

Пленарные доклады Международных научных конференций и семинаров

В этом номере журнала публикуются пленарные доклады

*XI МНТК «Инновационные технологии машиностроения в транспортном комплексе
(ТМ-2019)», г. Калининград (10-13 сентября 2019 г.)*

УДК 621.8

DOI: 10.30987/article_5cf7bd2f83f6b5.55900953

**А.Г. Суслов, д.т.н.,
О.Н. Федонин, д.т.н.,
А.О. Горленко, д.т.н.,
М.Г. Шалыгин, д.т.н.,
Л.А. Захаров, к.т.н.**

*(ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7)
E-mail: mootechmash@yandex.ru*

Инновационные технологии машиностроения, обеспечивающие повышение долговечности железнодорожных колес и рельсов

В статье показано, что долговечность железнодорожных колес и рельсов в значительной мере зависит от износостойкости их рабочих поверхностей катания. Приведена инновационная технология электромеханической обработки рабочей поверхности катания железнодорожного колеса, позволяющая повысить его долговечность. Дана инновационная технология обработки рабочей поверхности катания железнодорожного рельса, позволяющая повысить его долговечность.

Ключевые слова: инновационная технология; поверхность катания; железнодорожное колесо; железнодорожный рельс; электромеханическая обработка; иглофрезерование; шлифование брусками; лепестковое шлифование.

**A.G. Suslov, Dr. Sc. Tech.,
O.N. Fedonin, Dr. Sc. Tech.,
A.O. Gorlenko, Dr. Sc. Tech.,
M.G. Shalygin, Dr. Sc. Tech.,
L.A. Zakharov, Can. Sc. Tech.**

(FSBEI HE "Bryansk State Technical University", 7, 50 Years of October Boulevard, Bryansk, 241035)

Innovation technologies in mechanical engineering ensuring life increase of railway wheels and rails

In the paper it is shown that railway wheels and rails life depends considerably upon wear-resistance of their tread working surfaces. There is presented an innovation technology of a railway wheel tread electromechanical processing allowing the increase of its life. The innovation technology of railway wheel working tread electromechanical processing allowing its life increase is shown. The innovation technology for rail working tread allowing its life increase is given.

Keywords: innovation technology; tread; railway wheel; railroad rail; electromechanical processing; needle milling; grinding with whetstones; leaf grinding.

Долговечность железнодорожных колес и рельсов в значительной мере определяется износом их рабочих поверхностей катания.

Износостойкость поверхностей с криволинейным профилем, к которым в частности относятся железнодорожные колёса и рельсы, в значительной мере определяется оптимальностью профиля их рабочих поверхностей. Исходный профиль поверхности катания колес и рельсов определен, исходя из необходимости обеспечения их контактной прочности. В процессе эксплуатации и износа поперечный профиль железнодорожного колеса в результате неравномерности скорости качения и распределения давления отдельных его участков изменяется.

При прохождении определенного пути трения это изменение профиля достигает определенной критической величины и колёса направляются на переточку. При переточке для возвращения к исходному профилю, в результате неравномерности припуска из-за изменившегося профиля, приходится вначале производить черновую обточку, а затем – чистовую. Инновационная технология обработки рабочей поверхности железнодорожного колеса заключается в технологическом обеспечении равномерности изнашивания по всему профилю при неравномерной скорости и давлении на его участках при одновременном повышении износостойкости всего поверхностного слоя [1, 2].

В наибольшей мере этим условиям соответствует технология электрохимической обработки (ЭМО).

Технология ЭМО основана на сочетании термического и силового воздействий, что приводит к изменению физико-механических и микрогеометрических показателей поверхностного слоя (повышению твердости и прочности, снижению высотных параметров шероховатости и т.д.), позволяет повысить (в 1,5 – 3 раза) эксплуатационные показатели обрабатываемых деталей (износостойкость, контактную жесткость и прочность, предел выносливости, теплостойкость, фреттингостойкость).

Установка с управляемым источником питания на переменном токе промышленной частоты предназначенная для реализации процесса ЭМО рабочих поверхностей деталей машин с целью обеспечения и повышения их эксплуатационных показателей приведена на рис. 1.

С помощью управляемого источника питания (рис. 2) можно осуществлять поверхностное упрочнение и отделочную обработку ци-

линдрических поверхностей деталей машин, изготовленных из средне- и высокоуглеродистых, легированных сталей и высокопрочного чугуна, а также восстанавливать изношенные поверхности.



Рис. 1. Установка для электрохимической обработки (ЭМО)



Рис. 2. Источник питания ЭМО

Применение переменного тока промышленной частоты (от управляемого источника питания) обеспечивает большую глубину упрочнения (до 2 мм), высокую микротвердость упрочненного слоя (до 1000 HV), шероховатость поверхности (без отделочной обработки) в пределах $Ra\ 0,8...3,2$. Отделочная обработка цилиндрических поверхностей проводится, когда не требуется большой глубины упрочнения (до 0,3 мм), а необходимо значительное уменьшение значений высотных параметров исходной шероховатости (в 4 – 10 раз).

Как видно из описания данного технологического метода обработки, ЭМО за счет изменения скорости обработки, подачи, рабочего

давления и, в особенности, силы тока позволяет в более широких пределах управлять изменением качества поверхностного слоя.

Для обеспечения равномерного износа по профилю поверхности катания железнодорожного колеса (рис. 3):

а) рассчитана математическая модель профиля железнодорожного колеса;

б) установлен закон изменения качества поверхности катания и гребня железнодорожного колеса, обеспечивающий одинаковую скорость изнашивания различных участков профиля в соответствии с упомянутой математической моделью;

в) так как названный закон справедлив для постоянно трущихся поверхностей, была принята зависимость контактирования участков профиля колеса во времени;

г) пересчитан коэффициент упрочнения (в соответствии с пунктом (в)), и в целях избежания резких перепадов применена сплайн-интерполяция;

д) рассчитана требуемая поверхностная микротвердость профиля колеса;

е) получена зависимость плотности тока при ЭМО для технологии изготовления и ремонта железнодорожных колес.

Для технологического обеспечения требуемого качества поверхностного слоя на промышленных предприятиях целесообразно использовать одну из разработанных в Брянском государственном техническом университете автоматизированных установок ЭМО (см. рис. 1).

Использование данной установки позволяет обеспечить равномерный и минимальный износ профиля колеса путем электрохимического упрочнения с изменяющейся силой тока в процессе обработки, от которой, в свою очередь, зависят степень и глубина упрочнения. Это позволяет дольше сохранять профиль колеса в процессе эксплуатации, что ведет к увеличению срока службы в 1,3 – 1,5 раза.

Такую технологию применения ЭМО можно использовать как при изготовлении новых железнодорожных колес, так и при их ремонте.

Проблема износа рельсов в настоящее время – одна из основных на железнодорожном транспорте. Она решается, в частности, методом ремонта изношенных рельсов в пути – для восстановления рабочих поверхностей катания рельсов применяют рельсошлифовальные комплексы

Разработкой рельсошлифовальных комплексов занимались ОАО «Брянский машино-

строительный завод», Калужский завод «Ремпутьмаш», SPENO (Испания) и др. Существующие поезда перешлифовывают сформировавшийся (приработанный) профиль рельса до первоначального (не приработанного) и не обеспечивают сохранения оптимального профиля, сформировавшегося в процессе приработки. Это приводит к повторным приработкам и повышенному износу.

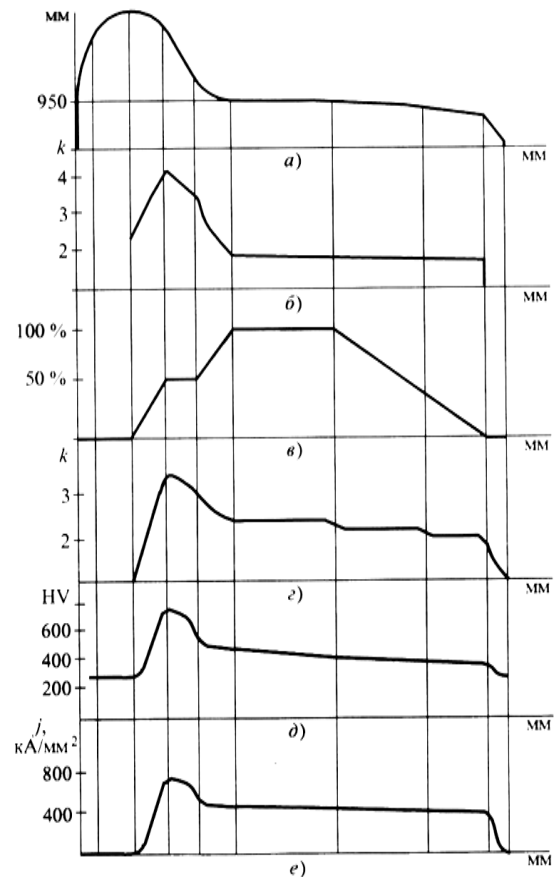


Рис. 3. Расчетные графики:

а – профиль железнодорожного колеса; б – расчетный коэффициент упрочнения ($HV_{исх} = 260$); в – контактирование профиля по времени; г – сплайн-интерполяция k с учетом контактирования по времени; д – микротвердость железнодорожного колеса по профилю; е – зависимость плотности тока при электрохимической обработке (ЭМО) вдоль профиля железнодорожного колеса

Неравномерность износа рельса в поперечном сечении ведет к снижению производительности обработки, требуя нескольких рабочих ходов рельсошлифовального комплекса. Формируемый при этом прямолинейно-изогнутый поперечный профиль вызывает большие напряжения и контактные разрушения в вершинах изогнутости при эксплуатации после ремонта.

В процессе эксплуатации железнодорожных рельсов в пути их поверхность катания подвергается постоянно изменяющемуся воздействию колес железнодорожного состава. Возникающие напряжения достигают предела прочности материала рельса. Как следствие этого на поверхности катания образуется слой перенаклепанного металла, изменяются структура и микротвердость поверхностного слоя, в глубине материала возникают растягивающие напряжения. Из-за большого контактного напряжения происходит пластическое отеснение металла, и формируется поперечный профиль головки рельса, отличный от стандартного и характерный для каждого участка пути.

Наличие дефектного слоя существенно снижает прочность рельсов [3] и по мере наработки тоннажа 150...200 млн. т брутто, в поверхностном слое начинают интенсивно развиваться микротрещины, которые распространяясь вглубь головки рельса, могут приводить к образованию внутренних усталостных трещин.

Кроме того, появляются и развиваются различные дефекты нарушения прямолинейности поверхности катания железнодорожных рельсов: волнообразный износ с различными шагами волн, изолированные неровности, которые повышают динамическое воздействие колес на рельсы, что также снижает срок службы рельсов.

Анализ литературных данных показал, что наиболее распространенной формой волнообразного износа рельсов, особенно скоростных дорог, является коротковолновый вид износа, у которого наибольшее число дефектов имеют средний шаг волны в пределах 30...100 мм. Предельная высота волнообразных неровностей регламентируется нормативными требованиями: для скоростных дорог России $\leq 1,0$ мм; Германии и Японии $\leq 0,05$ мм. Изношенные рельсы вызывают значительное увеличение динамических нагрузок как со стороны рельса на колесо, так и наоборот, что ведет к увеличению дефектов контактно-усталостного происхождения.

Выполненные во ВНИИЖТ РФ (Москва) комплексные исследования показали, что предотвращение развития микротрещин и образования волнообразных микронеровностей на ранней стадии возможно при своевременном периодическом их удалении – текущем ремонте. Так, механическая обработка поверхности катания головки рельса на глубину по оси симметрии до 0,5...1,0 мм по мере пропуска 150...200 млн. т брутто позволяет повы-

сить усталостную прочность рельсов на 15...25 %, существенно продлевая срок службы рельсов и сокращая их расход при эксплуатации пути. Более строгие требования, предъявляемые к скоростным дорогам Японии и стран Западной Европы, влекут за собой их более частые ремонты – с периодичностью продвижения по рельсам грузов массой 50 млн. т брутто.

Текущие ремонты рельсов в пути выполняют рельсошлифовальные комплексы (РШК), работающие на основе разных методов шлифования. Существующие технологии обработки рельсов в пути РШК имеют ряд недостатков. Одни не имеют возможности формирования полного профиля головки рельса, другие, формирующие полный рабочий профиль, придают рельсу ремонтный (симметричный) профиль (рис. 4, а, кривая 3), который не является оптимальным для каждого участка пути.

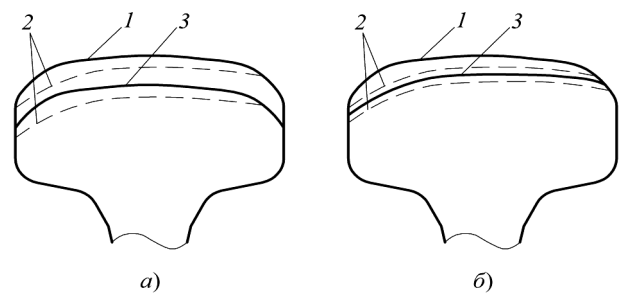


Рис. 4. Поперечные профили рабочей поверхности рельса:

а – при существующей технологии ремонта; б – по новой технологии; 1 – исходный профиль; 2 – приработанный эксплуатационный профиль; 3 – ремонтный профиль

Такая обработка ведет к излишнему съему металла, а также к повторному процессу приработки. Кроме того, получаемый профиль очерчивается не плавной кривой, а ломаной с характерными выступами (высотой до нескольких десятых миллиметра), являющимися дополнительными концентраторами напряжений, что также негативно сказывается на работоспособности рельсов. Рабочая скорость существующих рельсошлифовальных поездов невысокая – до 5...8 км/ч, что значительно снижает пропускную способность железных дорог и делает данный метод практически неприемлемым для скоростных дорог.

Интенсивный износ любых поверхностей трения, в том числе и железнодорожных рельсов, происходит в начальный период прира-

ботки. После этого формируются определенный профиль и качество поверхностного слоя, которые снижают интенсивность изнашивания. На каждом участке пути образуется свой оптимальный профиль. Необходимо поддерживать такой профиль, пока не наступил катастрофический износ.

Учитывая все эти недостатки, предлагается новый инновационный технологический процесс обработки рабочей поверхности рельсов в пути. Его сущность заключается в удалении дефектного поверхностного слоя, черновой и чистовой обработке рабочей поверхности рельсов с сохранением сформировавшегося в процессе приработки поперечного профиля и обеспечении допустимой волнистости и шероховатости поверхности (рис. 4, б). Данный технологический процесс включает в себя иглофрезерование, шлифование брусками, лепестковое шлифование [4].

Для удаления перенаклепанного слоя с поверхности катания предлагается использовать иглофрезерование. Иглофрезерная обработка отличается от процесса резания традиционными лезвийными инструментами воздействием на обрабатываемую поверхность большого числа режущих кромок. Режущими элементами иглофрезы являются стальные проволоочки малого диаметра с высокой плотностью упаковки. Каждая иголка представляет собой полужесткий микрорезец.

При вращении иглофрезы иголки инструмента соприкасаются с обрабатываемой поверхностью и упруго отгибаются в тангенциальном направлении. При повороте конца каждой иголки ее боковая поверхность и торец образуют полукруглую режущую кромку с отрицательным передним и соответствующим задним углами. В результате врезания микрорезцов в поверхность обрабатываемого рельса и перемещения относительно его происходит снятие с его поверхности перенаклепанного слоя металла. Срезание металла иголками обеспечивается вследствие создания предварительного натяга иглофрезы относительно обрабатываемой поверхности.

При обработке иглофрезами не возникает огранки профиля в отличие от обработки шлифовальными кругами. Применение иглофрез при обработке поверхности катания железнодорожных рельсов позволяет уменьшить число обрабатывающих головок путем увеличения зоны контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью.

Иглофрезы благодаря большому числу режущих элементов дают возможность обраба-

тывать поверхности с высокими скоростями резания и подачами, что позволяет повысить производительность обработки. Наряду с удалением дефектного слоя, возникшего в процессе эксплуатации, иглофрезерование сохраняет естественно сформировавшийся рабочий профиль поверхности.

Для устранения продольных волнообразных неровностей на поверхности катания железнодорожных рельсов предлагается применять шлифовальные бруски. В отличие от существующих методов обработки рельсов предлагаемый метод имеет свои характерные особенности. Кинематика такова, что шлифовальный брусок, прижимаясь к рельсу, совершает главное движение резания, образуемое как результат совместного действия поступательного движения вдоль продольной оси рельса в ходе движения поезда и поперечного осциллирующего движения, по направлению перпендикулярного к первому (рис. 5).

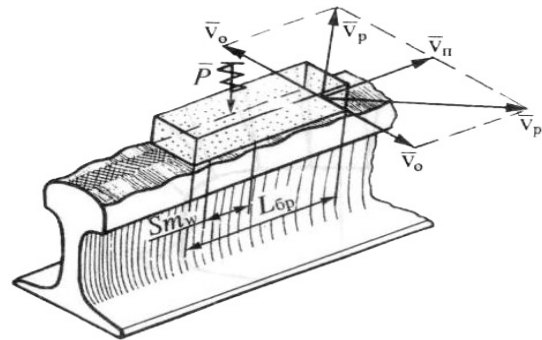


Рис. 5. Схема движений при обработке шлифовальными брусками:

v_0 – скорость осцилляции инструмента; $v_п$ – скорость поезда; v_p – результирующая скорость резания; Sm_w – средний шаг волнистости; $L_{бр}$ – длина бруска; $L_{бр} > Sm_w$; P – сила прижатия инструмента

Осцилляцией бруска достигается сложное движение каждого абразивного зерна по обрабатываемой поверхности, приводящее к микрорезанию металла разными гранями зерна. При изменении направления движения поверхность бруска очищается от стружки, т.е. движение осцилляции позволяет повысить эффективность обработки, а также созданием условий для самозатачивания инструмента увеличить его стойкость. Для эффективного удаления продольной волнистости длина брусков выбирается из условия перекрытия не менее трех длин волн. Расположением брусков по контуру рабочего участка профиля рельса под разными углами к вертикали обес-

печивается формирование полного профиля поверхности катания.

В отличие от существующих методов абразивной обработки предлагаемый может работать с более высокими скоростями движения рельсообрабатывающего комплекса (до 30 км/ч), так как имеется большой запас по повышению скорости резания (до 20...30 м/с).

Увеличение шероховатости поверхности рельса улучшает сцепляемость колес, а уменьшение снижает интенсивность износа только на начальном периоде эксплуатации.

Многими исследователями было установлено, что наилучший контакт колеса и рельса обеспечивается при шероховатости поверхности $Rz = 40...60$ мкм [3].

Для уменьшения шероховатости поверхности катания железнодорожных рельсов, а также формирования плавного характера обработанного участка поперечного профиля предлагается использовать обработку лепестковыми кругами. Лепестковый круг состоит из радиально расположенных и жестко закрепленных с одной из торцевых сторон листов шлифовальной шкурки. При движении лепестков в зоне обработки они изгибаются, прижимаются к обрабатываемой поверхности и проскальзывают по ней. Зерна шлифовальной шкурки благодаря силе прижатия и центробежным силам внедряются в обрабатываемую поверхность и выполняют микрорезание. Благодаря эластичности лепестков лепестковые круги позволяют обрабатывать фасонные поверхности, которой и является поверхность катания железнодорожного рельса.

Обработка этим способом поверхности катания железнодорожных рельсов из-за большой зоны контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью обеспечивается шестью лепестковыми кругами (рис. 6).

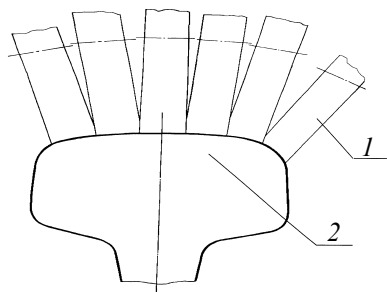


Рис. 6. Схема установки иглофрез и лепестковых кругов на поверхности катания железнодорожного рельса:

1 – инструмент; 2 – поверхность катания головки рельса

Создание новых рельсообрабатывающих комплексов для реализации предложенного инновационного технологического процесса обработки поверхности катания железнодорожных рельсов в пути позволит значительно повысить производительность их обработки с сохранением сформировавшегося в процессе приработки поперечного профиля рабочей поверхности катания.

Таким образом, предложенные инновационные технологии позволят повысить в 1,5 – 2 раза долговечность железнодорожных колес и рельсов и увеличить производительность ремонта поверхности катания железнодорожных рельсов в 3,5 раза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Инженерия** поверхности деталей / Колл. авт.; под ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение. 2008. – 320 с.
2. **Научно-технические технологии в машиностроении** / А.Г. Сулов, Б.М. Базров, В.Ф. Безъязычный и др.; под ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2012. – 528 с.
3. **Мелентьев, Л.П., Порошин, В.Л., Фадеев, С.И.** Содержание и ремонт рельсов. – М.: Транспорт, 1984. – 220 с.
4. **Сулов, А.Г., Финатов, Д.Н., Захаров, Л.А., Маслюков, В.А.** Технологическое обеспечение повышения долговечности поверхностей катания железнодорожных рельсов и колес // *Инструмент и технологии*. – 2002. – № 9-10. – С. 20-28.

REFERENCES

1. *Parts Surface Engineering* / Author group; under the editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering. 2008. – 2008. – pp. 320.
2. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering* / A.G. Suslov, B.M. Bazrov, V.F. Beziyazychny et al.; under the editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering, 2012. – pp. 528.
3. Melentiev, L.P., Poroshin, V.L., Fadeev, S.I. *Rail Maintenance and Repair*. – M.: Transport, 1984. – pp. 220.
4. Suslov, A.G., Finatov, D.N., Zakharov, L.A., Maslyukov, V.A. Technological support of life increase in railway wheel and rail treads // *Instrument and Technologies*. – 2002. – No.9-10. – pp. 20-28.

Рецензент д.т.н. Ю.С. Степанов