

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. №12 (138). С. 9-15.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №12 (138). P. 9-15.

Научная статья
УДК 621.941
doi:10.30987/2223-4608-2022-12-9-15

Разработка модели для оценки напряженно-деформированного состояния твердосплавного инструмента при восстановительной обработке железнодорожных колес

Александр Алфеевич Воробьев¹, Д.Т.Н.,
Андрей Александрович Крутько², К.Т.Н.,
Дарья Александровна Седых³, К.Т.Н.

¹Петербургский государственный университет путей сообщения
императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия
^{2,3}Омский государственный технический университет, Омск, Россия
¹79219751198@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6319-4701>
²andrey_904@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7121-5004>
³lebedevada@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5535-0663>

Аннотация. Исследовано напряженное состояние твердосплавного режущего инструмента при токарной обработке железнодорожных колес методами математического моделирования и Мичела. На основе термомеханического подхода оценено влияние температур и сил на износ и пластическую деформацию твердого сплава.

Ключевые слова: профиль колеса, режущий клин, температура формоустойчивости, касательные напряжения, деформация

Для цитирования: Воробьев А.А., Крутько А.А., Седых Д.А. Разработка модели для оценки напряженно-деформированного состояния твердосплавного инструмента при восстановительной обработке железнодорожных колес // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №12 (138). – С. 9-15. doi: 10.30987/2223-4608-2022-12-9-15.

Original article

Investigation of tense state of carbide instrument at turning treatment of railway wheels

Alexandr A. Vorobyev¹, Dr.Sc.Tech.,
Andrey A. Krutko², Can.Sc.Tech.,
Darya A. Sedykh³, Can.Sc.Tech.

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS), St. Petersburg, Russia
^{2,3}Omsk State Technical University, Omsk, Russia
¹79219751198@yandex.ru, ²andrey_904@mail.ru, ³lebedevada@list.ru

Abstract. The tense state of carbide instrument at turning treatment of railway wheels work is tested using mathematical modeling and Michel method, taking into account the thermomechanical approach and temperatures and forces effect on wear and plastic deformation of hard alloys.

Keywords: wheel profile, cutting wedge, shape stability temperature, tangential stresses, deformation

For citation: Vorobyev A. A., Krutko A. A., Sedykh D.A. Investigation of the stressed state of a carbide tool during turning of railway wheels. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no. 12 (138), pp. 9-15. doi: 10.30987/2223-4608-2022-12-9-15.

Введение

Эксплуатация железнодорожного транспорта сопровождается износом и повреждением профиля поверхности катания железнодорожных колес при контакте «колесо-рельс». В ремонтных депо производится восстановление профиля преимущественно токарной обработкой с использованием режущего инструмента, оборудованного специальными вставками с закрепленными в них твердосплавными призматическими пластинами ($r = 4$ мм; $\varphi = 86^\circ$; $\gamma = 0^\circ$; $\lambda = 6^\circ$; $\alpha = 6^\circ$). В качестве основных марок инструментальных материалов используются Т5К10 и Т14К8. Обработка проводится при режимах резания в следующих пределах: $s = 1,2 \dots 2,12$ мм/об; $t = 4 \dots 12$ мм; $v = 50 \dots 65$ м/мин [1 – 4]. В данных условиях инструмент обладает низкой стойкостью и надежностью, что приводит, согласно статистическим данным [5], к значительным простоям оборудования. Снижению стойкости режущего инструмента также способствует увеличение и прочностных характеристик колесной стали (НВ до 3200...3600 МПа).

Материалы и методы

Обеспечение надежности, стойкости и экономии режущего инструмента возможно за счет выявления и учета факторов, влияющих на процессы, протекающие при резании. В представленной работе произведен анализ факторов, влияющих на процесс изнашивания и деформации режущего инструмента на основе термомеханического подхода и метода Мичела

с учетом условий обработки. Для оценки напряженно-деформированного состояния режущих пластин в данной работе был проведен анализ формы износа, который выявил, что на задней поверхности износ проявляется более интенсивно в области вершины резца. Анализ показал, что неравномерность изменения ширины фаски износа на задней поверхности ($K_n = \frac{h_B}{h_T}$) особенно выражена при повышенных подачах (рис. 1).

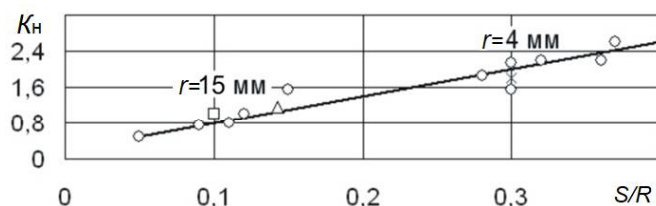


Рис. 1. Зависимость неравномерности износа призматической и чашечной пластин от отношения S/R при точении профиля колеса (285 НВ) $s = 1,2 \dots 2,5$ мм/об

В тоже время, применение резцов с большим радиусом закругления вершины ($r = 15$ мм), например, чашечных, обеспечивало снижение неравномерности износа задней поверхности режущей пластины вплоть до момента наступления катастрофического износа.

Наряду с неравномерным износом задней поверхности режущей пластины, также наблюдается ее интенсивный износ [6], выражающийся в пластической деформации и опускании режущей кромки (рис. 2, а).

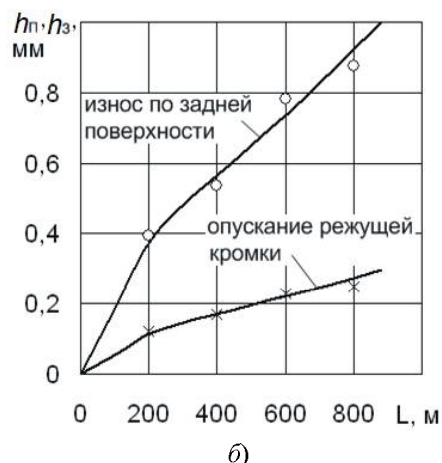
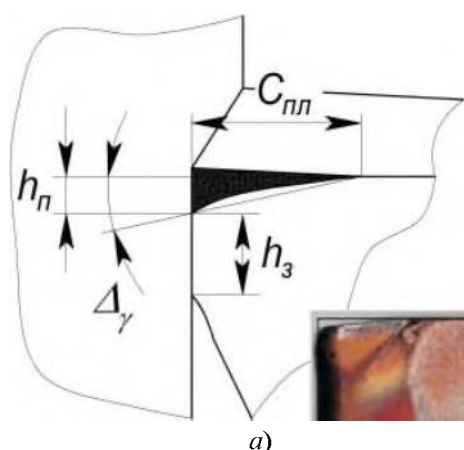


Рис. 2. Форма износа (а) и изменение характеристик изнашивания (б) при точении профиля колеса (285 НВ) призматической пластиной (Т14К8; $\varphi = 75^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $\alpha = 8^\circ$; $r = 4$ мм; $t = 8$ мм; $s = 1,2$ мм/об; $v = 38$ м/мин)

Как показали наблюдения за процессом восстановительной обработки, данная величина пропорциональна значению ширины фаски износа (h_3) (см. рис. 2, б). Следовательно, значе-

ние h_3 возможно использовать в качестве одного из критериев износа.

В связи с тем, что процессы изнашивания и ползучести (пластической деформации) зависят

от температуры и напряжения, необходимо обосновать методы их вычисления.

В широко опубликованной литературе [7] для учета влияния условий резания на изнашивание режущего инструмента достаточно часто используется температура резания. Однако, как следует из анализа экспериментальных зависимостей (рис. 3), данная температура не может быть использована в качестве температурного фактора, влияющего на изнашивание, т.к. при изменении интенсивности изнашивания режущего лезвия, изменение температуры находится в пределах погрешности эксперимента.

Таким образом, как следует из рис. 3, температурным фактором, учитывающим зависимость интенсивности изнашивания режущего лезвия от условий обработки, принята температура формоустойчивости (рис. 4).

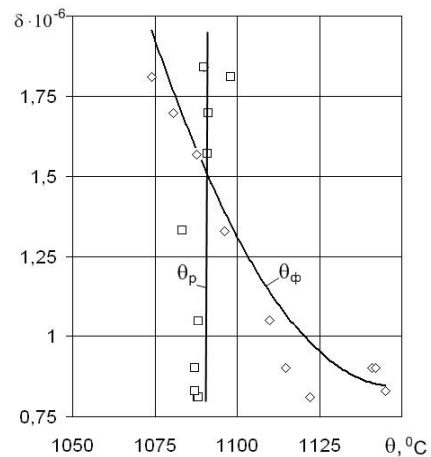


Рис. 3. Влияние температуры на интенсивность изнашивания при точении профиля колеса (285 НВ) призматической пластиной (Т14К8; $\phi = 75^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $\alpha = 8^\circ$; $r = 4$ мм; $t = 8$ мм; $v = 45$ м/мин; $s = 0,8...1,2$ мм/об)

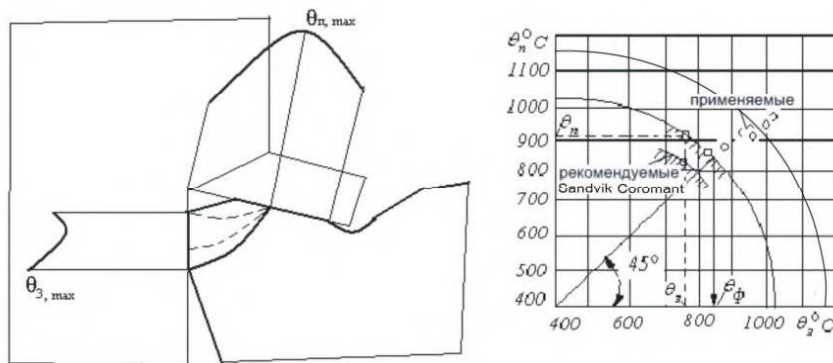


Рис. 4. Определение максимальных температур на поверхностях режущего инструмента при точении профиля колеса (285 НВ) призматической пластиной (Т14К8; $\phi = 75^\circ$; $r = 4$ мм)

Данная температура позволяет обобщить влияние температур, определяемых на передней и задней поверхностях режущего лезвия. Температура формоустойчивости отражает комплексное влияние максимальных температур на передней ($\theta_{n,max}$) и задней ($\theta_{3,max}$) поверхностях режущего лезвия, значения которых определяются с использованием термомеханического подхода [8]. Кроме того, используется условие равенства этих температур, т.е. при $\theta_0 = 400$ °С:

$$\theta_\phi = \sqrt{\frac{(\theta_{n,max} - \theta_0)^2 + (\theta_{3,max} - \theta_0)^2}{2}} / 1,41 + \theta_0 \quad (1)$$

Анализ применяемых в ремонтных депо режимов восстановительной обработки выявил, что температура формоустойчивости находится в диапазоне от 950 до 1000 °С. Однако ведущие фирмы-производители, например Sandvik Coromant [3], рекомендуют режимы обработки, соответствующие температуре формоустойчивости равной 850 °С. Следовательно, оптимизация применяемых при восстановлении про-

филя колеса режимов резания является одним из направлений снижения температуры формоустойчивости.

Формы износа режущего инструмента и экспериментальных характеристик (см. рис. 2) позволяют сделать вывод о том, что, несмотря на высокие значения температур при применяемых на практике режимах резания, преобладающим является влияние фактора, учитывающего напряженное состояние режущего лезвия [9].

В процессе обработки режущее лезвие испытывает нормальные и касательные напряжения. Однако действие нормальных напряжений на процессы деформации и изнашивания инструмента не велико, т.к. допустимые нормальные напряжения у применяемых марок твердосплавного инструментального материала существенно выше касательных напряжений.

В данной работе для оценки влияния напряжений использован метод Мичела, учитывающий действие сосредоточенных сил на режущий клин [10]. При этом касательные на

пряжения определяются через тангенциальную силу P_1 , а нормальные через радиальную P_2 (рис. 5).

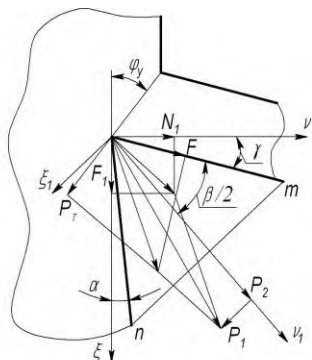


Рис. 5. Схема сил, действующих на клин режущего инструмента

Определение радиальных (сжимающих) напряжений необходимо для оценки прочности лезвия вблизи режущей кромки, где данные напряжения могут при определенных условиях

превышать предел прочности инструментального материала на сжатие и наряду с касательными напряжениями влиять на износ и деформацию режущего лезвия. Однако в большинстве случаев данным напряжением при расчетах можно пренебречь.

Найдем проекции сосредоточенных сил на оси координат, проецируя равнодействующие сил, расположенных на передней и задней поверхностях клина режущего инструмента.

Для этого сначала определим компоненты сил на передней поверхности режущего клина (P_τ и F) в системе координат v, ξ :

$$P_\tau = \frac{\bar{\tau}}{S_b \sin \varphi_y} S_b St, \quad F = \frac{\bar{q}_F}{S_b} \frac{2C_1}{a} S_b St. \quad (2)$$

Далее вычислим равнодействующую силы на передней поверхности в новой системе координат v_1, ξ_1 :

$$R_{\xi_1} = R_\xi \cos(\gamma + \beta/2) - R_v \sin(\gamma + \beta/2) = P_\tau \frac{\cos(\beta/2)}{\cos(\varphi_y - \gamma)} - F \frac{\sin(\varphi_y - \gamma - \beta/2)}{\cos(\varphi_y - \gamma)}, \quad (3)$$

$$R_{v_1} = R_\xi \sin \gamma + \beta/2 + R_v \cos(\gamma + \beta/2) = P_\tau \frac{\sin(\beta/2)}{\cos(\varphi_y - \gamma)} + F \frac{\cos(\varphi_y - \gamma - \beta/2)}{\cos(\varphi_y - \gamma)}.$$

Компоненты сил для задней поверхности определяются аналогично передней (см. рис. 5):

$$F_1 = \frac{q_3}{S_b} \frac{h_3}{a} S_b St, \quad N_1 = \left(\frac{1}{1 + \varepsilon_z} \frac{h_3}{a} S_b St + q_N f_y \sin \gamma_f \right) t. \quad (4)$$

Принимая во внимание полученные зависимости, тангенциальная проекция силы реза-

ния имеет следующий вид:

$$P_1 = P_\tau \frac{\cos(\beta/2)}{\cos(\varphi_y - \gamma)} - F \frac{\sin(\varphi_y - \gamma - \beta/2)}{\cos(\varphi_y - \gamma)} + F_1 \cos(\gamma + \beta/2) - N_1 \sin(\gamma + \beta/2). \quad (5)$$

Принимая во внимание решение Мичела [3], уравнение для определения касательных

напряжений в режущем клине (сечение $m-n$) примет следующий вид:

$$\tau_m = -\frac{P_1 \operatorname{tg}^2 \beta/2 \cos^4 \beta/2}{bc \left(\frac{\beta}{2} - \frac{\sin \beta}{2} \right)} = -\left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) \frac{P_1}{bc} K_1(\beta) = -\tau_0 K_1(\beta), \quad (6)$$

где $\tau_0 = 0,57 \frac{P_1}{bc}$, $K_1(\beta) = \frac{\sin^2 \beta}{(\beta - \sin \beta)(\pi/2 - 1)}$.

Для описания пластической деформации режущего лезвия принято, что скорость данной деформации (ползучести) при одинаковой температуре формоустойчивости, зависит от отношения касательных напряжений в режущем

клине и предела прочности твердого сплава, определенного при испытании на изгиб, а влияние температуры на прочностные свойства инструментального материала учитывается соответствующим коэффициентом (K_2).

Таким образом, с учетом того, что $\tau_T = \sigma_T / \sqrt{3}$, а также $\frac{\pi/2-1}{\sqrt{3}} \approx \frac{1}{3}$, формула для определения безразмерной характеристики σ_m , учитывающей влияние касательных напряжений в режущем клине на деформацию (скорость ползучести), примет следующий вид:

$$\sigma_m = \frac{P_1}{3bc\sigma_u^*K_2} K_1(\beta), \quad (7)$$

Проведем анализ напряженного состояния режущего инструмента при обработке профиля железнодорожных колес с учетом условий обработки. Оценим влияние угла заострения режущего клина резца на поправочный коэффициент $K_1(\beta)$ (рис. 6)

Как показал анализ рис. 6 и зависимости (6), увеличение угла вызывает снижение

степени влияния касательных напряжений τ_m .

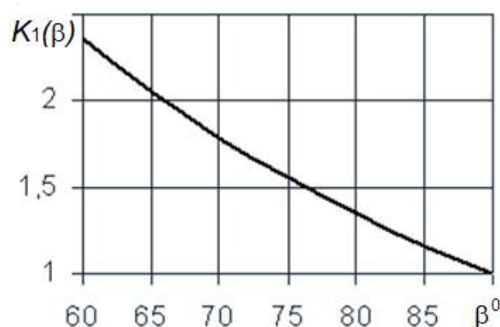


Рис. 6. Зависимость коэффициента $K_1(\beta)$ от угла заострения режущего клина резца

При износе резца по задней поверхности наблюдается снижение силы P_1 (рис. 7, а) и касательных напряжений τ_m (рис. 7, б) и, следовательно, уменьшается скорость ползучести.

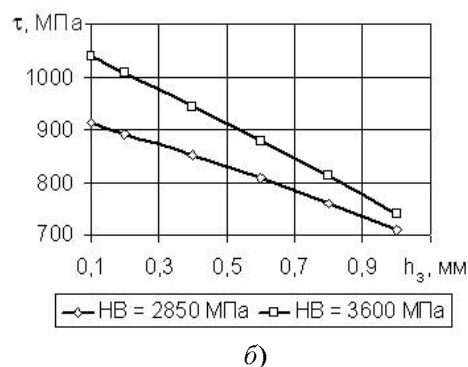
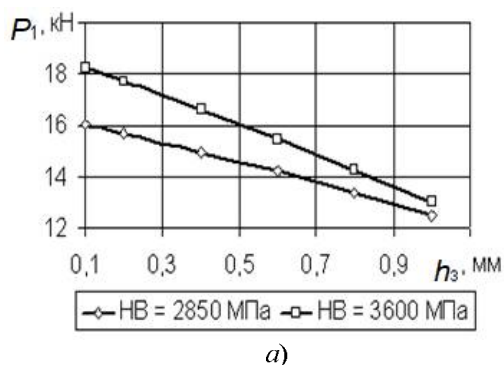


Рис. 7. Зависимости силы P_1 (а) и напряжения τ_m (б) от величины фаски износа задней поверхности при точении профиля колеса (285 НВ) призматической пластиной (Т14К8; $\phi = 75^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $\alpha = 8^\circ$; $r = 4$ мм; $t = 8$ мм; $v = 45$ м/мин; $s = 1,2$ мм/об)

Это хорошо согласуется с практическими наблюдениями, т.к. пластическая деформация режущего лезвия происходит интенсивнее на остром резце в первые минуты резания.

Следовательно, снижение напряжений при неизменной толщине срезаемого слоя можно обеспечить за счет увеличения размера фаски, расположенной на задней поверхности режущей пластины. Как следует из анализа и практических наблюдений, значения данной фаски, превышающие 0,3...0,4 мм, приводят к увели-

чению температуры задней поверхности, однако применение предварительного притупления с указанными параметрами позволит снизить интенсивность изнашивания и касательные напряжения на 50 МПа, а также увеличить прочность режущего клина в окрестности режущей кромки.

Кроме того, выявлено, что кроме фаски износа на силу P_1 (рис. 8, а) и касательные напряжения (рис. 8, б) оказывает значительное влияние толщина срезаемого слоя.

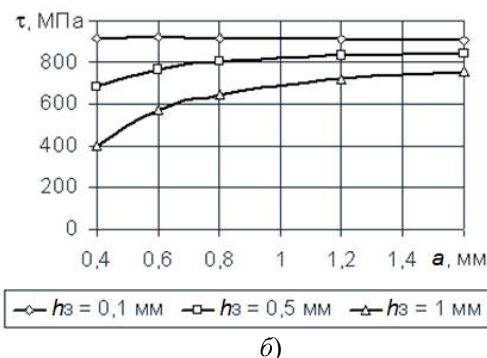
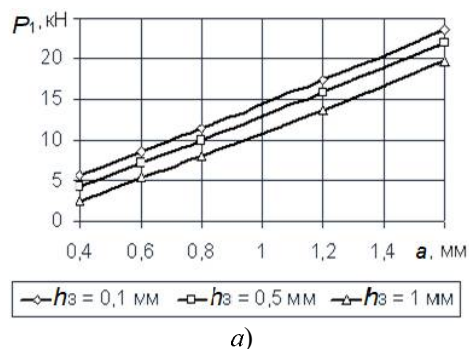


Рис. 8. Зависимости силы P_1 (а) и напряжения τ_m (б) от толщины срезаемого слоя при точении профиля колеса (285 НВ) призматической пластиной (Т14К8; $\phi = 75^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $\alpha = 8^\circ$; $r = 4$ мм; $t = 8$ мм; $v = 45$ м/мин)

Для оценки условий пластической деформации при обработке профиля железнодорожных колес резанием, проанализируем без-

размерный комплекс (7) и влияние на него толщины срезаемого слоя и ширины фаски износа (рис. 9).

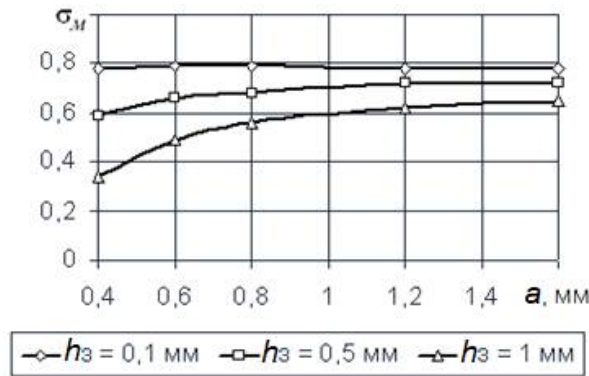


Рис. 9. Зависимость безразмерного комплекса σ_m от толщины срезаемого слоя и величины фаски износа задней поверхности при точении профиля колеса (285 НВ) призматической пластиной (Т14К8; $\varphi = 75^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $\alpha = 8^\circ$; $r = 4$ мм; $t = 8$ мм; $v = 45$ м/мин)

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 9, позволяет сделать вывод о том, что процесс деформации (ползучести) режущего инструмента при обработке профиля железнодорожного колеса точением значительно сокращается при уменьшении толщины срезаемого слоя до величины 0,6...0,8 мм.

Таким образом, как следует из вышесказанного, в качестве основных факторов, влияющих на процесс изнашивания режущего лезвия при токарной обработке профиля железнодорожных колес, выступают температура формоустойчивости и безразмерный комплекс, описывающий процесс деформации (ползучести) режущего инструмента. Данная взаимосвязь может быть выражена графически в виде вогнутых кривых (рис. 10) и описывающей их зависимости (8).

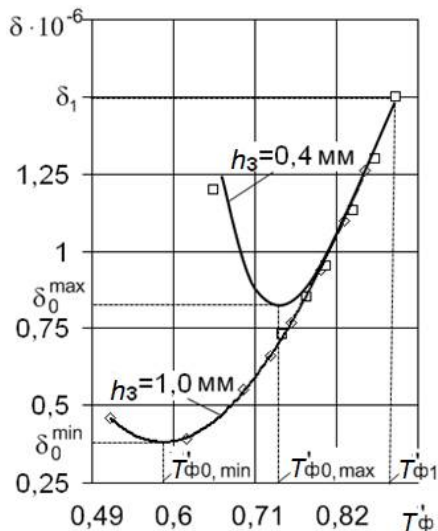


Рис. 10. Обработка колесной стали призматическим резцом марки Т14К8; $\varphi = 75^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $\alpha = 8^\circ$; $r = 4$ мм; $t = 8$ мм; $s = 1,2$ мм/об; $v = 38$ м/мин

$$L = \int_0^T v d\tau = \int_{h_0}^{h^*} \frac{dh}{\delta_L(\theta, \sigma)} \quad (8)$$

Полученную зависимость можно использовать при анализе режимов резания токарной обработки железнодорожных колес как при оптимизации технологического процесса, так и при разработке нового.

Выводы

1. Установлено, что неравномерность изменения ширины фаски износа на задней поверхности особенно выражена при повышенных подачах и небольших радиусах при вершине $r = 4$ мм. Снизить неравномерность износа при сохранении используемой подачи возможно за счет применения пластин с большим радиусом закругления вершины ($r = 15$ мм).

2. Значение фаски h_z возможно использовать в качестве одного из главных критериев износа, т.к. величина фаски износа задней поверхности резца при обработке профиля железнодорожного колеса пропорциональна величине опускания режущей кромки.

3. Выявлено, что при обработке железнодорожных колес температурным фактором, связанным с изнашиванием режущего лезвия, выступает температура формоустойчивости.

4. Для учета пластической деформации режущего лезвия, получена зависимость для определения безразмерного комплекса, учитывающего влияние касательных напряжений в режущем клине на скорость ползучести.

5. Описана взаимосвязь между температурой формоустойчивости и безразмерным комплексом, учитывающим касательные напряжения в режущем клине.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Крутько, А.А., Кушнер, В.С., Воробьев, А.А. Повышение эффективности восстановительной токарной обработки железнодорожных колесных пар: монография. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. – 176 с.
2. Иванова, И.А., Кушнера, В.С. Влияние структуры и механических характеристик колесных сталей на изнашивание и режимы восстановления профиля колесных пар: монография. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. – 224 с.
3. Воробьев, А.А. Совершенствование технологии восстановления колесных пар: монография. – LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co, 2011. – 186 с.
4. Повышение работоспособности колесных пар подвижного состава: монография / О.С. Валинский, А.А. Воробьев, С.И. Губенко и др. / Казань: Бук, 2022. – 324 с.
5. Воробьев, А.А., Потахов, Д.А., Крутько, А.А., Фисенко, В.И. Оценка напряженно-деформированного состояния и прочности режущего инструмента при обточке железнодорожных колес // Омский научный вестник. – 2015. – № 140. – С. 62-66.
6. Воробьев, А.А., Кушнер, В.С., Крутько, А.А., Крутько, А.А. Анализ условий работы твердосплавного инструмента в тяжелых условиях обработки колесных сталей // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2015. – №3 (31). – С. 24-29.
7. Влияние средней температуры контакта при резании на основные характеристики качества поверхностного слоя / А.Д. Макаров и др. // Теплофизика технологических процессов. – Куйбышев: Кн. изд-во. – 1970. – С. 270-275.
8. Совершенствование расчета температуры при резании на основе термомеханического подхода / В.С. Кушнер, М.Г. Сторчак, А.А. Воробьев и др. // Омский научный вестник. – 2009. – №1 (77). – С. 10-14.
9. Кушнер, В.С., Жавнеров, А.Н., Горшенин, В.А. Влияние температуры и напряжений на интенсивности формоизменения режущего лезвия при обработке никелевых сплавов // Омский научный вестник. – 2007. – № 3(60). – С. 26-28.
10. Тимошенко, С.П., Гудьер, Дж. Теория упруго-

сти: Пер. с англ. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 560 с.

REFERENCES

1. Krutko, A.A., Kushner, V.S., Vorobyev, A.A. Improving the efficiency of restorative turning of railway wheel sets: monograph, Omsk: Publishing house of OmSTU, 2013, 176 p.
2. Ivanova, I.A., Kushner, V.S. The influence of the structure and mechanical characteristics of wheel steels on the wear and recovery modes of the profile of wheel pairs: monograph, Omsk: Publishing house of OmSTU, 2015, 224 p.
3. Vorobyev, A.A. Improvement of wheelset restoration technology: monograph, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co, 2011, 186 p.
4. Valinsky, O.S., Vorobyov, A.A., Gubenko, S.I. and others. Improving the performance of wheel sets of rolling stock: monograph, Kazan: Buk, 2022, 324 p.
5. Vorobyev, A.A., Potakhov, D.A., Krutko, A.A., Fisenko, V.I. Evaluation of the stress-strain state and strength of the cutting tool when turning railway wheels // Omsk Scientific Bulletin, 2015, No. 140, PP. 62-66.
6. Vorobyov, A.A., Kushner, V.S., Krutko, A.A., Krutko, A.A. Analysis of the working conditions of a carbide tool under severe conditions of wheel steel processing // Bulletin of the Institute of Problems of Natural Monopolies: Railway Engineering, 2015, № 3(31), PP. 24-29.
7. Makarov, A.D. et al. The influence of the average contact temperature during cutting on the main characteristics of the quality of the surface layer // Thermophysics of technological processes, Kuibyshev: Publishing House, 1970, PP. 270-275.
8. Kushner, V.S., Storchak, M.G., Vorobyev, A.A., etc. Improvement of temperature calculation during cutting on the basis of thermomechanical approach // Omsk Scientific Bulletin, 2009, № 1(77), PP. 10-14.
9. Kushner, V.S., Zhavnerov, A.N., Gorshenin, V.A. Influence of temperature and stresses on the intensity of the cutting blade shape change during processing of nickel alloys // Omsk Scientific Bulletin, 2007, № 3(60), PP. 26-28.
10. Timoshenko, S.P., Goodyear, J. Theory of elasticity: Trans. from English, M.: Nauka. The main edition of the physical and mathematical literature, 1979, 560 p.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 16.09.2022; одобрена после рецензирования 22.09.2022; принята к публикации 28.10.2022

The article was submitted 16.09.2022; approved after reviewing 22.09.2022; accepted for publication 28.10.2022.