

точным, чем аналитическое решение, полученное в первом цикле.

Максимальные продольные напряжения, полученные за два цикла, отличаются от напряжений, полученных по методу конечных элементов менее чем на 2 % (задача 1, сечения 1 и 7; задача 2, сечения 3 и 5). Близость результатов во втором цикле при аналитическом решении и результатов, полученных по методу конечных элементов, говорит о приближении к точному решению.

Заключение

1. В среде *MathCAD* был реализован алгоритм расчета на прочность слоистых балок, основанный на итерационном способе последовательного удовлетворения условиям равновесия и совместности деформаций. По данному алгоритму решено две задачи.

2. Те же задачи решены методом конечных элементов с использованием программного комплекса *Midas Civil*. Приведены результаты.

3. Учет сдвиговых и поперечных деформаций с помощью метода итераций повысил точность решения на 12 %.

4. Максимальные продольные напряжения, полученные за два цикла, отличаются от напряжений, полученных по методу конечных элементов менее чем на 2 %.

Библиографический список

1. **Итерационный** метод расчета балок с изменяющимися по высоте характеристиками / Б. М. Аллахвердов // Исследования по механике материалов и конструкций : сб. научн. статей. – Вып. 12. – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2002. – С. 30–34.

2. **Теория** упругости / М. М. Филоненко-Бородич. – М. : Гос. изд-во физико-механической литературы, 1959. – 364 с.

3. **Прикладная** механика твердого деформируемого тела. Т. 2 / А. П. Филин. – М. : Наука ; Главная редакция физико-математической литературы, 1978. – С. 616.

УДК 621.941.01: 629.4.027.4

Д. А. Потахов

Петербургский государственный университет путей сообщения

МЕТОД ПОДОБИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ КОЛЕСНЫХ ПАР ПОВЫШЕННОЙ ТВЕРДОСТИ

Представлена методика расчета параметров и режимов процесса обточка железнодорожных колес повышенной твердости с использованием метода подобия. Даны рекомендации по выбору рациональных режимов резания.

цельнокатаное колесо, колесная пара, режущий инструмент, восстановление поверхности катания, режимы резания.

Введение

Важнейшим требованием современного машиностроения к используемому станочному и инструментальному оборудованию

является обеспечение установленной точности и качества обработанной поверхности катания колесной пары (КП) при требуемой производительности труда. Производительность процесса механической обработки ко-

лесных пар определяется использованием существующего оборудования, оптимальных режимов резания и геометрии режущего инструмента [1].

Использование современных методов исследования процесса резания, таких как метод подобия, теория размерностей и других, позволяет получить обобщенные теоретические зависимости, достаточно точно выражающие физику процесса. Это дает возможность, оперируя безразмерными критериями, давать оценку процессу резания, не прибегая к эксперименту.

Значительным достижением науки о резании материалов является установление факта существования так называемых оптимальных температур резания θ_0 , работа при которых обеспечивает инструменту наибольшую размерную стойкость, а детали – наиболее высокую точность и благоприятные свойства металла ее поверхностного слоя. Установлено также, что при резании с оптимальной температурой силы резания имеют стабильно минимальные значения, а износ инструмента и шероховатость обработанной поверхности – минимальны [2]. Важным является то обстоятельство, что, меняясь при переходе от одной пары «резец – деталь» к другой, оптимальная температура не зависит от различных переменных технологических факторов, таких как структура и свойства обрабатываемого материала, геометрические параметры режущего инструмента и т. п. Многочисленными исследованиями доказано, что для каждой новой пары «инструментальный материал – обрабатываемый материал» существует свое вполне определенное значение оптимальной температуры [3].

На основании вышесказанного можно сделать вывод о целесообразности обточки профиля поверхности катания КП с оптимальной температурой, что позволит снизить влияние состояния поверхности профиля катания на период стойкости инструмента, придать обработанной поверхности требуемые точность и качество и повысить эффективность процесса обточки КП за счет повышения эффективности работы режущего инструмента.

Ниже рассмотрена методика расчета параметров и режимов процесса обточки железнодорожных колес с использованием метода подобия [3]. При разработке методики использовались работы С. С. Силина [4, 5, 6] и других авторов [7], а также зависимости, полученные в результате экспериментов. Использование методики позволяет не только оценивать параметры процесса, но и определять оптимальные для конкретных условий восстановления профиля режимы резания и соответствующие им теплофизические, контактные и другие параметры.

1 Расчет основных характеристик процесса восстановления профиля поверхности катания колесной пары

1.1 Толщина и ширина среза

Для расчета различных параметров процесса восстановления профиля катания использовали следующие уравнения.

На все механические и тепловые процессы, происходящие в зоне резания, большое влияние оказывает сечение среза, которое в общем виде выражается формулой:

$$F = a_1 b_1 = st,$$

где a_1 и b_1 – толщина и ширина среза, м; s и t – подача и глубина резания, м.

При свободном резании толщина и ширина среза определяются известными формулами [3]:

$$a_1 = s \sin \varphi; \quad b_1 = \frac{t}{\sin \varphi},$$

где φ – главный угол в плане, рад.

При обточке железнодорожных колес на колесотокарных станках в качестве режущего инструмента широко используется призматическая пластина с радиусом при вершине 4 мм, радиусом скругления режущих кромок ~0,04 мм и с лункой. При ее работе снятие припуска осуществляется одновременно радиусной и прямолинейной частями главной

режущей кромки и в этом случае при резании толщина a_1 , ширина среза b_1 и периметр рабочих участков режущих кромок b определяются по следующим формулам [3]:

$$a_1 = \frac{s}{c'} \sin \arctg \times \times \frac{c'}{[1 - a'(1 - \cos \varphi)] \operatorname{ctg} \varphi + a'(\sin \varphi + b')}; \quad (1)$$

$$b_1 = \frac{c't}{\sin \arctg \frac{c'}{[1 - a'(1 - \cos \varphi)] \operatorname{ctg} \varphi + a'(\sin \varphi + b')}}; \quad (2)$$

$$b = \frac{t}{\sin \varphi} \times \times \left[1 - a' \left(1 - \cos \varphi - \frac{\varphi}{\sin \varphi} - \frac{\arccos \sqrt{1 - b'^2}}{\sin \varphi} \right) \right], \quad (3)$$

где $a' = \frac{r}{t}$; $b' = \frac{s}{2r}$; $c' = 1 - a'(1 - \sqrt{1 - b'^2})$.

1.2 Тангенс угла наклона условной плоскости сдвига

Тангенс угла наклона условной плоскости сдвига вычисляются по формуле [3]:

$$B = \operatorname{tg} \beta_1 = \frac{mPe^n}{F^k D^p (1 - \sin \gamma)^q}, \quad (4)$$

где Pe , F и D – безразмерные комплексы (критерии подобия), а именно:

$Pe = \frac{va_1}{a}$ – критерий Пекле, характеризующий степень влияния режимных условий процесса va_1 по сравнению с влиянием теплофизических свойств обрабатываемого материала a ;

$F = \frac{\lambda_p}{\lambda} \beta_\varepsilon$ – критерий, отражающий влияние геометрии инструмента и отношения теплопроводности инструментального и обрабатываемого материалов;

$D = \frac{a_1}{b_1}$ – критерий, характеризующий геометрию сечения среза.

Входящие в критерии Pe , F и D и в уравнение (4) параметры имеют следующие смысл и размерность:

v – скорость резания, м/с;

λ_p и λ – коэффициенты теплопроводности инструментального и обрабатываемого материалов, Дж/(м·с·град);

$a = \frac{\lambda}{c_p}$ – коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала, м²/с;

c_p – удельная объемная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(м³·град);

$\beta = \frac{\pi}{2} - (\alpha + \gamma)$ – угол заострения резца, рад;

α и γ – задний и передний углы резца, рад;

$\varepsilon = \pi - (\varphi + \varphi_1)$ – угол при вершине резца в плане, рад;

φ и φ_1 – главный и вспомогательный углы резца в плане, рад;

m и n , k , p , q – коэффициент и показатели степени [3], зависящие от условий процесса резания.

1.3 Длина контакта стружки с инструментом и инструмента с деталью

Длина контакта стружки с инструментом и инструмента с деталью вычисляется по формуле:

$$\frac{l}{a_1} = k_0 \left(\frac{\cos \gamma + \sin \gamma}{B} - \cos \gamma + \sin \gamma \right)$$

$$\text{и } \frac{\Delta}{\rho_1} = 1,25 \sqrt{\frac{B}{\sin \alpha}} + \frac{\delta}{\rho_1},$$

где l и Δ – соответственно длины контактов на передней и задней поверхностях инструмента, м;

ρ_1 – радиус скругления режущей кромки инструмента, м;

δ – величина фаски износа на задней поверхности, м;

$k_0 = \frac{1}{m_1(1,5 - 0,5m_1^2)}$ – коэффициент, изменяющийся в пределах от 1 до 3 и зависящий от отношения

$$m = \frac{l_0}{l},$$

где l_0 – длина зоны пластического контакта.

При $m = 0,25$ $k = 2,9$, при $m = 0,5$ $k = 1,45$, при $m = 1$ $k = 1$. Отношение m , в свою очередь, определяется характером изменения касательных напряжений на контактной площадке передней поверхности инструмента.

1.4 Средние коэффициенты трения на передней поверхности инструмента

Средние коэффициенты трения на передней поверхности инструмента определяются по формуле:

$$\mu = \frac{\cos \gamma + \sin \gamma - B(\cos \gamma - \sin \gamma)}{\cos \gamma - \sin \gamma + B(\cos \gamma + \sin \gamma)}.$$

1.5 Температура резания при восстановлении профиля

Температура в плоскости сдвига:

$$\theta_A = \frac{\tau_p}{c_p B} \operatorname{erf} \sqrt{\frac{PeB}{4}},$$

где $\operatorname{erf} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-x^2} dx$ – интеграл вероятности, функция Крампа; τ_p – сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу, Н/м².

Средняя контактная температура передней поверхности инструмента:

$$\bar{\theta}_n = \theta_A (1 + 0,73 \psi_M),$$

$$\text{где } \psi_M = \frac{0,735 Pe^{0,625} B^{1,075}}{F^{0,25} D^{0,075}} \rightarrow \frac{[\cos \gamma + \sin \gamma - B(\cos \gamma - \sin \gamma)]^{0,55}}{\operatorname{erf} \sqrt{\frac{PeB}{4}} (\cos \gamma + B \sin \gamma)^{0,625}}.$$

Средняя контактная температура задней поверхности:

$$\bar{\theta}_3 = 0,5 \theta_A \left(1 + \frac{\sin^{0,25} \alpha}{\sqrt{PeEB}^{1,25}} + 1,72 \psi_N \right),$$

$$\text{где } \psi_N = \frac{0,465 B^{1,275} Pe^{0,625} E^{0,55} \cos \alpha}{F^{0,25} D^{0,075} \sin^{0,275} \alpha \operatorname{erf} \sqrt{\frac{PeB}{4}}},$$

$$E = \frac{\rho_1}{a_1}.$$

Температура резания при восстановлении профиля:

$$\theta = \frac{0,95 \tau_p Pe^{0,375} E^{0,055} \operatorname{erf}^{0,4} \sqrt{\frac{PeB}{4}}}{c_p B^{0,625} F^{0,15} D^{0,045} (1 - \sin \gamma)^{0,65} \sin^{0,03} \alpha}.$$

Оптимальная температура резания при восстановлении профиля колеса:

$$\theta = 0,6 \theta_{\text{пл}} \left(\frac{\lambda}{\lambda_p} \right)^{0,12} \times \left(\frac{c_p}{(c_p)_p} \right)^{0,2} \frac{(\tau_p / \sigma_B)^{0,27}}{(1 + \delta)^{0,05}}, \quad (5)$$

где $\theta_{\text{пл}} = 1490$ °С – температура плавления кобальта; σ_B и δ – предел прочности и относительное удлинение при растяжении образцов из обрабатываемого материала.

1.6 Силы резания при восстановлении профиля

Тангенциальная составляющая равнодействующей силы резания:

$$P_z = \tau_p a_1 b_1 \left(1 + \frac{1}{B} + 0,625 EM \sqrt{\frac{B}{\sin \alpha}} \cos \alpha \right),$$

где $M = b/b_1$ – отношение периметра рабочих участков режущих кромок к ширине среза.

Осевая и радиальная составляющие равнодействующей силы резания:

$$P_y = \tau_p a_1 b_1 \times \left(\frac{1}{B} - 1 + \frac{0,625 EM}{\mu_1} \sqrt{\frac{B}{\sin \alpha}} \cos \alpha \right) \cos \varphi;$$

$$P_x = \tau_p a_1 b_1 \times \left(\frac{1}{B} - 1 + \frac{0,625EM}{\mu_1} \sqrt{\frac{B}{\sin \alpha}} \cos \alpha \right) \sin \varphi,$$

где μ_1 – коэффициент трения на задней поверхности инструмента.

1.7 Скорость резания

Основными параметрами обрабатываемости резанием сталей и сплавов являются:

– скорость резания v , характеризующая процесс обработки;

– относительный линейный износ инструмента $h_{л.}$, определяющий расход инструментального материала.

Для этих параметров скорость резания v [3] в любом диапазоне ее изменения определяется по выражению:

$$v = \frac{ak^2 E^{0,2} A^2}{4a_1 \sin^{0,1} \alpha} \cdot \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2,65 \Gamma D^{0,3}}{k^2 A E^{0,025} \sin^{0,065} \alpha}} \right]^2,$$

где $A = \frac{a_1 b_1 c p \theta}{P_z}$ – энергетический критерий подобия, определяющийся уровнем температуры резания θ и силы резания P_z ; k – коэффициент, учитывающий погрешность замены Pe [3].

1.8 Оптимальная скорость резания

Для оптимальной скорости резания v_0 при резании с оптимальной температурой θ_0 [3]:

$$v_0 = \frac{k^2 \lambda c p a_1 b_1^2 E^{0,2}}{4 \sin^{0,1} \alpha} \left(\frac{\theta}{P_{z \min}} \right)^2 \times \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2,65 \lambda_p \beta \epsilon \left(\frac{a_1}{b_1} \right)^{0,3} P_{z \min}}{k^2 a_1 b_1 \lambda c p E^{0,025} \sin^{0,065} \alpha \theta_0}} \right]^2, \quad (6)$$

где θ_0 – оптимальная температура резания, определенная по формуле (5) и данных [2, 3, 7].

Сила P_z при резании с оптимальной температурой определяется по формуле [2]:

$$P_{z \min} = \frac{\tau_p a_1 b_1 c_0 E^{n_0} (1 - 0,45 \sin \gamma) M^{0,04}}{\sin^{0,14} \alpha} H, \quad (7)$$

где $c_0 = 3,65$; $n_0 = 0,125$ при $E \leq 0,05$;
 $c_0 = 5,31$; $n_0 = 0,25$ при $0,05 \leq E \leq 0,1$;
 $c_0 = 7,60$; $n_0 = 0,40$ при $E \geq 0,1$.

Критерий Пекле Pe при резании с оптимальной температурой определяется по формуле [3]:

$$Pe = \frac{(k c p \sin^{0,1} \alpha \theta_0)^2}{4 c_0^2 E^{2(n_0 - 0,1)} (1 - 0,45 \sin \gamma) \tau_p^2} \times \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2,65 F D^{0,3} c_0 E^{n_0} (1 - 0,45 \sin \gamma) \tau_p}{k^2 c p \theta_0 \sin^{0,2} \alpha}} \right]^2. \quad (8)$$

1.9 Относительный линейный износ, определяющий расход инструментального материала

Относительный линейный износ:

$$h_{л.о} = 3,5 \cdot 10^{-10} \left(\frac{G_0}{1 + \delta} \right)^{10} \times \left(\frac{\tau_p}{\sigma_B} \right)^2 \left(\frac{v_0 a_1}{v'_0 a'_1} \right)^{78,5(\theta_0/\theta_H)^{6,3} - 2}. \quad (9)$$

Для текущего относительного линейного износа:

$$h_{л.} = h_0 \left(\frac{v_0}{v} \right)^{0,018} \left(\frac{\theta_{л.}}{\theta_0} \right)^6 \text{ при } v \leq v_0;$$

$$h_{л.} = h_0 \left(\frac{v_0}{v} \right)^{0,1} \cdot \left(\frac{\theta_{л.}}{\theta_0} \right)^5 \text{ при } v \geq v_0,$$

где $G_1 = \frac{c p \theta_0}{\sigma_{\Pi}}$; v'_0 и a'_1 – оптимальная скорость резания и толщина среза при подаче $S = 1 \cdot 10^{-3}$ м; σ_{Π} – предел прочности на сжатие инструментального материала, Н/м².

2 Расчет параметров, характеризующих качество процесса восстановления профиля поверхности катания колесной пары

Высота неровностей R_z определяется выражением:

$$R_z = \frac{c_1 s^2}{8rA^n},$$

где c_1 и n – численные величины [3]; r – радиус при вершине резца в плане, м; и где критерий подобия A определяется по уравнению [3]:

$$\frac{1}{A} = \frac{P_z}{c r a_1 b_1 \theta} = \frac{k E^{0,1}}{\sqrt{Pe \sin^{0,05} \alpha}} + 0,6625 \frac{F D^{0,3} E^{0,175}}{Pe \sin^{0,165} \alpha}.$$

При работе с оптимальными температурами θ_0 приближенно можно принимать:

$$R_z = \frac{s^2}{8r}. \quad (10)$$

Глубина наклепа h_c [3]:

$$\frac{h_c}{s} = 0,063 \left(\frac{\tau_p}{\sigma_t} \right) \frac{\text{tg}^{1,7} i \text{tg}^{0,5} \eta K_1^{-1} m}{(B \cdot \text{tg}^{0,81} \eta)^{2,1} \cdot \text{tg}^{0,19} \eta}, \quad (11)$$

где m – безразмерный коэффициент, зависящий от геометрических параметров инструмента и элементов сечения среза [3, 6]; i и η – соответственно угол наклона силы стружкообразования к условной плоскости сдвига и угол схода стружки [6]; σ_t – предел текучести обрабатываемого материала, Н/м²; $K_1 = 1$ при $K_2 > 1$, $K_1 = K_2$ при $K_2 < 1$;

$$K_2 = 0,76 \left(\frac{\tau_p}{\sigma_t} \right) \frac{a_1 \text{tg}^{1,2} i}{\Delta B^{1,3}} \text{tg} \left[\frac{\pi}{2} \mu_1 \cdot \frac{\sigma_t}{\tau_p} \right].$$

Степень наклепа выражается через его глубину:

$$N = 2,08 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\theta_n}{\theta_0} \right)^{0,72} \cdot \frac{h_c}{h_0}, \quad (12)$$

где $h_0 = 1-10^{-6}$ м – фиксированная (постоянная) глубина наклепа, м.

Для суммарных остаточных напряжений, подробно рассмотренных в работах [3, 7], возникающих при работе с оптимальными температурами θ_0 :

$$\frac{\sigma}{\sigma_t} = \frac{0,5 Pe^{0,3} E^{1,35} B_0^2 M^{1,07} \left(\frac{c p}{\beta_g E_g} \right)^{0,27}}{\sin^{0,7} \alpha \cdot \sin^{0,05} \alpha},$$

где β_g и E_g – коэффициент линейного расширения и модуль упругости обрабатываемого материала, 1/°С и Н/м² соответственно.

3 Последовательность расчета режимов восстановления профиля колеса с учетом производительности и качества обработки колесной пары

А. Определяется значение оптимальной температуры резания θ_0 для конкретной пары «резец – деталь» по формуле (5).

Б. Назначается глубина резания t исходя из величины снимаемого припуска и требуемой точности обработки с учетом жесткости системы СПИД.

В. Определяется подача s исходя из обеспечения требуемой шероховатости поверхности и точности обработки по формуле (10).

Г. Определяется глубина и степень наклепа по найденной подаче с помощью формул (11)–(12).

Д. Определяется толщина среза a_1 , ширина среза b_1 и периметр рабочих участков режущих кромок b помощью формул (1)–(3).

Е. Определяются критерии F , E , D .

Ж. Определяется предварительное значение Pe при $K = 3,5$ по формуле (8).

З. Находится для Pe по [3] уточненное значение коэффициента K .

И. Определяется сила P_z при резании с оптимальной температурой по формуле (7).

К. Производится расчет оптимальной скорости резания v_0 (6).

Л. Определяется частота вращения шпинделя n .

М. Определяется минутная подача по формуле $s_m = n \cdot s$.

Н. Определяется оптимальный относительный линейный радиальный износ $h_{л.о}$ по формуле (9).

О. Рассчитывается максимальная размерная стойкость T_p .

Результаты численных исследований графически представлены на рис. 1–4. Соотношение твердости в HB по Бринеллю и преде-

ла прочности при растяжении σ_B в МПа рассчитывалось по эмпирической формуле [8]:

$$\sigma_B = 112 + 2,4 \cdot HB.$$

Влияние переднего угла режущей пластины на скорость резания отображается в виде восходящей прямой (см. рис. 1), расположенной в первой и второй координатных четвертях и наклоненной к оси абсцисс

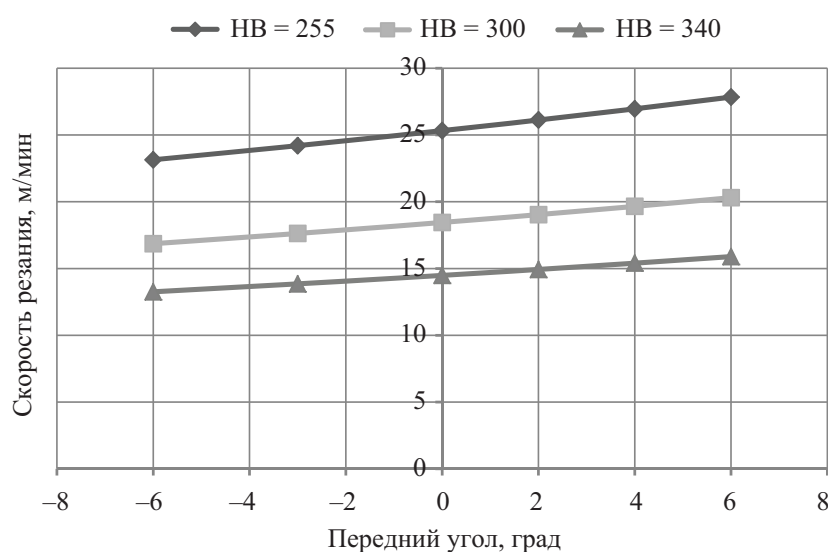


Рис. 1. Влияние переднего угла резца на скорость резания для марок стали различной твердости при $t = 5$ мм, $s = 1,1$ мм/об., $\rho_1 = 0,04$ мм

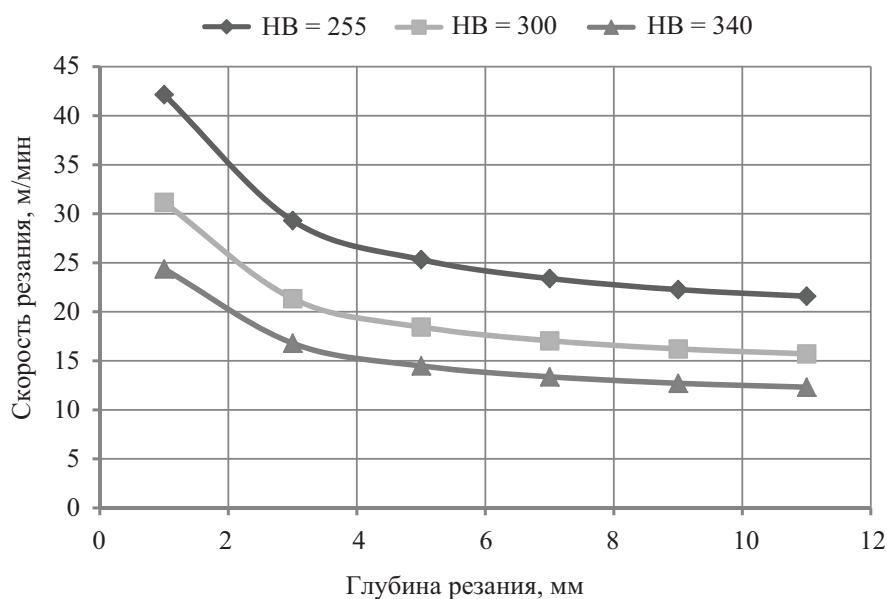


Рис. 2. Влияние глубины резания на скорость резания для марок стали различной твердости при $s = 1,1$ мм/об., $\gamma = 0^\circ$, $\rho_1 = 0,04$ мм

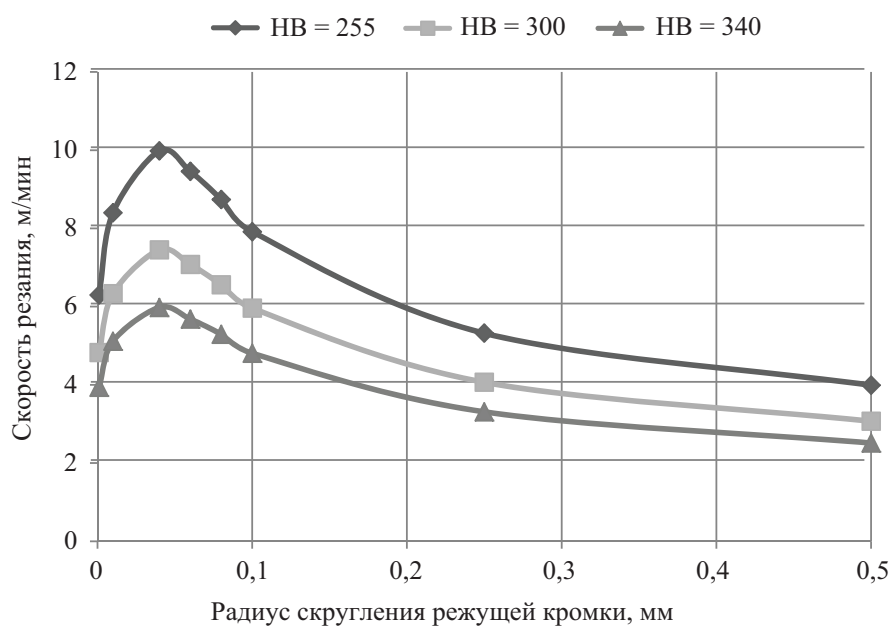


Рис. 3. Влияние радиуса скругления режущей кромки на скорость резания для марок стали различной твердости при $s = 1,1$ мм/об., $t = 5$ мм, $\gamma = 0^\circ$

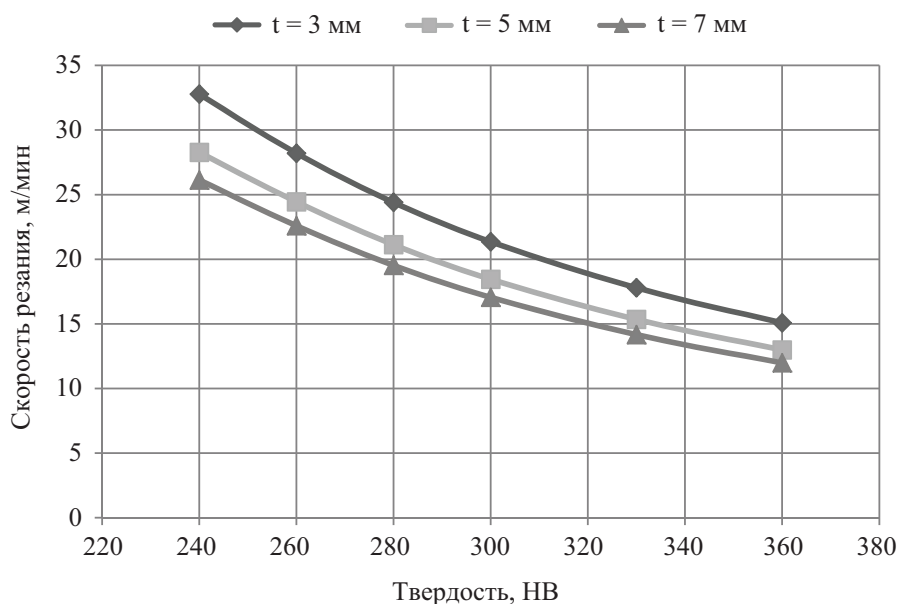


Рис. 4. Влияние твердости колесной стали на скорость резания при $s = 1,1$ мм/об., $\gamma = 0^\circ$, $\rho_1 = 0,04$ мм

на малый острый угол. С увеличением переднего угла уменьшается угол заострения режущей кромки инструмента и уменьшаются силы резания, в результате чего незначительно растет оптимальная скорость резания; в то же время снижается прочность режущего инструмента. Как и ожидалось, с

увеличением твердости стали существенно падает оптимальная скорость резания. Так, для стали с $HB = 255$ при $\gamma = 0^\circ$ оптимальная скорость $v = 25,32$ м/мин, а для стали с $HB = 300$ при $\gamma = 0^\circ$ $v = 18,45$ м/мин.

Зависимости допустимой скорости резания от глубины описываются вогнутыми

кривыми (см. рис. 2). С увеличением глубины резания значение оптимальной скорости резания уменьшается. При интенсивных режимах резания, соответствующих достаточно большим значениям толщины срезаемого слоя, увеличение глубины резания все меньше влияет на скорость, так как кривые становятся все более пологими. Однако в общей картине влияние глубины резания на скорость довольно существенное. Как и ожидалось, с увеличением твердости стали существенно падает оптимальная скорость резания. Так, для стали с $HV = 255$ при $t = 7$ мм оптимальная скорость $v = 23,39$ м/мин, а для стали с $HV = 300$ при $t = 7$ мм – $v = 17,05$ м/мин. Таким образом, при достаточно больших значениях толщины срезаемого слоя, характерных для восстановления профиля железнодорожных колес, значения оптимальной скорости резания лежат в пределах 12–22 м/мин в зависимости от твердости, определяемой маркой колесной стали.

Влияние радиуса скругления режущей кромки твердосплавной пластины на скорость резания имеет вид выпуклой кривой с экстремумом при значении $\rho_1 \approx 0,04$ мм (рис. 3).

С увеличением радиуса скругления главной режущей кромки твердосплавной пластины до $\sim 0,04$ мм оптимальная скорость резания возрастает, это объясняется увеличением прочности режущей кромки и стойкости режущего инструмента, что снижает вероятность его поломки. При дальнейшем увеличении ρ скорость v существенно уменьшается, поскольку возрастают силы резания, вибрация и износ по задней поверхности инструмента, в результате чего снижается стойкость инструмента. Опять же, повышение твердости стали требует снижения режимов резания, а именно скорости резания. Таким образом, радиус скругления главной режущей кромки твердосплавной пластины существенно влияет на прочность режущей кромки и стойкость режущего инструмента.

Зависимости допустимой скорости резания от твердости для различных глубин резания описываются вогнутыми кривыми небольшой кривизны (рис. 4). Как с увеличением твердости колесной стали, так и с ро-

стом глубины резания значение оптимальной скорости значительно уменьшается. Например, для стали с $HV = 300$ при $t = 3$ мм оптимальная скорость $v = 21,35$ м/мин, $t = 5$ мм – $v = 18,45$ м/мин, $t = 7$ мм – $v = 17,05$ м/мин.

Заключение

Расчет режимов резания на основе теории подобия показал, что введение новых марок колесных сталей с повышенными физико-механическими свойствами потребует при восстановлении профиля поверхности катания на ремонтных предприятиях снижения режимов резания примерно в 2 раза по сравнению с режимами обработки обычных железнодорожных колес, при условии сохранения необходимых точности и качества обработанной поверхности.

Библиографический список

1. **Ресурс** и ремонтпригодность колесных пар подвижного состава железных дорог : монография / Под ред. проф. И. А. Иванова. – М. : ИНФРА-М, 2011. – 264 с. – (Серия «Научная мысль»).
2. **Оптимизация** процессов резания / А. Д. Макаров. – М. : Машиностроение, 1976. – 278 с.
3. **Метод** подобия при резании материалов / С. С. Силин. – М. : Машиностроение, 1979. – 152 с.
4. **Теоретическое** определение параметров процесса резания / С. С. Силин // Производительная обработка и технологическая надежность деталей машин : межвузовский сб. научных трудов. – 1977. – № 6. – С. 3–16.
5. **Исследование** износа твердосплавных режущих инструментов при резании материалов методами теории подобия / С. С. Силин, Ю. Е. Кононов // Производительная обработка и технологическая надежность деталей машин : межвузовский сб. научных трудов. – 1977. – № 6. – С. 58–62.
6. **Определение** угла схода стружки при точении / С. С. Силин, В. А. Козлов // Производительная обработка и технологическая на-