

УДК 629.4.027.2

П. М. Терехов, А. А. Воробьев, Р. А. Сахаров

Петербургский государственный университет путей сообщения

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ РЕЗАНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ БАНДАЖЕЙ ПОВЫШЕННОЙ ТВЕРДОСТИ

Приведены результаты использования бандажей повышенной твердости по ГОСТ 389–2010, отмечена необходимость совершенствования технологии ремонта колесных пар локомотивов. Предложена модель описания процесса обработки бандажей на фрезерных станках, соответствующая современным представлениям науки о резании металлов. Приведен метод аналитического определения сил фрезерования.

бандаж, колесная пара, восстановление поверхности катания, фрезерование, силы резания при фрезеровании.

Введение

Использование цельнокатаных колес повышенного качества и твердости по ТУ 0943-157-01124328–2003 позволило сократить расходы ОАО РЖД за счет снижения числа отцепок грузовых вагонов по прокату, вертикальному подрезу гребня и другим дефектам, связанным со смятием и истиранием металла от давления на площадке контакта и действия сил трения качения и трения скольжения. По данным [1], за 2006–2009 гг. средний пробег колесных пар с колесами повышенной твердости до первой обточки составляет 279,7 тыс. км, со стандартными колесами – 106,3 тыс. км.

Закономерным итогом работы по увеличению ресурса колесных пар локомотивов стало создание и утверждение новой редакции ГОСТ 398–2010 «Бандажи из углеродистой стали для подвижного состава железных дорог широкой колеи и метрополитена». В новом ГОСТе сталь марки 3 заменена сталью 4, имеющей твердость 320–360 НВ. Эта сталь по химическому составу и физико-механическим свойствам схожа со сталью цельнокатаных колес повышенного качества и твердости по ТУ 0943-157-01124328–2003, получивших широкое распространение на отечественных железных дорогах в последние годы.

Испытания бандажей из стали марки 4 проводились на Горьковской, Южно-Уральской, Восточно-Сибирской и Северной железных дорогах – филиалах ОАО РЖД, на грузовых электровозах ВЛ10, ВЛ80, ВЛ85, грузовых тепловозах 2 ТЭ10 и на маневровых тепловозах ЧМЭЗ. Результаты эксплуатационных испытаний подтвердили их преимущество по сравнению со стандартными бандажами из стали марки 2 [2]. Однако следует отметить, что увеличение твердости бандажей ухудшит их обрабатываемость и потребует изменений в технологии ремонта колесных пар в депо. Так, фигурировавшая в предыдущей редакции ГОСТа марка стали 3 с повышенными механическими свойствами практически не использовалась именно по причине затруднений, возникающих при механической обработке бандажей в депо [3]. Таким образом, улучшение эксплуатационных качеств вызывает необходимость совершенствования технологии ремонта колесных пар локомотивов в преддверии начала широкого использования твердых бандажей.

Фасонное фрезерование используется преимущественно в процессе ремонта для обработки профиля катания колесных пар локомотивов, при этом восстановление изношенного колеса происходит без выкатывания его из-под тягового подвижного состава.

Фрезерование осуществляется на станках КЖ-20 различной модификации, инструментом является фреза, представленная на рисунке 1. Конструкция фрезы предусматривает 10 «ножей», наклоненных к основной плоскости под углом $\omega = 15^\circ$, в каждом из которых закреплено 10–12 круглых режущих пластин диаметром 12 мм.

Процесс фасонного фрезерования рассматривался в работах [4], [5], в которых авторы концентрировались в основном на вопросах проектирования сборного твердосплавного инструмента, формообразования обрабатываемой поверхности и, частично, кинематике процесса. При этом недостатком кинематического описания процесса, предложенного авторами, является отсутствие различий в геометрии срезаемой стружки на различных участках профиля. Кроме того, в вышеупомянутых работах вообще не рассматривались вопросы определения сил и температур, возникающих в процессе обработки, и влияния на них свойств обрабатываемого материала, геометрии режущего инструмента и параметров режима резания.

Таким образом, в связи с широким использованием данного способа восстановления и изменением свойств бандажей вопросы подробного кинематического описания процесса, схематизации сил, действующих на режущие зубья инструмента, и их определение до сих пор являются актуальными и требуют решения.

1 Кинематика процесса, реализованная при фасонном фрезеровании поверхности катания колесных пар

Обработка поверхности колесных пар фасонным твердосплавным сборным инструментом представляет собой нестационарное несвободное резание с криволинейной режущей кромкой и круговым движением подачи, при котором оси вращения инструмента и колеса параллельны. Ещё одной особенностью является то, что обрабатываемая и обработанная поверхности (профиль коле-

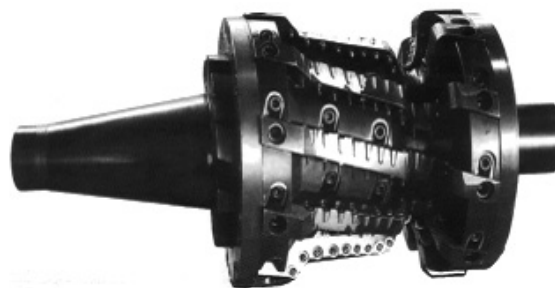


Рис. 1. Фреза для обработки колесных пар локомотивов

са) представляют собой сложную кривую, состоящую из прямолинейных участков, вогнутых и выпуклых кривых. Кроме того, сложность схематизации данного процесса связана с наличием не только круговой подачи колеса, но и конструктивной подачи твердосплавных пластин, смещенных на оси фрезы относительно друг друга.

Для корректного описания кинематики процесса обработки лезвийным инструментом, а также расчета физических характеристик процесса фрезерования (сил, температур) использовались четыре плоскости: основная плоскость – перпендикулярная скорости резания, рабочая плоскость (содержащая векторы скорости и подачи), плоскость резания (касательная к режущей кромке и содержащая вектор скорости резания) и плоскость стружкообразования (рис. 2). Плоскости показаны для одного из положений зуба фрезы, при этом плоскость резания и рабочая плоскость построены для точки режущей кромки, соответствующей максимальному диаметру фрезы для этой твердосплавной пластинки. Технологические оси выбраны неподвижно относительно станка, ось W совпадает с осью вращения фрезы, оси H и V расположены в рабочей плоскости, ось H направлена к оси вращения колеса, а V – перпендикулярна ей.

Фреза работает по генераторной схеме резания. После врезания на всю глубину припуска срезаемый по ширине колеса слой металла разделяется на части соответственно числу режущих элементов, каждая точка колеса обрабатывается только одной пластиной. Профилирование фасонной поверхности производится небольшим участком ре-

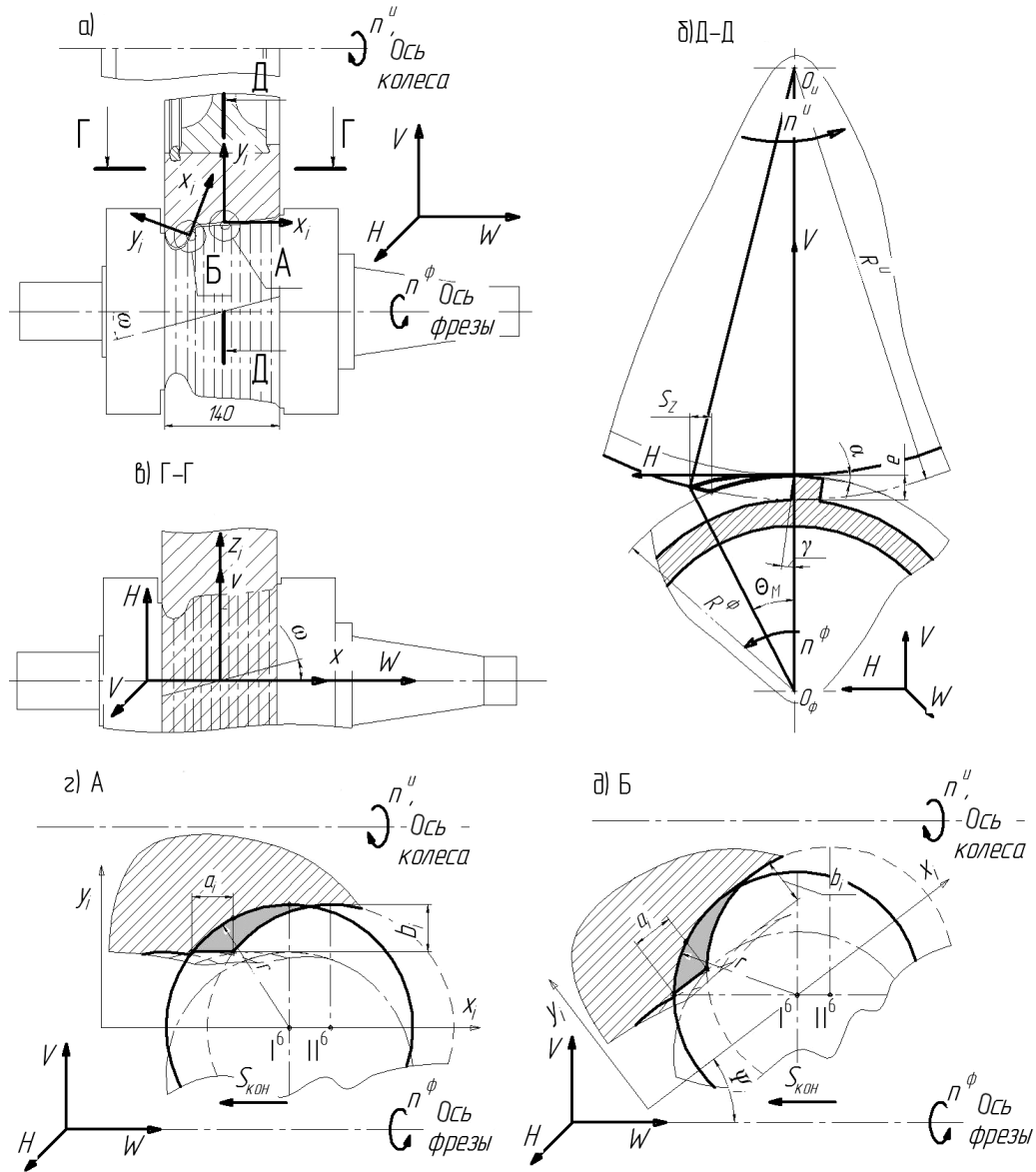


Рис. 2. Обработка колесной пары на фрезерном станке: а, з, д – вид в основной плоскости; б – вид в рабочей плоскости; в – вид в плоскости резания; x_i, y_i, z_i – подвижная система координат, связанная с режущим зубом; n^u – частота вращения колеса, об/мин; n^ϕ – частота вращения фрезы, об/мин; R^u – внешний радиус обрабатываемого изделия, мм; R^ϕ – внешний радиус фрезы, мм; e – глубина врезания, мм; γ – главный передний угол, град.; α – главный задний угол, град.; S_z – подача на зуб фрезы, мм/зуб; Θ^M – максимальный угол контакта фрезы с обрабатываемым колесом, град.; b – ширина срезаемой стружки, мм; a – толщина срезаемой стружки, мм; Ψ_i – угол наклона образующей поверхности

жущей кромки каждого режущего элемента (рис. 3). Величина смещения центров вращения соседних твердосплавных пластин относительно оси W определяет конструктивную подачу $S_{кон}$. Конструктивная подача различна на разных участках профиля и зависит

от длины участка A_i , где i – номер участка. Ножи фрезы на развертке обозначены римскими цифрами, участки обрабатываемого профиля – арабскими.

Не трудно заметить, что длина режущей кромки, определяемая в рабочей плоскости,

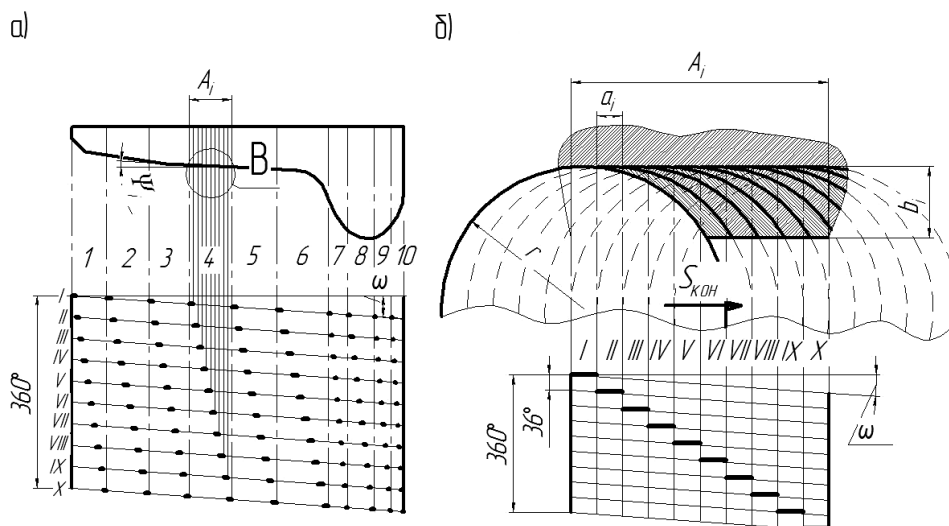


Рис. 3. Схема фрезерования профиля колеса на развертке и в основной плоскости:
 b_i, a_i – ширина и толщина срезаемой стружки на i -м участке, мм

не одинакова при различных положениях зуба фрезы, зависит от угла контакта Θ (рис. 2 *з, б*) и определяется в соответствии с [6] по формуле:

$$b = S_z \frac{c}{R_u} \cdot \sin \Theta;$$

$$c = R^n + R^\Phi - e,$$

где c – расстояние между осью фрезы и осью обрабатываемого изделия $O_n O_\Phi$, мм.

На рисунке 3, *б*, приведена схема обработки фасонной фрезой цилиндрической поверхности. Профиль колеса представляет собой набор из прямых, наклоненных к оси вращения колеса, вогнутых и выпуклых кривых, следовательно, для определения толщины a необходимо учитывать величину угла Ψ наклона поверхности для каждой твердосплавной пластинки, обрабатывающей этот участок профиля. В таком случае условия фрезерования будут различны для каждой твердосплавной пластины, а значит, описание и анализ процесса сильно усложнятся.

В настоящей работе принято допущение, что для каждого участка профиля существует фиксированный угол наклона образующей поверхности Ψ_i , кроме того, на этом участке для всех твердосплавных пластин, располо-

женных на всех ножах и обрабатывающих этот участок, приняты равные значения R_n^i и R_Φ^i (i – номер участка). Величины R_n^i и R_Φ^i принимаются как значения для середины участка, а Ψ_i – как наклон линии, соединяющей крайние участки профиля с осью W .

Для каждого участка профиля величина ширины срезаемой стружки будет определяться как

$$b_i = 2\pi \cdot c \cdot \frac{n^n}{n^\Phi} \cos \Psi_i \sin \Theta.$$

Толщина срезаемой стружки, обусловленная конструктивной подачей (рис. 2, *з, д*),

$$a_i = \frac{S_{\text{кон}}}{\cos \Psi_i}.$$

Максимальный угол контакта фрезы с обрабатываемым колесом Θ_i^M на i -м участке определяется формулой:

$$\cos \Theta_i^M = \frac{R_i^{\Phi^2} + (R_i^\Phi + R_n^i - t)^2 - R_n^{i^2}}{2 \cdot R_i^\Phi \cdot (R_i^\Phi + R_n^i - t)}.$$

Кроме неподвижной системы координат технологических осей фрезерного станка W, H, V , для описания процесса обработки вводится подвижная система координат $x_i, y_i,$

z_i , связанная с режущим лезвием и вращающаяся относительно оси W . Ось z_i находится в плоскости резания и совпадает с направлением вектора скорости главного движения; ось x_i находится в основной плоскости и сонаправлена со следом образуемой поверхности в основной плоскости, в соответствии с принятым допущением для i -го участка профиля наклонена на угол Ψ_i к неподвижной оси станка W . Ось y_i находится в основной плоскости и перпендикулярна осям z_i и x_i . Таким образом, для каждого i -го участка используется своя система координат, положение которой в пространстве задается в зависимости от угла наклона профиля колеса на участке Ψ_i и положения зуба, т. е. угла контакта Θ .

2 Определение сил, действующих на твердосплавные пластины инструмента

Силы, действующие на передней (R_ξ , R_v) и задней (F_1 и N_1) поверхностях инструмента, рассматриваются отдельно [7]. При этом силы на R_ξ , F_1 определяются в плоскости стружкообразования, перпендикулярной режущей кромке, а R_v , N_1 – также перпендикулярно кромке, в основной плоскости. Для точения эти силы определяются:

$$R_\xi = K_\xi S_b S t, \quad N_1 = q_{N1} h_3 (t / \sin \varphi), \\ R_v = K_v S_b S t, \quad F_1 = \mu_1 N_1,$$

где K_v – удельная сила на передней поверхности в основной плоскости в направлении плоскости стружкообразования; K_ξ – удельная сила на передней поверхности, перпендикулярная режущей кромке; S , t , φ – параметры срезаемой стружки: подача, глубина резания, главный угол в плане соответственно; S_b – действительный предел прочности обрабатываемого материала при растяжении; q_{N1} – нормальные напряжения на задней поверхности режущего лезвия ($q_{N1} \approx \sigma_b$); μ_1 – коэффициент трения; h_3 – высота фаски износа.

Удельные силы на передней поверхности режущего лезвия вычисляются:

$$K_v = \frac{\bar{q}_F c}{S_b a \zeta} \frac{1}{\zeta} \frac{\zeta - \sin \gamma}{\cos \gamma} - \frac{\bar{\tau}}{S_b} \frac{\zeta + 1/\zeta - 2 \sin \gamma}{\cos \gamma} \operatorname{tg} \gamma; \\ K_\xi = \frac{\bar{\tau}}{S_b} \frac{\zeta + 1/\zeta - 2 \sin \gamma}{\cos \gamma} + \frac{\bar{q}_F c}{S_b a \zeta},$$

где \bar{q}_F – касательное напряжение по передней поверхности; c – полная длина контакта стружки с режущим лезвием; a – толщина срезаемой стружки; ξ – усадка стружки; $\bar{\tau}_\gamma$ – средние касательные напряжения в условной плоскости сдвига; γ – главный передний угол.

Для расчёта сил при фрезеровании нестационарность процесса учитывается за счет изменения геометрии срезаемой стружки в зависимости от угла контакта фрезы Θ , при этом силы, действующие на инструмент в каждый момент времени в основной и плоскости стружкообразования, определяются аналогично случаю точения. Так как режущая кромка в случае фасонного фрезерования является криволинейной, рассмотрим малый отрезок режущей кромки Δl (рис. 4, а, в), считая его прямолинейным и наклоненным к направлению конструктивной подачи под углом в плане φ_x .

Для каждого элементарного участка Δl режущей кромки можно построить свою координатную систему, где ось μ будет совпадать с направлением Δl , ξ будет сонаправлена с вектором главного движения, а ось ν – перпендикулярна μ и ξ . Будем считать, что равнодействующая приращений силы на передней поверхности, заданная своими двумя проекциями (ΔR_ν , ΔR_ξ), находится в плоскости, перпендикулярной некоторому прямолинейному участку режущей кромки Δl (в плоскости стружкообразования):

$$\Delta R_\nu = K_v S_b a_x \Delta l; \quad \Delta R_\xi = K_\xi S_b a_x \Delta l,$$

где a_x – толщина срезаемого слоя на участке Δl режущей кромки (рис. 4, з).

На задней поверхности на участке Δl режущей кромки приращение сил определяется с учётом сил, действующих на застойную зону и фаску износа:

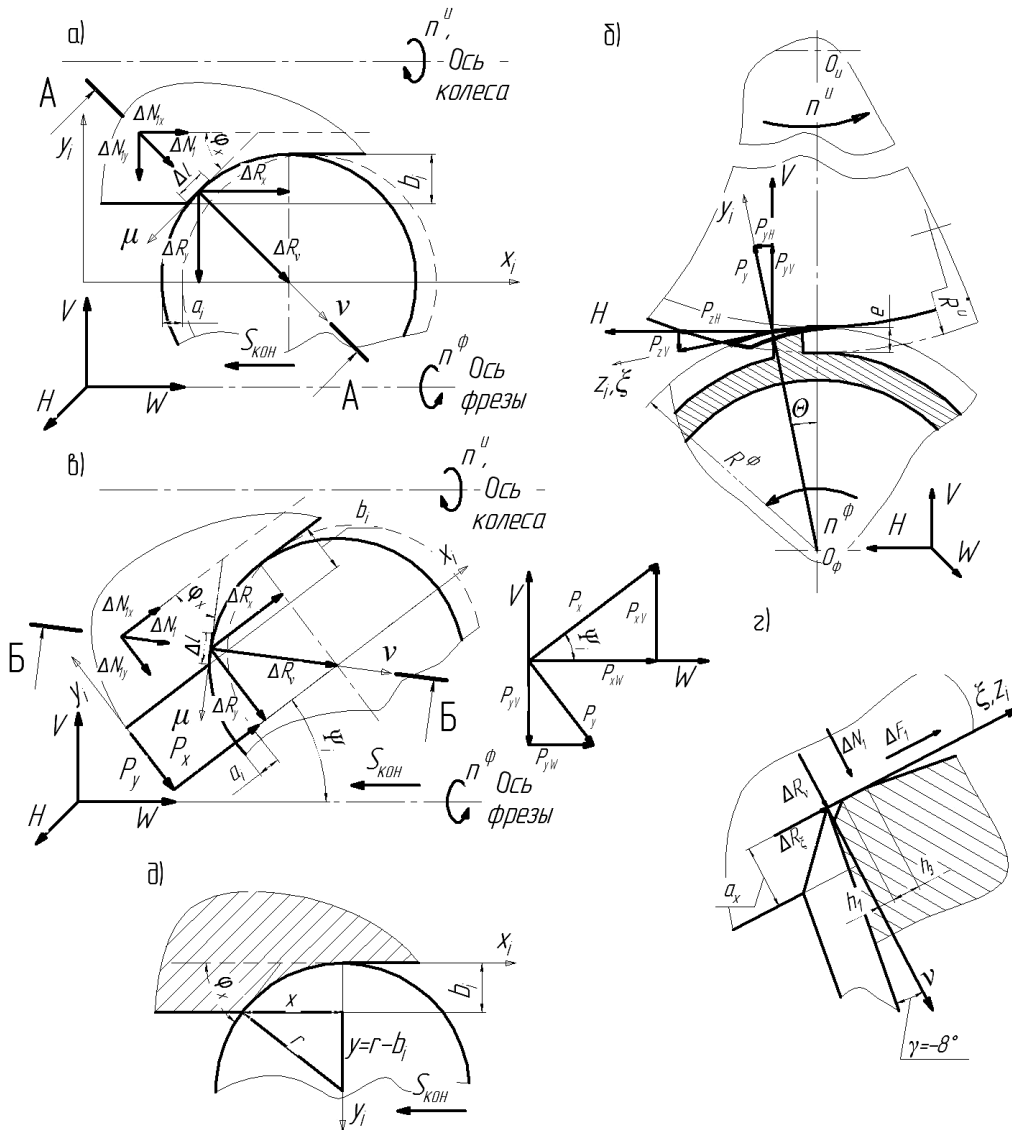


Рис. 4. Силы, действующие на лезвие инструмента: *a, в* – основная плоскость (2,5 : 1); *б* – рабочая плоскость (Д–Д); *з* – плоскость стружкообразования (А–А); *д* – пределы интегрирования; $\Delta N_{1x}, \Delta N_{1y}, \Delta R_x, \Delta R_y$ – проекции приращений сил ΔN_1 и ΔR на оси подвижной системы координат x_i, y_i, z_i ; $P_{yH}, P_{yV}, P_{zH}, P_{zV}, P_{zW}, P_{zX}, P_{zV}, P_{yW}$ – проекции сил фрезерования на технологические оси V, H, W ; x, y – текущие координаты в подвижной системе координат x_i, y_i, z_i для элементарного участка кромки Δl

$$\Delta N_1 = (\sigma_b h_3 + \bar{q}_F h_1) \Delta l;$$

$$\Delta F_1 = \mu_1 (\sigma_b h_3 + \bar{q}_F h_1) \Delta l,$$

где σ_b – условный предел прочности при растяжении; h_1 – высота застойной зоны; μ_1 – коэффициент трения на задней поверхности; \bar{q}_F – касательное напряжение на задней поверхности застойной зоны ($\bar{q}_F \approx S_b$).

Приращение силы стружкообразования в основной плоскости и плоскости стружкообразования, приращение сил на задней поверхности определяется:

$$\Delta R_v = K_v S_b a_x \Delta l = K_v S_b a \frac{x}{\sqrt{r^2 - x^2}} \Delta x;$$

$$\Delta R_\xi = K_\xi S_b a_x \Delta l = K_\xi S_b a \frac{x}{\sqrt{r^2 - x^2}} \Delta x;$$

$$\Delta N_1 = (\sigma_b h_3 + \bar{q}_F h_1) \frac{r}{\sqrt{r^2 - x^2}} dx;$$

$$\Delta F_1 = (\mu_1 \sigma_b h_3 + \mu_1 \bar{q}_F h_1) \frac{r}{\sqrt{r^2 - x^2}} dx,$$

где $x^2 + y^2 = r^2$; $\Delta l = \frac{r}{\sqrt{r^2 - x^2}} \Delta x$;

$$a_x = a \sin \varphi_x = a \frac{x}{r}; \quad \cos \varphi_x = \frac{\sqrt{r^2 - x^2}}{r}.$$

Так как проекции сил определяются для одного зуба, для упрощения обозначения опустим индексы i , указывающие в обозначении осей принадлежность подвижной системы координат одному из участков. Проекция приращения силы на оси x, y, z будут:

$$\Delta R_y = \Delta R_v \cos \varphi_x = K_v S_b a \frac{x}{r} \Delta x;$$

$$\Delta N_{1y} = (\sigma_b h_3 + \bar{q}_F h_1) \Delta x;$$

$$dP_v = \left(K_v S_b a \frac{x}{r} + \sigma_b h_3 + \bar{q}_F h_1 \right) dx;$$

$$\Delta R_x = \Delta R_v \sin \varphi_x = K_v S_b a \frac{x}{r} \frac{x}{\sqrt{r^2 - x^2}} \Delta x;$$

$$\Delta N_{1x} = (\sigma_b h_3 + \bar{q}_F h_1) \frac{x}{r} \frac{r}{\sqrt{r^2 - x^2}} \Delta x;$$

$$dP_x = \left[K_v S_b a \frac{x^2}{r \sqrt{r^2 - x^2}} + (\sigma_b h_3 + \bar{q}_F h_1) \frac{x}{\sqrt{r^2 - x^2}} \right] dx;$$

$$\Delta P_z = \Delta R_z + \Delta F_1 = K_\xi S_b a \frac{x}{\sqrt{r^2 - x^2}} \Delta x +$$

$$+ \mu_1 (\sigma_b h_3 + \bar{q}_F h_1) \frac{r}{\sqrt{r^2 - x^2}} \Delta x.$$

Интегрируя приращения силы $\Delta P_y, \Delta P_x, \Delta P_z$, примем во внимание, что значение x изменяется от 0 до (см. рис. 4, δ):

$$x = \sqrt{r^2 - (r - b)^2} = \sqrt{b(2r - b)};$$

$$P_y = \int_0^{\sqrt{b(2r-b)}} \left(K_v S_b a \frac{x}{r} + \sigma_b h_3 + \bar{q}_F h_1 \right) dx =$$

$$= K_v S_b a b \left(1 - \frac{b}{2r} \right) + (\sigma_b h_3 + \bar{q}_F h_1) b \sqrt{2 \frac{r}{b} - 1};$$

$$P_x = K_v S_b a \frac{a}{r} \int_0^{\sqrt{b(2r-b)}} \frac{x^2}{\sqrt{r^2 - x^2}} dx +$$

$$+ (\sigma_b h_3 + \bar{q}_F h_1) \int_0^{\sqrt{b(2r-b)}} \frac{x}{\sqrt{r^2 - x^2}} dx =$$

$$= K_v S_b a b \left[\frac{r}{2b} \arcsin \sqrt{\frac{b}{r} \left(2 - \frac{b}{r} \right)} - \right.$$

$$\left. - \left(1 - \frac{b}{r} \right) \frac{1}{2} \sqrt{2 \frac{r}{b} - 1} \right] + (\sigma_b h_3 + \bar{q}_F h_1) b;$$

$$P_z = K_\xi S_b a \int_0^{\sqrt{b(2r-b)}} \frac{x}{\sqrt{r^2 - x^2}} dx +$$

$$+ \mu_1 (\sigma_b h_3 + \bar{q}_F h_1) r \int_0^{\sqrt{b(2r-b)}} \frac{dx}{\sqrt{r^2 - x^2}} =$$

$$= K_\xi S_b a b + (\mu_1 \sigma_b h_3 + \bar{q}_F h_1) r \arcsin \frac{\sqrt{b(2r-b)}}{r}.$$

По данным о величине составляющей силы резания P_z на каждом i -м промежутке можно определить величину мощности фрезерования N_e и крутящего момента $M_{кр}$, создаваемого на оси фрезы, как функцию от угла контакта Θ :

$$M_{кр} = \sum_{i=1}^{z_p} R_i^\Phi P_i^z,$$

где z_p – количество твердосплавных пластин, срезающих стружку при повороте фрезы на угол Θ .

Спроецируем составляющие силы резания, определенные во вращающейся относительно оси фрезы системе координат x, y, z , на технологические оси станка (рис. 4, \bar{b}, \bar{e}). При проецировании учитываем изменение положения подвижной системы координат x_p, y_p, z_p в системе координат технологических осей V, H, W станка в зависимости от

угла контакта Θ и угла наклона профиля колеса на участке Ψ_i . Ниже приведена расчетная формула для определения проекции сил резания на технологическую ось станка V , величина и изменение которой определяют отжим инструмента в процессе обработки, влияющий на величину реального отклонения геометрических размеров получаемой поверхности:

$$P_{Vi} = \left(K_v S_b a b \left(1 - \frac{b}{2r} \right) + (\sigma_b h_3 + \bar{q}_F h_1) b \sqrt{2 \frac{r}{b} - 1} \right) \times \\ \times \cos \Theta \cos \Psi_i + \\ + \left(K_\xi S_b a b + \mu_1 (\sigma_b h_3 + \bar{q}_F h_1) r \arcsin \frac{\sqrt{b(2r-b)}}{r} \right) \times \\ \times \sin \Theta - \left(K_v S_b a b \left[\frac{r}{2b} \arcsin \sqrt{\frac{b}{r} \left(2 - \frac{b}{r} \right)} - \right. \right. \\ \left. \left. - \left(1 - \frac{b}{r} \right) \frac{1}{2} \sqrt{2 \frac{r}{b} - 1} \right] + (\sigma_b h_3 + \bar{q}_F h_1) b \right) \cos \Theta \sin \Psi_i.$$

Геометрические размеры срезаемой стружки a , b определяются в зависимости от угла контакта Θ и угла наклона профиля колеса на участке Ψ_i по приведенным выше формулам. Аналогичным образом вычисляются проекции силы резания на технологические оси H , W станка.

Заключение

Введение бандажей повышенной твердости (сталь 4, ГОСТ 398–2010) требует совершенствования технологического процесса восстановления поверхности катания колесных пар.

Предложена схематизация процесса фасонного фрезерования, позволяющая в более полном объеме описать кинематику про-

цесса, а также определять аналитическим путем силы резания при восстановлении профиля поверхности катания бандажей.

Получены зависимости для аналитического определения сил, возникающих при восстановлении поверхности катания бандажей, методом фасонного фрезерования.

На основе предложенной схематизации процесса и формул для расчета сил в дальнейшем возможно моделировать и анализировать процесс восстановления профиля, определяя рациональные режимы резания.

Библиографический список

1. **Новым** грузовым вагонам – инновационные узлы и детали / Д. В. Шпади // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2011. – № 4. – С. 2–6.
2. **Локомотивные** бандажи марки 4 / А. В. Сухов, Г. И. Брюнчуков, В. В. Тимофеев // Железнодорожный транспорт. – 2012. – № 2. – С. 58–61.
3. **Бандажи** тягового подвижного состава повышенной эксплуатационной стойкости / Г. И. Брюнчуков // Дис. ... канд. техн. наук. – 05.16.01. – М., 2007. – 161 с.
4. **Исследование** твердосплавных фрез для обработки деталей со сложным профилем / А. С. Киселев // Дис. ... канд. техн. наук. – 05.03.01. – М., 1970. – 198 с.
5. **Фасонные** фрезы, оснащенные цилиндрическими твердосплавными пластинами / Ю. Л. Боровой, А. С. Киселев // Фрезы : сб. докладов Всесоюзного совещания по фрезам. – М. : Всесоюзный научно-исследовательский инструментальный институт, 1968. – С. 153–168.
6. **Динамика** фасонного фрезерования / Я. Х. Костюков. – М. : Машгиз, 1950. – 143 с.
7. **Резание** материалов. Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании / С. А. Васин, А. С. Верещака, В. С. Кушнер. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 448 с.