

коэффициента демпфирования приводит к значительному снижению амплитуды колебания внутренних продольных сил и времени затухания колебаний.

Влияние массы вагонов на продольную динамику рассматривалось для состава из 62 вагонов, движущегося по спуску 4 ‰ с начальной скоростью 15 м/с при силе 350 кН. Проанализированы варианты торможения для масс вагонов от 20 до 88 т брутто. Расчеты показали, что уменьшение массы вагона с 88 до 20 т в случае жесткости упругих элементов  $c = 1,1 \cdot 10^7$  Н/м и коэффициента демпфирования  $K = 1 \cdot 10^6$  Н·с/м приводит к уменьшению периода колебаний почти в два раза.

На основе обобщения результатов моделирования движения однородного поезда, представленного в виде цепочки твердых тел, соединенных упруго-вязкими связями, можно сформулировать следующие выводы:

– в однородном поезде каждый вагон совершает такое же колебательное движение, как и локомотив, только по мере удаления от локомотива оно отстает по фазе и затухает вследствие работы поглощающих аппаратов автосцепок;

– период изменения силы в межвагонных соединениях практически не зависит от величины уклона профиля, начальной скорости движения, тормозной силы и коэффициента демпфирования поглощающих аппаратов и определяется массой вагонов и жесткостью упругих элементов;

– амплитуда сил в межвагонных соединениях зависит от тормозной силы, коэффициентов жесткости и демпфирования связей вагонов и их массы, но на нее практически не влияют уклон профиля и начальная скорость торможения.

Иная картина наблюдается в случае движения по постоянному профилю неоднородных поездов. С помощью модели рассмотрено влияние расположения вагонов разной массы на действующие в межвагонных соединениях силы. Расчеты выполнялись для следующих исходных данных: масса груженого вагона 85 т, порожнего – 20 т, уклон участка –8 ‰, начальная скорость поезда 15 м/с, тормозная сила 400 кН. Группа из пяти порожних вагонов занимает различные положения по длине поезда: в голове поезда, после 10-, 30-го вагонов и в хвосте поезда.

Результаты вычислений показали, что наибольшие силы возникают при расположении порожних вагонов в первой трети длины поезда. При этом максимальные их значения превышают силу электродинамического тормоза локомотива на 8–15 %. В случае размещения пяти порожних вагонов в голове поезда максимальная сила возникает после порожнего 5-го вагона, при порожних 11–15-х также после последнего порожнего 15-го вагона. В составе с 31–35-м порожними вагонами такой максимум отмечается после 11-го вагона. Расположение порожних вагонов в хвосте поезда способствует уменьшению максимальных сил в автосцепках как самих порожних вагонов, так и части предшествующих груженых. Любое другое их размещение ведет к росту максимальных сил в межвагонных соединениях. Полученные результаты подтверждают приведенную ранее в исследованиях П. Т. Гребенюка и С. В. Вершинского информацию о повышении продольных динамических сил примерно на 20–30 % в неоднородном поезде по сравнению с однородным.

Разработанная модель может быть использована при выборе рациональных режимов ведения поездов и формировании железнодорожных составов.

УДК 621.793

## **ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ДЕТАЛЯХ ХОДОВЫХ СОПРЯЖЕНИЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ПУТЕВЫХ МАШИН ЦЕНТРОБЕЖНЫМ ИНДУКЦИОННЫМ МЕТОДОМ**

*И. А. СОСНОВСКИЙ*

*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск*

*И. И. ГРУДЬКО, И. П. ТРЕМБИЦКИЙ*

*Эксплуатационное республиканское унитарное предприятие*

*«Центр механизации путевых работ Белорусской железной дороги», г. Пинск*

На предприятиях железнодорожного транспорта Республики Беларусь используется широкая номенклатура деталей машин и устройств, которые содержат в своем исполнении узлы трения три-

ботехнического назначения, работающие в режиме интенсивного абразивного изнашивания. К таким узлам трения относятся, например, детали ходовых сопряжений рабочих органов путевых машин высшего класса сложности, предназначенных для выправки, подбивки, отделки пути и очистки щебня (втулки подбивочных блоков и гайки подъема электромагнитов машин типа ВПР и ВПО, виброплиты балластировочных машин и др.).

Задачей исследований, проведенных в данной работе, является повышение работоспособности и срока службы антифрикционных изделий ходовых сопряжений рабочих органов путевых машин. Решение этой задачи осуществлялось путем разработки новой высокоэффективной технологии индукционной наплавки порошковых покрытий с использованием результатов теоретических исследований процесса проплавления порошковых слоев при индукционном нагреве.

Применение композиционных антифрикционных покрытий из модифицированных медных сплавов для создания двухслойных антифрикционных изделий позволяет значительно сократить расход цветных сплавов и обеспечить повышение качества и надежности машин в целом. Одним из эффективных способов формования порошковых покрытий в холодном и горячем состоянии непосредственно во внутренней полости стальной заготовки-матрицы является центробежная индукционная наплавка. Для промышленной реализации этого метода разработаны технологии, оборудование и сопутствующая оснастка.

Известно, что в основе индукционной центробежной наплавки порошковых слоев лежит технологическая схема, позволяющая реализовать следующую последовательность нанесения слоев порошковых покрытий. Сначала с помощью индукционных токов происходит разогрев вращающейся стальной цилиндрической заготовки до температур возможного фазового перехода из твердого в жидкое состояние материала частиц порошка. Затем в результате изотермической выдержки и теплообмена между разогретой внутренней поверхностью стальной цилиндрической заготовки и прижимаемого к ней центробежными силами порошка происходит послойное его расплавление с образованием после кристаллизации и охлаждения порошковых покрытий. Такая последовательность процесса нанесения порошковых слоев позволяет полагать, что технологические режимы индукционной центробежной наплавки определяются такими технологическими параметрами, как длительность процесса, мощность и частота электромагнитного излучения индуктора, а также линейными размерами стальной цилиндрической заготовки, мощностью создаваемого на ее поверхности теплового источника, удельным сопротивлением, плотностью и теплопроводностью стали. Эти технологические параметры индукционной центробежной наплавки определяют температурный режим нанесения слоев порошковых покрытий.

В результате наших исследований установлено, что распределение температуры в расплавленной зоне будет определяться зависимостью

$$T_1(r, \tau) = - \frac{b\tau \ln \frac{r}{\eta} + (T_{\text{тв}} + b\tau) \ln \frac{\eta}{R} - T_{\text{тв}} \ln \frac{R}{\eta}}{\ln \frac{R}{\eta}}, \quad (1)$$

где  $T_1$  – температуры жидкой фазы (расплава), К;  $r$  – текущая координата, м;  $\tau$  – время, с;  $b$  – темп нагрева, К/с;  $\eta$  – расстояние от оси вращения до границы плавления, м;  $T_{\text{пл}}$  – температура плавления присадочного материала, К;  $R$  – радиус внутренней поверхности заготовки, м.

На основании полученной зависимости (1) и уравнения теплопроводности можно получить дифференциальную зависимость

$$-\lambda_1 \frac{b\tau}{\eta \ln \frac{R}{\eta}} = \rho\gamma \frac{d\eta}{d\tau}, \quad (2)$$

где  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности жидкой фазы, Вт/м·К;  $\rho$  – плотность присадочного материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\gamma$  – удельная теплота плавления присадочного материала, дж/кг.

Отсюда получим трансцендентное алгебраическое уравнение

$$\eta^2 \ln \frac{R}{\eta} - \frac{1}{2} (R^2 - \eta^2) = - \frac{\lambda_1 b}{\rho\gamma} \tau^2, \quad (3)$$

которое определяет зависимость между координатой фронта плавления  $\eta$  и временем  $\tau$ .

Для проплавленного порошкового слоя при  $\eta = R_0$  решение (2) примет вид

$$\tau = \frac{\rho\gamma_2}{b\lambda_1} \left[ \frac{1}{2}(R^2 - R_0^2) - R_0^2 \ln \frac{R}{R_0} \right], \quad (4)$$

где  $R_0$  – наружный диаметр заготовки, м.

Вышеизложенная модель устанавливает связь между технологическими параметрами индукционного нагрева и динамикой перехода из твердого состояния в жидкофазное состояние порошкового слоя на основании модельных допущений Лейбензона и Лыкова.

Проведенные исследования легли в основу разработки технологического процесса и оборудования (рисунок 1) для изготовления двухслойных антифрикционных изделий (биметаллических



Рисунок 1 – Процесс изготовления двухслойного антифрикционного изделия (биметаллической втулки подбивочного блока выправочно-подбивочно-рихтовочной машины ВПР)

втулок подбивочных блоков, гаек подъема электромагнитов путевых машин ВПР и ВПО) центробежным индукционным методом с использованием составов антифрикционных композиционных порошковых смесей повышенной износостойкости на медной основе, что позволило повысить твердость наплавленных слоев деталей ходовых сопряжений рабочих органов путевых машин, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания, в 1,3–1,4 раза и относительную износостойкость в сравнении с серийно выпускаемыми деталями в 1,4–1,6 раза при увеличении производительности процесса изготовления на 30–35 %.

УДК 629.4

## **ПРОВЕДЕНИЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПО ЕДИНЫМ ПРАВИЛАМ – КЛЮЧ К ПОВЫШЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

*Н. П. УЛАЩИК*

*Белорусская железная дорога, г. Минск*

*Е. П. ГУРСКИЙ*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Важнейшая задача железных дорог – обеспечение безопасности перевозок и экологической безопасности окружающей среды. Особенности эксплуатации железных дорог являются:

- сверхнормативные сроки использования конструкций пути, подвижного состава, электротягового комплекса;
- недостаточно высокий технический уровень эксплуатации конструкций пути, подвижного состава, электротягового комплекса;
- сложные климатические условия диагностики технических устройств в процессе их эксплуатации;
- рост объемов транзитных перевозок на международных транспортных коридорах;
- повышение веса составов и скоростей движения.

Предотвращение транспортных происшествий и техногенных катастроф в реально сложившихся условиях связано с необходимостью проведения мониторинга, а также диагностики технического состояния железнодорожного подвижного состава, технических средств и устройств железнодо-