

ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

691.795.2

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ РЕЛЬСОВ В ПУТИ

Д-р техн. наук, проф. В.А. АКСЕНОВ, канд. техн. наук, доц. А.С. ИЛЬИНЫХ

Представлена новая методика оценки эффективности технологического процесса шлифования рельсов в пути с учетом эксплуатационных свойств обработанной поверхности.

The new technique of efficiency estimation of a technological process in rails grinding in view of operation properties of the treated surface is presented.

Шлифование — современный технологический процесс восстановления служебных свойств рельсов в пути. Данный вид обработки рельсов применяется для удаления дефектов на поверхности головки рельсов и формирования требуемой геометрии профиля. При этом рельсошлифовальный поезд делает несколько проходов по одному участку пути. Стремление снизить число проходов объясняет существующий подход к выбору режимов шлифования и параметров абразивного инструмента, основанный на повышении производительности технологического процесса.

Эффективность технологического процесса должна определяться не только производительностью, но и эксплуатационными свойствами поверхности катания рельсов после механической обработки. Долговечность рельсов в значительной степени зависит от качества поверхности после шлифования. В свою очередь, параметры используемого абразивного инструмента и режимы механической обработки влияют на показатели качества обрабатываемой поверхности. Таким образом, оптимальные параметры абразивного инструмента и режимы его работы необходимо выбирать с учетом эксплуатационных свойств поверхности головки рельсов после шлифования. Выбранный инструмент и режимы его работы должны обеспечивать оптимальное сочетание производительности шлифования, величины эксплуатационного ресурса рельсов и затрат на эксплуатацию рельсошлифовального поезда.

Определение оптимального режима обработки рельсов на рельсошлифовальных поездах типа РШП-48 состоит в том, чтобы на основе физического состояния рельсов на момент их восстановления, параметров режущего инструмента, физических законов их взаимодействия в процессе обработки, кинематических и динамических возможностей оборудования, на котором будет производиться обработка, назначить такие глубину резания и подачу, которые обеспечат формирование поверхности катания рельса в соответствии с техническими условиями и его эксплуатационными характеристиками. При этом частота вращения шлифовального круга принимается постоянной.

Функциональные связи между параметрами и показателями технологической операции являются техническими ограничениями режима резания и в совокупности

составляют математическую модель оптимального режима обработки. Некоторые из технических ограничений снижают эффективность процесса обработки, поэтому их необходимо устранять путем внедрения различных технологических, конструктивных и организационно-производственных мероприятий. Ограничения, влияние которых на режимы торцового шлифования в настоящее время недостаточно изучено, не включаются в математическую модель, а учитываются при экспериментальной проверке запроектированных режимов.

Ниже рассмотрены более подробно технические ограничения, влияющие на режимы обработки при шлифовании, в которых учтены и результаты исследований по влиянию качественных показателей обработанной поверхности на эксплуатационные свойства рельсов.

Ограничение 1. Устанавливает взаимосвязь расчетной величины подачи с подачей, допускаемой кинематикой рельсошлифовального поезда. Расчетная величина подачи не может быть меньше, чем минимальная подача поезда, и больше, чем максимальная подача, т.е. должны выполняться условия

$$S \geq S_{\min}, \quad (1)$$

$$S \leq S_{\max}. \quad (2)$$

Ограничение 2. Устанавливает взаимосвязь расчетных величин подачи, частоты вращения шлифовального круга и припуска на обработку с режимами, допускаемыми требованиями, предъявляемыми к шероховатости обработанной поверхности. Поэтому имеет место условие

$$R_{z_{\max}} \geq R_z \geq R_{z_{\min}}, \quad (3)$$

где R_z — шероховатость обработанной поверхности,

$$R_z = 840,95 \frac{S^{0,888} t^{0,402}}{n^{0,433}}, \quad (4)$$

здесь S — подача (скорость поезда), t — глубина резания, n — частота вращения шлифовального круга.

Подставив (4) в неравенство (3) и решив его относительно параметров режима шлифования, получим выражения, ограничивающие процесс механической обработки по шероховатости поверхности,

$$S^{0,888} t^{0,402} \leq \frac{R_{z_{\max}} n^{0,433}}{840,95}, \quad (5)$$

$$S^{0,888} t^{0,402} \geq \frac{R_{z_{\min}} n^{0,433}}{840,95}. \quad (6)$$

Максимальное и минимальное значения шероховатости поверхности R_z устанавливаются в соответствии с требованиями к эксплуатационным характеристикам (трещиностойкость, износостойкость, контактно-усталостная прочность) рельсов с проведенными испытаниями и нормативно-техническими требованиями.

Ограничение 3. Устанавливает взаимосвязь расчетных величин подачи, частоты вращения шлифовального круга и припуска на обработку с режимами, допускаемыми тре-

бованиями, предъявляемыми к степени упрочнения поверхностного слоя обработанного металла. Это ограничение отражается неравенством

$$H_{200}^{\max} \geq H_{200} \geq H_{200}^{\min}, \quad (7)$$

где H_{200H} — микротвердость поверхностного слоя,

$$H_{200} = 1,369 \frac{H_{200H}^{0,987} t^{0,02} S^{0,0159}}{n^{0,0185}}, \quad (8)$$

где H_{200H} — исходная микротвердость поверхности рельса.

Подставив в неравенство (7) значение H_{200} из (8) и решив его относительно элементов режима резания t и S , получим выражения для третьего технического ограничения

$$S^{0,0159} t^{0,02} \leq \frac{H_{200}^{\max} n^{0,0185}}{1,369 H_{200H}^{0,987}}, \quad (9)$$

$$S^{0,0159} t^{0,02} \geq \frac{H_{200}^{\min} n^{0,0185}}{1,369 H_{200H}^{0,987}}. \quad (10)$$

Пороговые значения микротвердостей в неравенствах (9) и (10) определяются также в соответствии с требованиями к эксплуатационным характеристикам рельсов.

Ограничение 4. Устанавливает взаимосвязь между режимами шлифования и мощностью двигателя привода шлифовального круга. Мощность шлифования не должна превышать номинальную мощность двигателя N с учетом коэффициента полезного действия привода η , т.е. допустимая мощность шлифования будет

$$N \leq N_{\text{ин}} \eta, \quad (11)$$

где

$$N = \frac{8,06(R+r)}{2R(R-r)} V_3^{0,87} V_c^{1,4} v_{\text{кр}}^{0,6} Q_{\text{д}}^{0,5} S_{\text{д}}, \quad (12)$$

здесь $S_{\text{д}}$ — площадь контакта круга с обрабатываемой деталью (определяется в зависимости от угла наклона шлифовального круга); $v_{\text{кр}}$ — скорость шлифовального круга на периферии; V_3 — объем содержания зерна в шлифовальном круге, V_c — объем содержания связки в шлифовальном круге, %; $Q_{\text{д}}$ — интенсивность шлифования.

$$Q_{\text{д}} = tSB, \quad (13)$$

(B — ширина дорожки шлифования).

Решая неравенство (11) относительно режимов шлифования t и S , с учетом (12) и (13) получим четвертое техническое ограничение

$$t^{0,5} S^{0,5} \leq \frac{2N_{\text{дв}} \eta R(R-r)}{8,06(R+r) V_3^{0,87} V_c^{1,4} S_{\text{д}} v_{\text{кр}}^{0,6} B^{0,5}}. \quad (14)$$

Ограничение 5. Устанавливает взаимосвязь по жесткости привода шлифовального круга. Проверка по условию жесткости осуществляется через допустимую нормальную составляющую силы резания P_y , величина которой в виде максимально допустимой осевой нагрузки указывается в паспорте.

$$P_y \leq P_{\text{пасп}}, \quad (15)$$

$$P_y = 340V_3^{0,8}V_c^{1,06}v_{\text{кр}}^{0,1}Q_D^{0,22}S_D. \quad (16)$$

Подставив (16) в неравенство (15) и решив относительно параметров режима шлифования, получим неравенство, ограничивающее процесс шлифования по жесткости привода,

$$t^{0,22}S^{0,22} \leq \frac{P_{\text{пасп}}}{340V_3^{0,8}V_c^{1,06}S_D v_{\text{кр}}^{0,11}B^{0,22}}. \quad (17)$$

Ограничение 6. Устанавливает зависимость размерного износа круга от режимов шлифования, а также геометрических и структурных параметров шлифовального круга, т.е. имеет место неравенство

$$\delta_a \leq \delta_{\text{доп}}. \quad (18)$$

Интенсивность износа шлифовального круга δ_a [мкм/мин] описывается выражением

$$\delta_a = \frac{543Q_D^{1,42}v_{\text{кр}}^{0,09}}{\pi(R^2 - r^2)V_3^{0,19}V_c^{2,76}}. \quad (19)$$

Подставив в неравенство (18) значение δ_a из (19) и решив его относительно режимов резания, получим выражение для шестого технического ограничения в следующем виде:

$$t^{1,42}S^{1,42} \leq \frac{\delta_{\text{доп}}\pi(R^2 - r^2)V_3^{0,19}V_c^{2,76}}{543v_{\text{кр}}^{0,09}B^{1,42}}. \quad (20)$$

На основе рассмотренных неравенств и уравнений должен быть выбран рациональный режим обработки в рамках заданных ограничений.

Для правильного выбора рационального режима обработки большое значение имеет выбор критерия оптимальности, т.е. того показателя, на основании которого оценивается принятое решение. В качестве такого показателя в наибольшей степени подходит производительность обработки, а за оценочную функцию можно принять уравнение машинного времени на единицу длины резания

$$t_0 = \frac{1}{tS}. \quad (21)$$

Из уравнения оценочной функции (21) видно, что она будет наименьшей, когда произведение tS будет наибольшим. Задача сводится к тому, что необходимо найти такие числа глубины резания t и подачи S , которые отвечали бы всем без исключения неравенствам технических ограничений и произведение которых было бы максимальным. Для решения этой задачи применим метод линейного программирования.

Для анализа математической модели процесса механической обработки с использованием метода линейного программирования необходимо все неравенства технических ограничений и уравнение оценочной функции преобразовать в линейные формы.

Преобразовав неравенства технических ограничений (1), (2), (5), (6), (9), (10), (14), (17), (20) и оценочную функцию (21) в линейные формы, получим систему ограничений следующего вида:

$$\begin{cases} x_2 \geq b_1 \\ x_2 \leq b_2 \\ 0,402x_1 + 0,888x_2 \leq b_3 \\ 0,402x_1 + 0,888x_2 \geq b_4 \\ 0,02x_1 - 0,0159x_2 \leq b_5 \\ 0,02x_1 - 0,0159x_2 \geq b_6 \\ 0,5x_1 + 0,5x_2 \leq b_7 \\ 0,22x_1 + 0,22x_2 \leq b_8 \\ 1,42x_1 + 1,42x_2 \leq b_9 \end{cases} \quad (22)$$

$$f_0 = (x_1 + x_2)_{\max} \quad (23)$$

Решение системы линейных неравенств (22) совместно с оценочной функцией (23) позволяет рассчитать уточненные, оптимальные режимы шлифования, обеспечив требуемый уровень шероховатости поверхности и микротвердости поверхностного слоя головки рельса, а следовательно, повышенные эксплуатационные характеристики.

Полученная математическая модель (22) представляет собой универсальную модель процесса резания металлов для всех схем плоского шлифования торцом круга и может быть использована для расчета режимов шлифования и их оптимизации, а также позволяет управлять уровнем эксплуатационных свойств рельсов в ходе их ремонта.

Для оценки эффективности процесса шлифования рельсов предложен критерий, связывающий долговечность рельсов после шлифования с режимами обработки и параметрами абразивного круга, который имеет следующий вид:

$$K_{\text{Эф}} = \frac{(K_N - 1)C_{\text{к.р.}} - \sum_{i=1}^m (C_i \tau_i^{\text{KM}})}{\sum_{i=1}^m \tau_i^{\text{KM}}}, \quad (24)$$

где K_N — коэффициент увеличения долговечности рельсов после шлифования; $C_{\text{к.р.}}$ — стоимость капитального ремонта 1 км пути; m — число воздействий на рельсы шлифованием за время эксплуатации от укладки в путь до смены; τ_i^{KM} — время, приходящееся на шлифование одного километра для i -го воздействия с учетом подготовительно-заключительных работ и перенастройки оборудования между проходами;

$$K_N = \frac{N_y^{\text{шл}}}{N} \quad (25)$$

($N_k^{\text{шл}}$ — количество циклов до смены рельса по причине усталостного разрушения, N — количество циклов до смены рельсов без применения шлифования); C_i — себестоимость 1 часа обработки рельсов в пути шлифованием для i -го воздействия,

$$C_i = \sum_{j=1}^p C_j \quad (26)$$

(C_j — j -ая компонента себестоимости 1 часа работы рельсошлифовального поезда, p — количество элементов затрат).

При решении практических задач некоторая часть из слагаемых элементов себестоимости шлифования рельсов в пути для различных вариантов не изменяется. Переменная часть себестоимости определяется по формуле

$$C_{\Pi} = C_{кр} \left(\frac{Q}{K_{ш}} + (k-1) \frac{Q^{\Pi}}{K_{ш}^{\Pi}} \right) / \tau^{KM}, \quad (27)$$

где $C_{кр}$ — стоимость единицы объема шлифовального круга; k — требуемое количество технологических проходов на одном обрабатываемом участке; Q , Q^{Π} — объем снимаемого металла соответственно на последнем и предварительных проходах; $K_{ш}$, $K_{ш}^{\Pi}$ — средний коэффициент шлифования соответственно на последнем и предварительных проходах, равный отношению объемов снятого металла к объему израсходованного абразивного материала,

$$k = (t_{тр} - t) / t^{\Pi} \quad (28)$$

($t_{тр}$ — величина припуска обработки головки рельса шлифованием; t — припуск, снимаемый на последнем проходе рельсошлифовального поезда; t^{Π} — припуск, снимаемый на предварительных проходах).

Величина $t_{тр}$ принимается в зависимости от толщины наклепанного слоя головки рельса и требуемой геометрии ремонтного профиля. Толщина наклепанного слоя зависит от наработки рельса после последнего воздействия шлифованием. Ремонтный профиль выбирается в зависимости от износа h рельса

$$h = \frac{N}{N_{и}}, \quad (29)$$

где N — число циклов после последнего воздействия; $N_{и}$ — число циклов до износа на 1 мм;

$$\tau^{KM} = \tau / L, \quad (30)$$

здесь τ — время «окна», L — длина участка, обрабатываемого за время окна,

$$L = \tau_{шлиф} / \left(\frac{1}{v} + k \frac{1}{v^{\Pi}} \right), \quad (31)$$

где v , v^{Π} — скорость поезда соответственно на последнем и предварительных проходах, $\tau_{шлиф}$ — время, затрачиваемое на процесс шлифования.

$$\tau_{шлиф} = \tau - (\tau_{под} + \tau_{пром} (k-1) + \tau_{зак}), \quad (32)$$

здесь $\tau_{под}$ — время подготовительных работ рельсошлифовального поезда на перегоне (транспортировка к месту работ, приведение машины в рабочее положение, настройка рабочего оборудования); $\tau_{пром}$ — продолжительность работы, связанной с подготовкой рельсошлифовального поезда в промежутке между технологическими переходами (перенастройка рабочего оборудования); $\tau_{зак}$ — время заключительных работ рельсошлифовального поезда на перегоне (приведение машины в транспортное положение, выезд с перегона).

Таким образом, для оценки эффективности процесса шлифования рельсов важна связь между режимами резания (скорости поезда V , мощности резания P , частоты вращения шлифовального круга n) и величиной снимаемого припуска, коэффициентом шлифова-

ния, количеством циклов до усталостного разрушения рельсов и до износа рельсов на 1 мм. Шлифование рельсов проводится во время «окна» в движении поездов, когда нельзя заменить изношенный абразивный инструмент. Чтобы определить, нужно ли заменить шлифовальный круг до выезда рельсошлифовального поезда к участку работ в «окно», необходимо иметь связь стойкости инструмента T с режимами механической обработки и параметрами абразивного инструмента. Также исходными данными к расчету является график шлифования рельсов в пути, время «окна» в движении поездов.

Разработаны методика и алгоритм расчета оптимальных режимов шлифования рельсов в пути на основе полученных зависимостей с целью обеспечения повышенной эффективности технологического процесса (рис. 1).

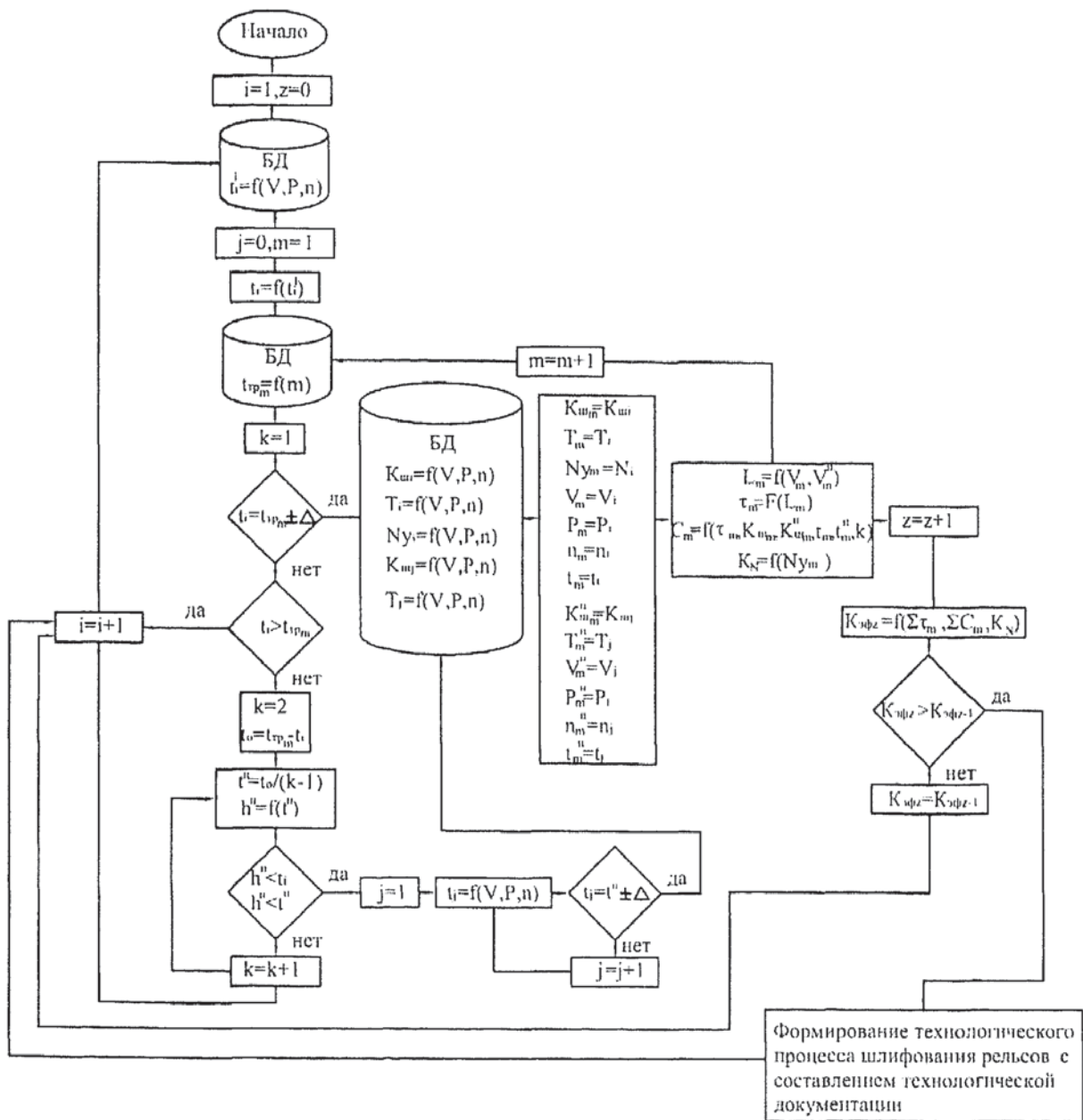


Рис. 1. Алгоритм расчета оптимальных режимов шлифования на основе обеспечения повышенной эффективности технологического процесса

Данная методика позволяет рассчитать максимальный коэффициент эффективности $K_{\text{эф}}$ для каждого из предложенных шлифовальных кругов. После этого выбирается инструмент, параметры которого обеспечили максимальное значение $K_{\text{эф}}$.

Предложенная методика оценки эффективности технологического процесса шлифования рельсов в пути создает основу для разработки рекомендаций по выбору режимов механической обработки и параметров инструмента с учетом эксплуатационных свойств поверхности катания рельсов после механической обработки.