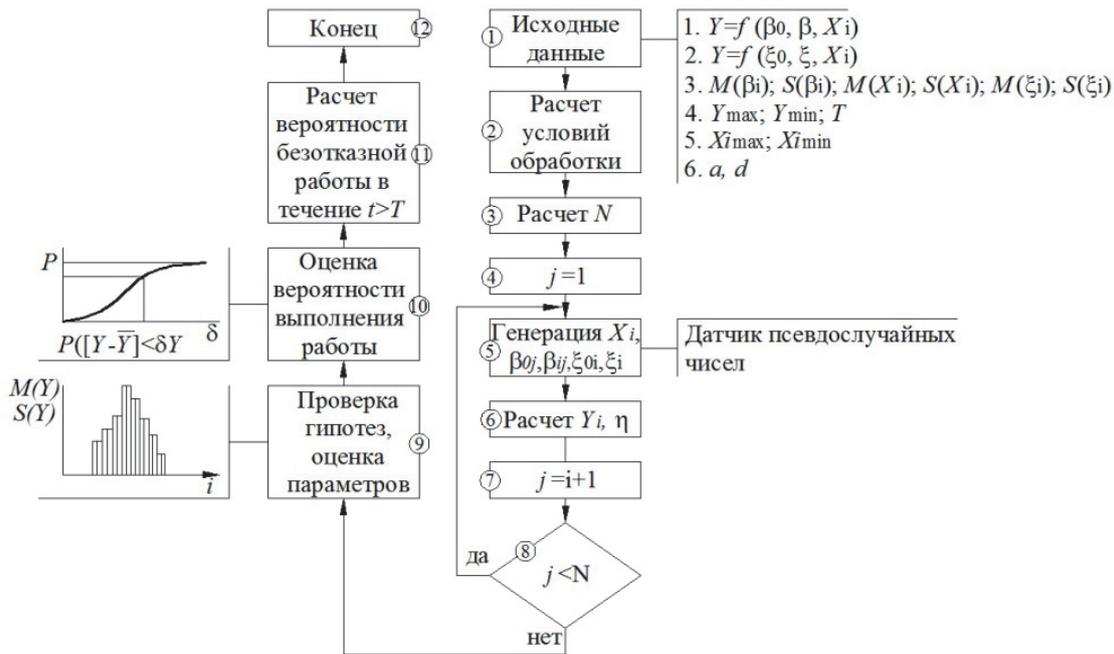


Рис. 3. Блок-схема расчёта надёжности технологической системы рельсошлифования

Далее определяются номинальные значения технологических факторов X_i обеспечивающих получение оптимального значения требуемого параметра качества обработанной поверхности рельса Y_{opt} и максимальную величину запаса технологической операции η по этому параметру. При этом в соответствующих имитационных моделях используются коэффициенты $b_i = M\{\beta_i\}$.

Представленная модель позволяет решить задачу проектирования оптимальных технологических процессов шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути и является основой для создания автоматизированной системы технологической подготовки производства работ по шлифованию рельсов. При этом следует отметить, что реализация разработанной методики сдерживается отсутствием ряда исходных параметров.

Если пределы варьирования технологических режимов обработки X_{imax} и X_{imin} определяются конструкцией и характеристикой рабочего оборудования рельсошлифовального поезда, то пределы изменения параметров качества обработанной поверхности рельса Y_{max} и Y_{min} в настоящее время не установлены и не отражены в нормативно-технической документации. Диапазон изменения этих параметров будет определяться формируемой эксплуатационной стойкостью рельса, выявление которой является следующей исследовательской задачей.

Рассмотрены причины и механизм образования дефектов в головке рельсов, а также влияние различных факторов на параметры усталостной прочности и износостойкости. Установлено, что первостепенную роль в зарождении и дальнейшем развитии усталостных трещин в головке рельсов играют параметры качества поверхности. При обработке шлифованием формируется качественно новый уровень физико-механических свойств поверхности, который в значительной степени влияет на усталостную прочность, износостойкость и общую долговечность рельсов. Основными параметрами качества поверхности являются шероховатость и наличие прижогов на обработанной поверхности. В совокупности эти параметры определяют физическое состояние поверхности рельса после механической обработки и по значениям шероховатости можно количественно оценить наличие остаточных напряжений и степени наклепа.

Определение эксплуатационных свойств поверхности катания рельсов после шлифования осуществлялось по критерию трещиностойкости, усталостной прочности и износостойкости. Результаты испытаний на циклическую трещиностойкость (рис. 4) показали, что повышение шероховатости после шлифования приводит к снижению циклической трещиностойкости рельсов. Так грубое шлифование ($R_z = 80$ мкм) может снизить трещиностойкость рельсов на 70–80 %, что можно считать результатом влияния остаточных растягивающих напряжений, наведенных в поверхности сильным местным нагревом и повышенной шероховатостью.



Рис. 4. Влияние шероховатости обработанной поверхности головки рельса на кинетические диаграммы усталостного разрушения

Отмечено, что при определенных режимах шлифования наклеп, формирующийся в процессе механической обработки, в определенной степени нейтрализует действие концентраторов напряжений от полученных микронеровностей, тем самым увеличивая параметры трещиностойкости. Так, ΔK , соответствующее скорости роста усталостной трещины, 10^{-7} м/цикл для шероховатости $R_z = 40$ мкм, на 10 % выше значения, соответствующего шероховатости $R_z = 20$ мкм.

Сделанные выводы также подтверждаются результатами испытаний на контактно-усталостную прочность (рис. 5), которые показали, что большое влияние на стойкость к разрушению оказывает поверхностная твердость обрабатываемой поверхности. На графике можно отметить две области. Значения шероховатости, находящиеся в данных областях, обеспечивают повышенную усталостную прочность обработанной поверхности рельсов.

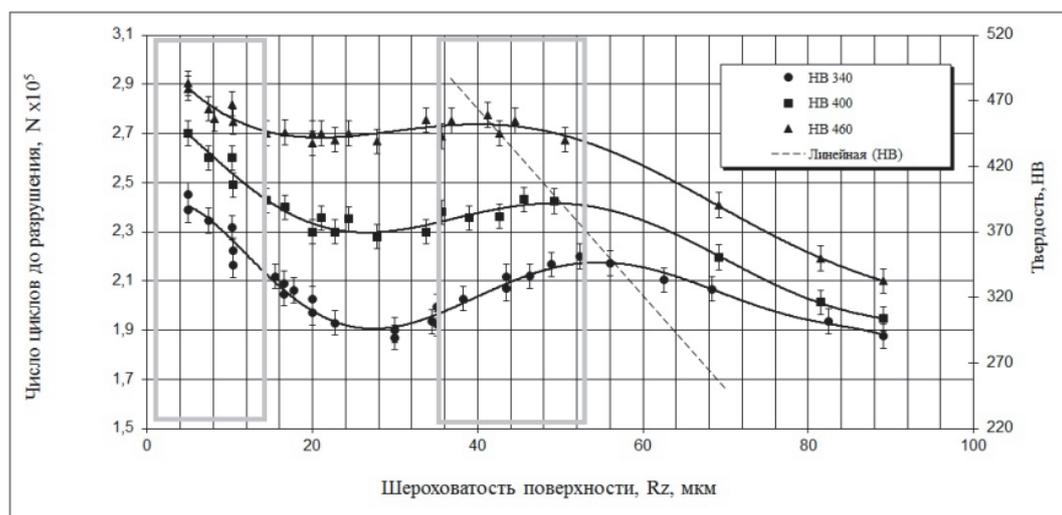


Рис. 5. Влияние шероховатости на усталостную прочность рельсов

Весовая оценка испытаний на износостойкость (рис. 6) показала, что снижение шероховатости на 20 мкм позволяет увеличить износостойкость на 20–25 % за счет повышения сжимающих остаточных напряжений и увеличения микротвердости поверхностного слоя.

Проведенные исследования по оценке эксплуатационных свойств отшлифованной поверхности рельсов показали, что для обеспечения повышенной эксплуатационной стойкости рельсов необходимо формировать шероховатость поверхности при шлифовании с учетом их исходной твердости и условий эксплуатации.

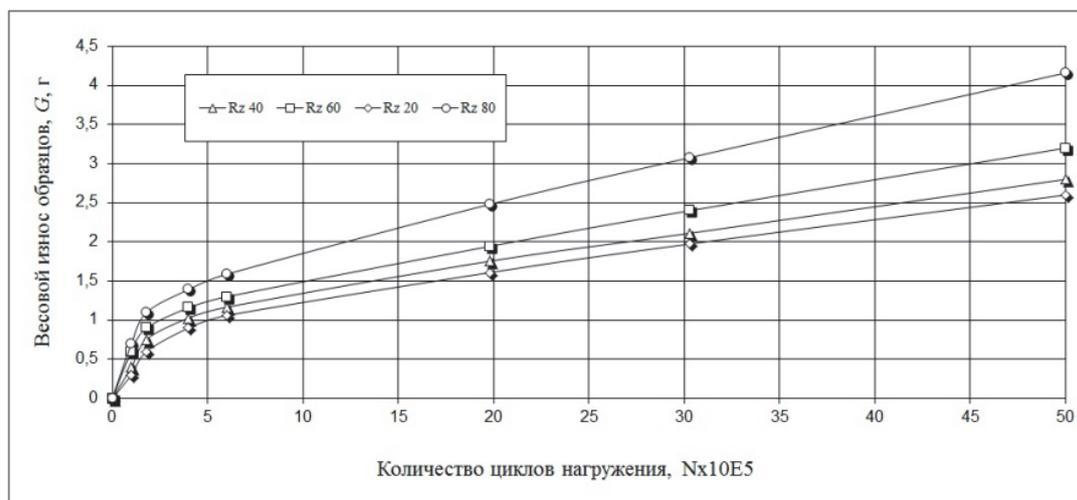


Рис. 6. Влияние шероховатости на износостойкость поверхности рельсов

Установленные закономерности изменения эксплуатационных свойств отшлифованных участков головки рельса по критериям циклической трещиностойкости, контактно-усталостной прочности и износостойкости позволили определить диапазон изменения параметров качества обработанной поверхности рельса Y_{\max} и Y_{\min} для обеспечения повышенной стойкости рельсов в различных условиях эксплуатации.

Так, для рельсов, уложенных в кривых участках пути оптимальная шероховатость должна быть в пределах $R_z = 5 \dots 10$ мкм для обеспечения повышенной износостойкости. Для рельсов на прямых участках пути шероховатость, обеспечивающая повышенную усталостную прочность рельсов должна находиться в пределах $R_z = 35 \dots 50$ мкм.

При реализации существующих технологических процессов шлифования рельсов используются штатные программы обработки, заложенные в системе управления рабочим оборудованием рельсошлифовального поезда, которые не предполагают изменения режимов шлифования. В соответствии с разработанной моделью были произведены расчеты надежности технологического обеспечения шероховатости обработанной поверхности рельсов в установленных диапазонах. В качестве примера в табл. 2 представлены результаты расчетов для трех штатных программ.

Анализ результатов расчета показал, что надежность обеспечения шероховатости поверхности в требуемых диапазонах для всех штатных программ шлифования не превышает 0,6, что является недостаточным.

Таблица 2

Анализ надежности технологического обеспечения шероховатости обработанной поверхности рельсов для управляющих программ рельсошлифовального поезда

Характеристика управляющей программы	R_z 5...10 мкм	R_z 35...50 мкм
Программа 22 Скорость рельсошлифовального поезда v_n : 6 км/ч. Скорость резания v_p : 50 м/с. Токовая нагрузка на обмотках электродвигателя I : 7 А	0,15	0,40
Программа 28 Скорость рельсошлифовального поезда v_n : 8 км/ч. Скорость резания v_p : 50 м/с. Токовая нагрузка на обмотках электродвигателя I : 25 А	0,35	0,6
Программа 31 Скорость рельсошлифовального поезда v_n : 8 км/ч. Скорость резания v_p : 50 м/с. Токовая нагрузка на обмотках электродвигателя I : 23 А	0,55	0,25

Технология

Для определения причин низкой надежности применяемых технологических процессов разработана методика оценки видов, причин и последствий потенциальных дефектов при реализации технологии шлифования рельсов основанной на FMEA-анализе [21].

Анализ по предлагаемой методике заключается в определении приоритетного числа риска (ПЧР), которое определяется по формуле:

$$ПЧР = S \times O \times D, \quad (5)$$

где S – балл значимости последствия дефекта (от 1 до 10); O – балл возникновения причины дефекта (от 1 до 10); D – балл предотвращения появления причин дефекта (от 1 до 10).

Баллы S и D определялись на основе экспертного анализа технологических процессов, а балл O на основе статистического индекса C_{pk} :

$$C_{pk} = \frac{\min\{(U - \bar{Y}); (\bar{Y} - L)\}}{3\sigma}, \quad (5)$$

где U, L – верхнее и нижнее предельные значения поля допуска показателя качества Y ; σ – оценка стандартного отклонения технологического процесса.

Результаты анализа существующих технологий шлифования рельсов по предложенной методике представлены в табл. 3.

Таблица 3

Протокол анализа видов, причин и последствий потенциальных дефектов при реализации существующих технологий шлифования рельсов

Вид потенциального дефекта	Последствие потенциального дефекта	Балл S	Потенциальная причина дефекта	Балл O	Первоначальные меры по предотвращению появления причин дефекта	Балл D	ПЧР
Шероховатость поверхности не соответствует требуемой. Появление на обработанной поверхности цветов побежалости (прижогов)	Появление и прогрессивный рост дефектов контактно-усталостной группы. Повышенный износ обработанной поверхности. Вскрытие и неконтролируемый рост микротрещин находящихся в подповерхностном слое	7	Скорость релъсошлифовального поезда не соответствует установленным значениям	3	Контроль штатной системой управления движением поезда	2	42
			Усилие прижатия шлифовального круга не соответствует установленным значениям	7	Контроль штатной системой по значению силы тока в обмотках электродвигателя	3	147
			Частота вращения шлифовального круга не соответствует установленным значениям	4	Не контролируется	8	224
			Угол наклона шлифовальной головки не соответствует принятому в расчетах	6	Контроль с помощью датчиков угловых перемещений	6	252
			Фактическая твердость обрабатываемой поверхности рельса не соответствует принятой в расчетах	8	Принимается среднее значение твердости по величине пропущенного тоннажа (млн т брутто)	7	392
			Режимы и условия шлифования не соответствуют требуемым	9	Назначение режимов из штатного набора программ релъсошлифовального поезда одинаковых для всех шлифовальных головок	10	630

В результате рассмотрения альтернативных технологических решений было предложено осуществлять контроль частоты вращения шлифовального круга с помощью бесконтактного тахометра перед шлифованием и в режиме обработки, определять фактические углы наклона шлифовальных головок с помощью маятникового угломера и корректировать показания датчиков, производить измерения твердости рельса перед началом работ с помощью портативного твердомера, осуществлять индивидуальный расчет режимов шлифования для каждой отдельной шлифовальной головки. Новые значения баллов приведены в табл. 4.

После проведения повторного анализа технологического процесса с учетом предложенных изменений можно сделать вывод, что предложенные изменения в технологическом процессе

позволили снизить значение ПЧР с 1687 до 791, что свидетельствует об увеличении надежности более чем в 2 раза технологического обеспечения шероховатости обработанной поверхности рельса в установленных диапазонах.

Таблица 4

Протокол анализа видов, причин и последствий потенциальных дефектов при реализации предлагаемых технологий шлифования рельсов

Вид потенциального дефекта	Последствие потенциального дефекта	Балл S	Потенциальная причина дефекта	Балл O	Предлагаемые меры по предотвращению появления причин дефекта	Балл D	ПЧР
Шероховатость поверхности не соответствует требуемой. Появление на обработанной поверхности цветков побегалости (прижогов)	Появление и прогрессирующий рост дефектов контактно-усталостной группы. Повышенный износ обработанной поверхности. Вскрытие и неконтролируемый рост микротрещин находящихся в подповерхностном слое	7	Скорость рельсошлифовального поезда не соответствует установленным значениям	3	Контроль штатной системой управления движением поезда	2	42
			Усилие прижатия шлифовального круга не соответствует установленным значениям	7	Контроль штатной системой по значению силы тока в обмотках электродвигателя	3	147
			Частота вращения шлифовального круга не соответствует установленным значениям	4	Контроль с помощью бесконтактного тахометра перед шлифованием и в режиме обработки	6	168
			Угол наклона шлифовальной головки не соответствует принятому в расчетах	6	Фактический контроль углов наклона шлифовальных головок с помощью маятникового угломера и корректировка показаний датчиков	2	84
			Фактическая твердость обрабатываемой поверхности рельса не соответствует принятой в расчетах	8	Измерение твердости рельса перед началом работ с помощью портативного твердомера	4	224
			Режимы и условия шлифования не соответствуют требуемым	9	Индивидуальный расчет режимов шлифования для каждой отдельной шлифовальной головки	2	126

Результаты предложенных изменений апробированы на рельсошлифовальном поезде РШП-48 № 001 на полигоне Западно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД». Результаты промышленных испытаний показали, что предложенные решения позволили повысить надежность технологического обеспечения качества поверхности рельса при шлифовании в условиях железнодорожного пути до 0,85 при 10%-ном увеличении времени планово-подготовительных работ.

Литература

1. *The most comprehensive range of quality equipment for track and OHL laying, maintenance and control.* – <http://www.geismar.com/en/14-grinding> (дата обращения: 12.01.2015).
2. *Rail grinding.* – http://www.leonhard-weiss.de/bau/eng/html_docs/expertise/track/ref-rail-grinding.html (дата обращения: 12.01.2015).
3. *Zarembski, A. Rail problems, rail maintenance and rail grinding / A. Zarembski.* – <http://www.engr.udel.edu/outreach/short-courses/Rail%20Engineering/RailProblemsMaintenanceGrinding/index.html>. (дата обращения: 12.01.2015).
4. *Tuzik, B. The what, where, why and how of rail grinding / B. Tuzik.* – <http://interfacejournal.com/archives/568> (дата обращения: 12.01.2015).
5. *Zarembski, A. The art and science of rail grinding / A. Zarembski // Simmons Boardman Pub Co, 2003. – 420 с.*
6. *Нормативно-техническая документация. Технические указания по шлифованию рельсов.* – М.: ОАО «РЖД», 2004. – 39 с.

7. Nath, L. Rail grinding necessity on Indian railway / L. Nath, A. Kumar. – Course no: 625. – http://wiki.ircen.gov.in/doku/lib/exe/fetch.php?media=625:3rail_grinding.pdf (дата обращения: 12.01.2015).
8. Kalker, J.J. Rail quality and maintenance for modern railway operation / J.J. Kalker, D.F. Cannon, O. Orringer. – Netherlands: Kluwer academic publishers, 1993. – 459 с.
9. Rail and wheel roughness – implications for noise mapping based on the Calculation of Railway Noise. – http://www.laermorama.ch/m5_krachmacher/pdf/railway-noise.pdf (дата обращения: 12.01.2015).
10. Practical rail grinding. – <http://interfacejournal.com/archives/624> (дата обращения: 12.01.2015).
11. Schoech, W. Grinding specific profiles helps solving rail problems / W. Schoech. – Switzerland: Speno international SA, 2007. – 7 с.
12. Zarembski, A.M. The Art and Science of Rail Grinding / A.M. Zarembski. – Omaha: Simmons-Boardman Books, 2005. – 420 с.
13. Lichterberger, B. Track Compendium – Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics / B. Lichterberger. – Hamburg: Eurailpress in DVV Media Group, 2005. – 145 с.
14. Taubert, M. High Speed Grinding passes the test in Germany / M. Taubert, A. Püschel // International Railway Journal. – 2009. – № 7. – С. 31–33.
15. Ильиных, А.С. Научно-методические основы высокопроизводительной технологии шлифования рельсов в условиях железнодорожного пути / А.С. Ильиных // Вестник СГТУ. – 2013. – № 1. – С. 82–88.
16. Аксенов, В.А. Оценка эффективности технологического процесса шлифования рельсов в пути / В.А. Аксенов, В.Н. Фелелов // Научное обозрение. – 2006. – № 3. – С. 28–30.
17. Аксенов, В.А. Передовые технологии восстановления рельсов в пути и управление качеством обработанных поверхностей при использовании рельсошлифовальных поездов / В.А. Аксенов, В.А. Шаламов, А.А. Кузьменя // Вестник Сибир. гос. ун-та путей сообщения. – 1999. – Вып. 2. – С. 129–135.
18. Тихомирова, Л.Б. Формирование остаточных напряжений за счет регулирования режимов шлифования рельсов / Л.Б. Тихомирова, О.В. Дмитриева // Материалы науч.-практ. конф. «Современные технологии железнодорожному транспорту». – Хабаровск, 2003. – С. 120–122.
19. Ильиных, А.С. Формирование качества поверхности при плоском шлифовании торцом круга / А.С. Ильиных // Технология машиностроения. – 2011. – № 4. – С. 19–22.
20. Аксенов, В.А. Теплофизический анализ процесса плоского шлифования рельсов торцом круга / В.А. Аксенов, А.С. Ильиных // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Машиностроение». – 2012. – № 33. – С. 96–100.
21. ГОСТ Р 51814.2-2001. Системы качества в автомобилестроении. Метод анализа видов и последствий потенциальных дефектов. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 18 с.

Матафонов Алексей Валерьевич. Начальник отдела центральной дирекции по ремонту пути, филиал ОАО «РЖД» (Москва), cdpr@yandex.ru.

Пыко Артем Николаевич. Аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин», Сибирский государственный университет путей сообщения (Новосибирск), asi@stu.ru.

Ильиных Андрей Степанович. Доктор технических наук, заведующий кафедрой «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин», Сибирский государственный университет путей сообщения (Новосибирск), asi@stu.ru.

Поступила в редакцию 14 января 2015 г.

THE TECHNOLOGY OF THE QUALITY POLISHING OF THE RAILS SURFACE ON THE RAILWAY

A. Matafonov, branch of JSC «Russian Railways», Moscow, cdrp@yandex.ru,

A. Pyko, Siberian State Transport University, Novosibirsk, asi@stu.ru,

A. Ilinykh, Siberian State Transport University, Novosibirsk, asi@stu.ru

The paper is dedicated by the results of the experimental-theoretic research the purpose of which is to provide the required quality of the treated surface during polishing on the railway. A main parameter of the reliability for choice those or other regimes of treatment is obtainment of the needed roughness with the maximum probability. For different technology it is determined by the simulation modelling which is represented as the additive or exponential models. The mathematic model of the polishing reliability which represents very important technological parameters of the functioning system and allows to create optimal technology is represented. Before the model was applied the research was implemented how the surface roughness influences on the cyclic crack resistance, on the contact fatigue strength and the wear resistance of rails. The results allow to predict the operational characteristics of the rail on the base of the obtained values of the surface roughness. Reduction of the rails roughness about 20% changes the wear resistance about 20–25 %, crack resistance and fatigue strength about 15–20 %. For providing the high resistance of rails in various conditions of the exploitation the range of the roughness reduction is chosen before. So for rails in the curve track sections the optimal roughness must be $R_z = 5 \dots 10$ mcm for providing high wear resistance. For rails in the straight sections it is about $R_z = 30 \dots 35$ mcm for providing the high fatigue strength. Analysis of calculation results of the reliability technology shoes that the reliability of providing needed roughness in the required ranges for all full-time programs doesn't exceed 0,6. It's not enough because the polishing technology on the railway in this case is ineffective for preventing causes of the defects appearance. Then types, causes and implications of the potential defects of the rails polishing were taken into account. After that it allowed to offer the alternative technology and increase the polishing reliability more than 2 times. Using the obtained results it becomes possible to increase the quality level of the treatment technology on the railway accounting the actual condition of rails and functional abilities of the machinery.

Keywords: abrasive treatment, rails polishing, surface quality, roughness, technology.

Reference

1. The Most Comprehensive Range of Quality Equipment for Track and OHL Laying, Maintenance and Control. Available at: <http://www.geismar.com/en/14-grinding> (accessed 12.01.2015).
2. Rail Grinding. Available at: http://www.leonhard-weiss.de/bau/eng/html_docs/expertise/track/ref-rail-grinding.html (accessed 12.01.2015).
3. Zarembski A. Rail Problems, Rail Maintenance and Rail Grinding. Available at: [http://www.engr.udel.edu/outreach/short-courses/Rail%20Engineering/RailProblemsMaintenance Grinding/index.html](http://www.engr.udel.edu/outreach/short-courses/Rail%20Engineering/RailProblemsMaintenance%20Grinding/index.html) (accessed 12.01.2015).
4. Tuzik B. The What, Where, Why and How of Rail Grinding. Available at: <http://interfacejournal.com/archives/568> (accessed 12.01.2015).
5. Zarembski A. The Art and Science of Rail Grinding. *Simmons Boardman Pub Co*, 2003. 420 p.
6. *Normativno-tehnicheskaya dokumentatsiya. Tekhnicheskkiye ukazaniya po shlifovaniyu relsov.* [Normative-Technical Documentation. Technical Instructions for the Rails Grinding]. Moscow, *Russian railways Publ.*, 2004. p. 39.
7. Nath L., Kumar A. Rail Grinding Necessity on Indian Railway. Course no: 625. Available at: http://wiki.ircen.gov.in/doku/lib/exe/fetch.php?media=625:3rail_grinding.pdf (accessed 12.01.2015).

8. Kalker J.J., Cannon D.F., Orringer O. Rail Quality and Maintenance for Modern Railway Operation. Netherlands, Kluwer academic publishers, 1993. 459 p.
9. Rail and Wheel Roughness - Implications for Noise Mapping Based on the Calculation of Railway Noise Procedure. Available at: http://www.laermorama.ch/m5_krachmacher/pdf/railway-noise.pdf (accessed 12.01.2015).
10. Practical Rail Grinding. Available at: <http://interfacejournal.com/archives/624> (accessed 12.01.2015).
11. Schoech W. Grinding Specific Profiles Helps Solving Rail Problems. Switzerland, Speno international SA, 2007. 7 p.
12. Zaremski A.M. The Art and Science of Rail Grinding. Omaha, Simmons-Boardman Books, 2005. 400 p.
13. Lichterberger B. Track Compendium – Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics. Hamburg, Eurailpress in DVV Media Group, 2005. p. 145.
14. Taubert M., Püschel A. High Speed Grinding Passes the Test in Germany. *International Railway Journal*, July 2009, no. 7, pp. 31–33.
15. Ilinykh A.S. [Scientific and Methodological Basis for High-Performance Technology Rail Grinding in the Railway]. *Vestnik SGTU*, 2013, no.1, pp. 82–88. (in Russ.)
16. Aksenov V.A., Fefelov V.N. [Efficiency Evaluation of the Rail Grinding Technology]. *Scientific Review*, 2006, № 3, pp. 28–30. (in Russ.)
17. Aksenov V.A., Shalamov V.A., Kuzmenya A.A. [Modern Technology of Rail Reestablishment and Quality Control of the Treated Surface Using Rail-Grinding Trains]. *Bulletin of the Siberian Transport University*, 1999, iss. 2, pp. 129–135. (in Russ.)
18. Tikhomirova L.B., Dmitriyeva O.V. [Formation of the Residual Voltage by Regulation of the Rails Grinding Regimes]. Khabarovsk, Materials of the science-practical conference called “Modern technology to transport”, 2003, pp. 120–122. (in Russ.)
19. Ilinykh A.S. [Formation of Surface Quality with the Flat Polishing by the Edge of Circle]. *Engineering technology*, 2011, № 4, pp. 19–22. (in Russ.)
20. Aksenov V.A., Ilinykh A.S. [The Thermophysical Analysis of the Flat Grinding of Rails by the Edge of Circle]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2012, no. 33, pp. 96–100. (in Russ.)
21. GOST R 51814.2-2005. *Sistemy kachestva v avtomobilestroenii. Metod analiza vidov i posledstviy potentsialnykh defektov* [Standard RF 51814.2 – 2005. Systems of Quality in the Automotive Industry. The Method of Analysis of Types and Implications of Potential Defects]. Moscow, Standartinform Publ., 2001. p. 18.

Received 14 January 2015