

УДК 621.9

*Черных В.В., кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Луганский  
государственный университет имени Владимира Даля»*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НАКАТКИ ДЕТАЛЕЙ ЛОКОМОТИВОВ ПРИ ПОМОЩИ ГИПЕРБОЛОИДНОГО ИНСТРУМЕНТА**

*Аннотация: Статья посвящена определению основных геометро-кинematicких параметров накатки деталей локомотивов при помощи гиперболоидного инструмента. Процесс накатки деталей зависит от этих параметров и может быть прогнозируемым еще на стадии изготовления инструмента. Это позволяет в значительной степени сократить объем дорогостоящих экспериментальных исследований и прогнозировать работоспособность инструмента еще на стадии его изготовления.*

*Ключевые слова: накатной ролик, однополостной гиперболоид, скорость скольжения, линия контакта, приведенная кривизна*

Накатка деталей является самым трудоемким процессом в технологии изготовления различных деталей типа тел вращения. В силу технологической наследственности снижение трудоемкости изготовления накатного инструмента, образованного на основе однополостного гиперболоида, непосредственно приведет к снижению себестоимости изготовления деталей.

Для повышения эффективности накатки деталей можно выделить ряд направлений, связанных с повышением производительности этого процесса и стойкости инструмента, в числе которых:

- применение накатников с оптимальными геометрическими параметрами;
- обеспечение равномерного износа по всей поверхности инструмента;
- рациональный подбор скорости накатки.

В реальных условиях, при использовании существующего оборудования скорость накатки и подача определяются параметрами используемого технологического процесса и в целом не могут значительно

изменяться. В связи с этим из рассмотрения вышеописанных направлений наиболее перспективными представляются первое и третье, поскольку реализация их не зависит напрямую от существующего оборудования для накатки, а может быть реализована на основе анализа процессов, происходящих при такой отделочно-упрочняющей обработке. Таким образом, можно выделить два основных направления для снижения трудоемкости и повышения производительности накатки:

- создание инструмента определенной геометрии, технология изготовления которого является менее трудоемкой;
- создание особой схемы резания для указанного инструмента.

Наиболее простым и эффективным способом повышения износостойкости и усталостной прочности деталей локомотивов типа тел вращения является обработка их рабочих поверхностей пластическим деформированием.

Физико-механические свойства и структура поверхностного слоя накатанной поверхности в значительной степени отличается от свойств и структуры исходного материала. Это обусловлено воздействием на обрабатываемую поверхность заготовки силовых и тепловых факторов. После механической обработки стальной заготовки структура ее поверхностного слоя изменяется. Значительные деформации накатанного металла в зоне накатки и раскатки вызывают повышение его твердости, предела прочности и выносливости при одновременном снижении пластичности. В данном исследовании такое положение называется наклепом. Интенсивность и глубина залегания наклепа возрастают с увеличением сил накатки, а также с повышением степени пластической деформации металла поверхностного слоя.

Глубина и интенсивность распространения наклепа изменяются в зависимости от вида накатки (сглаживающая или упрочняющая накатка), а также режимов механической обработки и геометрии накатных и раскатных роликов. Изменение режимов накатки вызывает увеличение сил в зоне

деформации, а следовательно, и степени пластической деформации. Такое положение приводит к интенсивности степени наклепа. Увеличение продолжительности воздействия сил накатки от ролика на поверхность детали приводит к увеличению глубины залегания наклепа.

Рассматриваемый вид упрочняющего накатывания используется при изготовлении осей тепловозов, втулок, валов, шестеренок и других деталей. В соответствии с [1] накатке подлежат буксовые шейки, подступичные части, места под насадку шестерен и подшипника осевого редуктора, а также прилегающие к ним галтели, открытые места по данным расчета или опыта эксплуатации.

В единичном производстве наиболее широко применяют обкатывание роликами или шариками, укрепленными на специальной оправке. В серийном и массовом применяют более производительные способы – центробежный наклеп шариками, алмазное выглаживание, дробеструйная обработка и др.

Известны накатные инструменты, полученные при помощи схемы формообразования третьего класса. Технология изготовления такого инструмента заключается в следующем: изготавливаемый накатник устанавливается на инструментальном суппорте станка, который повернут на угол  $\gamma$  по отношению к оси вращения стола станка (рис. 1). Формообразуемый накатник опускается при помощи вертикальной подачи  $S$ , в результате чего образуется его профиль. Полученные таким образом накатные ролики имеют профиль тела вида однополостной гиперboloид, а следовательно, могут обрабатывать поверхность строго определенного диаметра. Изменение диаметра обрабатываемого изделия приводит к переходу от линейного контакта между инструментом и изделием к точечному контакту.

В проводимых исследованиях была разработана новая схема формообразования накатного инструмента, который может иметь линейный характер касания с обрабатываемой деталью любого диаметра. В этом

случае профиль накатного ролика должен представлять собой однополостной гиперболоид, так как только однополостной гиперболоид имеет линейный контакт с прямолинейной образующей накатываемых деталей.

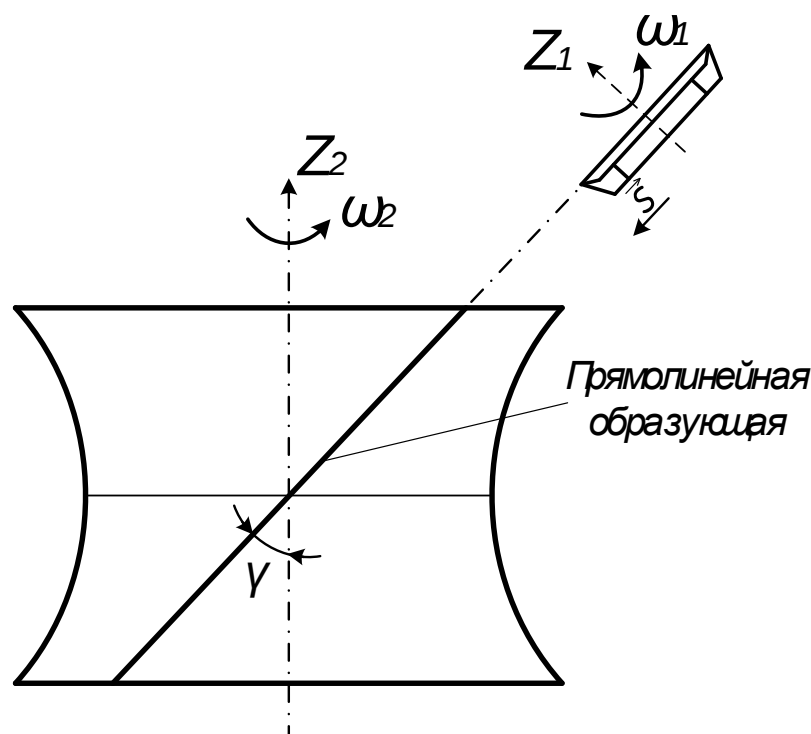


Рис. 1. Принципиальная схема изготовления накатного ролика

Для оценки качественных параметров станочного зацепления гиперболоидных накатников с накатываемыми деталями были определены основные геометро-кинематические показатели процесса накатки.

1. Относительная скорость скольжения, от увеличения которой увеличивается интенсивность процесса накатки оси подвижного состава:

$$\left. \begin{aligned} V_{x1}^{(12)} &= -y_1(1 - u_{21} \cos \gamma) + z_1 u_{21} \sin \gamma \cos \phi_1 - A u_{21} \cos \gamma \sin \phi_1, \\ V_{y1}^{(12)} &= (x_1 - r)(1 - u_{21} \cos \gamma) - z_1 u_{21} \sin \gamma \sin \phi_1 - A u_{21} \cos \gamma \cos \phi_1, \\ V_{z1}^{(12)} &= -u_{21} \sin \gamma ((x_1 - r) \cos \phi_1 - y_1 \sin \phi_1 + A). \end{aligned} \right\}$$

2. Скорость перемещения контактирующих поверхностей.

Условия внедрения контактирующих поверхностей обкатных инструментов зависят от скорости перемещения точек контакта в направлении, перпендикулярном линии контакта. Данная скорость

оказывает существенное влияние на процесс накатки. Чем больше эта скорость, тем лучше процесс накатки. Введем следующие обозначения:

$\vec{V}^{(1)}$  – вектор скорости точки при движении по основной поверхности тепловозной оси;

$\vec{V}^{(2)}$  – вектор скорости точки накатного инструмента;

$\vec{V}^{(12)}$  – вектор скорости относительного скольжения, являющийся главным движением накатки.

Между приведенными скоростями контактных точек существует следующая связь [2]

$$\vec{V}^{(2)} - \vec{V}^{(1)} = \vec{V}^{(12)} \Rightarrow \vec{V}^{(2)} = \vec{V}^{(1)} + \vec{V}^{(12)} \quad (1)$$

Скорость движения точки контакта по поверхности накатываемой детали в подвижной системе координат  $x_1 y_1 z_1$  можно записать в следующем виде

$$\vec{V}^{(1)} = \vec{r}_1^\lambda d\lambda/dt + \vec{r}_1^\mu d\mu/dt \quad (2)$$

где  $\vec{r}_1^\lambda, \vec{r}_1^\mu$  – частные производные.

Определим суммарную скорость движения точек контакта как сумму скоростей на накатном ролике и накатываемой детали

$$\vec{u} = \vec{V}^{(1)} + \vec{V}^{(2)} = 2F^{\varphi 1} [\vec{q} \times \vec{l}_1] |N| / [(\vec{r}_1^\lambda \vec{q}) F^\mu - (\vec{r}_1^\mu \vec{q}) F^\lambda + \vec{V}^{(12)}] \quad (3)$$

3. Угол между вектором скорости скольжения и направлением линии контакта на накатываемых поверхностях.

Рассматриваемый угол оказывает существенное влияние на величину усилия накатки, передаваемого на обрабатываемый материал. Чем больше угол между вектором относительной скорости и направлением линии контакта, тем бóльшим будет скольжение сопрягаемых поверхностей. Данный параметр определен в следующем виде:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} v_\tau = & -[F^\mu (f_1'^2(\lambda) + f_2'^2(\lambda)) (\vec{r}_1^\mu \vec{V}^{(12)}) - F^\lambda (\vec{r}_1^\lambda \vec{V}^{(12)})] / \\ & / [(\vec{r}_1^\mu \vec{V}^{(12)}) F^\lambda - (\vec{r}_1^\lambda \vec{V}^{(12)}) F^\mu] \sqrt{f_1'^2(\lambda) + f_2'^2(\lambda)} \end{aligned} \quad (4)$$

При угле  $\nu_\tau$  между вектором относительной скорости  $\vec{V}^{(12)}$  и линией контакта  $\nu_\tau$ , равном  $0,5\pi$ , будет самое благоприятное условие накатки деталей. При угле  $\nu_0 = 0$  данное выражение позволяет найти самые благоприятные условия для обработки валов резанием и самые неблагоприятные условия для накатки валов.

4. Коэффициенты удельных скольжений при накатке осей посредством гиперболоидных роликов.

По величине скоростей скольжения поверхностей ролика и накатываемой детали сложно судить о величине проскальзывания основных поверхностей, а также проскальзывания рабочих поверхностей гиперболоидного обкатного инструмента относительно обрабатываемых цилиндрических поверхностей. Поэтому для оценки износа профиля накатного ролика, а также поверхности обрабатываемой детали будем использовать коэффициенты удельного скольжения. Эти коэффициенты выразим следующим образом, соответственно для накатываемых и раскатываемых деталей и формообразующих профилей накатного инструмента

$$\eta_1 = \frac{V^{(12)}}{V^{(1)}}; \eta_2 = \frac{V^{(12)}}{V^{(2)}} \quad (5)$$

где  $V^{(12)}$  – модуль скорости скольжения поверхности накатываемой оси о поверхность накатного инструмента в точке контакта;

$V^{(1)}, V^{(2)}$  – скорости перемещения точки контакта по поверхности накатываемой тепловозной оси и наружной поверхности гиперболоидного обкатного инструмента в направлении вектора относительной скорости скольжения  $\vec{V}^{(12)}$ .

С использованием этих выражений коэффициенты удельных скольжений можно записать в следующем виде

$$\eta_1 = \frac{[\vec{V}^{(12)}]^2}{(\vec{V}^{(1)}\vec{V}^{(12)})}; \quad (6)$$

$$\eta_2 = [\vec{V}^{(12)}]^2 / (\vec{V}^{(2)} \vec{V}^{(12)}).$$

Подставляя в формулы (1.6) значения  $\vec{V}^{(1)}$  и  $\vec{V}^{(2)}$ , после элементарных преобразований получим

$$\begin{aligned} \eta_1 = \{ & [(\vec{V}^{(12)} \vec{r}_1^\mu) E_1 - (\vec{V}^{(12)} \vec{r}_1^\lambda) F_1] F^\mu - [(\vec{V}^{(12)} \vec{r}_1^\mu) F_1 - (\vec{V}^{(12)} \vec{r}_1^\lambda) G_1] \} F^\lambda / \\ & / F^{\varphi^1} (E_1 G_1 - F_1^2); \\ \eta_2 = 1 + F^{\varphi^1} (E_1 G_1 - F_1^2) / \{ & F^{\varphi^1} (E_1 G_1 - F_1^2) - [(\vec{V}^{(12)} \vec{r}_1^\mu) E_1 - \\ & - (\vec{V}^{(12)} \vec{r}_1^\lambda) F_1] F^\mu - [(\vec{V}^{(12)} \vec{r}_1^\mu) F_1 - (\vec{V}^{(12)} \vec{r}_1^\lambda) G_1] F^\lambda \} \end{aligned} \quad (7)$$

Из полученных выражений с учетом уравнений профиля инструмента [1] выходит

$$\eta_1 = -[(\vec{V}^{(12)} \vec{r}_1^\mu) (f_1'^2 + f_2'^2) F^\mu + (\vec{V}^{(12)} \vec{r}_1^\lambda) F^\lambda] / F^{\varphi^1} (f_1'^2 + f_2'^2) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \eta_2 = 1 - F^{\varphi^1} (f_1'^2 + f_2'^2) / [ & F^{\varphi^1} (f_1'^2 + f_2'^2) \\ & - (\vec{V}^{(12)} \vec{r}_1^\mu) (f_1'^2 + f_2'^2) F^\mu - (\vec{V}^{(12)} \vec{r}_1^\lambda) F^\lambda ] \end{aligned} \quad (9)$$

В формулах (1.8) и (1.9) переменная величина  $\lambda$  при функциях  $f_1$  и  $f_2$  для краткости записи опущена.

Если числитель в выражении (1.8) не равен нулю, то точки контакта с бесконечным значением удельного скольжения  $\eta_1$  определяют из условия:  $F^{\varphi^1} = 0$ .

При  $F^{\varphi^1} \neq 0$  коэффициент удельного скольжения  $\eta_2$  имеет значения, равные бесконечности, при условии

$$F^{\varphi^1} (f_1'^2 + f_2'^2) - (\vec{V}^{(12)} \vec{r}_1^\mu) (f_1'^2 + f_2'^2) F^\mu - (\vec{V}^{(12)} \vec{r}_1^\lambda) F^\lambda = 0. \quad (10)$$

Условия (1.9), (1.10) можно использовать для определения точек контакта с бесконечными удельными скольжениями и таким образом судить об износе профиля накатного ролика и профиля накатываемой оси тепловоза.

5. Приведенная кривизна сопрягаемых поверхностей.

Усилие накатки в значительной мере определяет приведенная кривизна основных поверхностей, сопрягаемых во время контакта ролика с деталью.

Под приведенной нормальной кривизной  $\chi_{\text{пр}}$  обычно понимают разность кривизн касающихся поверхностей в общем нормальном сечении.

Для определения приведенной кривизны поверхностей, сопряженных детали и инструмента, используется выражение

$$\chi_{\text{пр}} = E_1(F^\mu)^2 - 2F_1F^\lambda F^\mu + G(F^\lambda)^2 / \Delta_1 \sqrt{E_1G_1 - F_1^2}, \quad (11)$$

где  $E_1, G_1, F_1$  – коэффициенты первой квадратичной формы;

$F^\lambda, F^\mu$  – частные производные;

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} E_1 & F_1 & (\vec{V}^{(12)} \vec{r}_1^\lambda) \\ F_1 & G_1 & (\vec{V}^{(12)} \vec{r}_1^\mu) \\ F^\lambda & F^\mu & F^{\varphi^1} \end{vmatrix}.$$

Раскрывая определитель и проведя несложные преобразования, получаем:

$$\chi_{\text{пр}} = - \left[ (f_1'^2 + f_2'^2)(F^\mu)^2 + (F^\lambda)^2 \right] / \sqrt{f_1'^2 + f_2'^2} \left[ (f_1'^2 + f_2'^2)F^{\varphi^1} - \right. \\ \left. - F^\lambda(\vec{V}^{(12)} \vec{r}_1^\lambda) - F^\mu(f_1'^2 + f_2'^2)(\vec{r}_1^\mu \vec{V}^{(12)}) \right]. \quad (12)$$

Из выражения (1.12) следует, что поверхностного контакта в рабочем и станочном зацеплении не может быть, если даже инструмент выполнить с рабочей поверхностью, например, цилиндрический или квазигиперболоидный, в зависимости, какая поверхность обрабатывается. Это объясняется тем, что числитель выражения (1.12) никогда не обращается в нуль. Если же знаменатель выражения (1.12) равен нулю, то приведенная кривизна будет равна бесконечности. В точках с такими значениями приведенной кривизны благоприятны условия финишной обработки, поскольку удельное скольжение имеет большие значения.

В заключение можно отметить, что анализ основных геометрико-кинематических параметров накатки деталей локомотивов позволяет оценить процесс износа накатного инструмента, определить усилия накатки, а

главное – найти неблагоприятные условия накатки, которые можно исключить еще на стадии разработки и проектирования накатного инструмента.

### **Список использованных источников**

1. ГОСТ 10411-74 Оси для тепловозов железных дорог узкой колеи. Технические условия. Дата введения: 01.01.1976. Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 29 июля 1974 г. № 1805.
2. Черных, В.В. Теоретические аспекты проектирования гиперболоидных накатников / В.В. Черных, В.А. Витренко // Вестник Луганского гос. ун-та им. В. Даля [Научн. журнал]. – Луганск: Изд-во Луг. гос. ун-та им. В. Даля, 2021. – № 11 (53). – С. 162-165.
3. Дусев, И.И. Связь между геометрическими и кинематическими параметрами высшей кинематической пары / И.И. Дусев // Изв. Северо-Кавказского научного центра высшей школы. – 1973. – № 3. – С. 28-32.
4. Браславский, В.М. Технология обкатки крупных деталей роликами / В.М. Браславский. – М.: Машиностроение, 1975. – 159 с.

---

*Chernykh V.V., candidate of technical Sciences, FSPEI HE Lugansk Vladimir Dahl State University*

### **DETERMINATION OF MAIN GEOMETRIC AND KINEMATIC PARAMETERS OF ROLLING LOCOMOTIVE PARTS USING HYPERBOLOID TOOL**

*Abstract: The article is devoted to determining the main geometric and kinematic parameters of rolling locomotive parts using a hyperboloid tool. The process of rolling parts depends on these parameters and can be predicted even at the stage of tool manufacturing. This makes it possible to significantly reduce the volume of expensive experimental studies and predict the performance of the tool at the stage of its manufacture.*

*Keywords: rolling roller, single-wall hyperboloid, sliding speed, contact line, reduced curvature*