

УДК 621.941

## Исследование напряженного состояния твердосплавного инструмента при токарной обработке железнодорожных колес

А. А. Воробьев<sup>1</sup>, А. А. Крутько<sup>2</sup>, Д. А. Седых<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

<sup>2</sup>Омский государственный технический университет, Российская Федерация, 644050, Омск, Проспект Мира, 11

**Для цитирования:** Воробьев А. А., Крутько А. А., Седых Д. А. Исследование напряженного состояния твердосплавного инструмента при токарной обработке железнодорожных колес // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 479–488. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-479-488

### Аннотация

**Цель:** Исследование напряженного состояния твердосплавного режущего инструмента при токарной обработке железнодорожных колес. **Методы:** Методами математического моделирования и Мичела, а также на основе термомеханического подхода оценено влияние температур и сил на износ и пластическую деформацию твердого сплава. **Результаты:** Оценено напряженно-деформированное состояние режущих пластин, а также проведен анализ формы износа, который выявил, что по задней поверхности происходит увеличение фаски износа преимущественно в окрестности вершины резца. Показано, что температура формоустойчивости и касательное напряжение являются факторами, влияющими на условия обработки и на интенсивность изнашивания режущей пластины. **Практическая значимость:** Определены зависимости, позволяющие назначить рациональные режимы обработки железнодорожных колесных пар при ремонте.

**Ключевые слова:** Профиль колеса, режущий клин, температура формоустойчивости, касательные напряжения, деформация.

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:  $s = 1,2\text{--}2,12$  мм/об,  $t = 4\text{--}12$  мм,  $v = 50\text{--}65$  м/мин [1–7]. В данных условиях инструмент обладает низкой стойкостью и надежностью, что приводит, согласно статистическим данным [8], к значительным простоям оборудования. Снижению

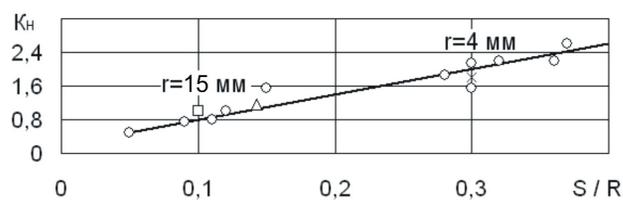


Рис. 1. Зависимость неравномерности износа призматической и чашечной пластин от отношения  $S/R$  при точении профиля колеса (285НВ)  
 $s = 1,2-2,5$  мм/об

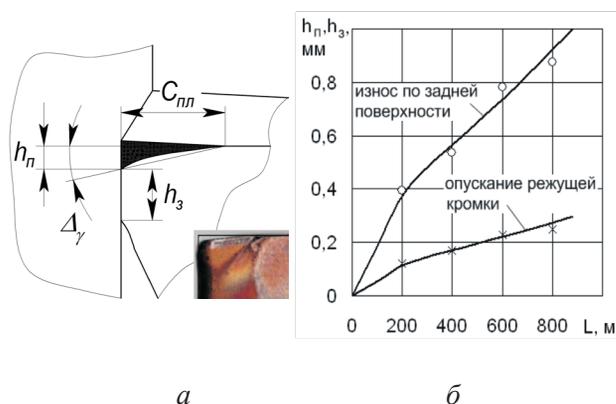


Рис. 2. Форма износа:  
 $a$  — и изменение характеристик изнашивания;  $b$  — при точении профиля колеса (285НВ) призматической пластиной  
(Т14К8,  $\varphi = 75^\circ$ ,  $\gamma = 10^\circ$ ,  $\alpha = 8^\circ$ ,  $r = 4$  мм,  
 $t = 8$  мм,  $s = 1,2$  мм/об,  $V = 38$  м/мин)

стойкости режущего инструмента также способствует увеличение и прочностных характеристик колесной стали (НВ до 3200–3600 МПа).

Обеспечение надежности, стойкости и экономии режущего инструмент 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

$\left( K_n = \frac{h_B}{h_T} \right)$  особенно выражена при повышенных

подачах (рис. 1). В то же 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 [9], выражающийся в пластической деформации и опускании режущей кромки (рис. 2,  $a$ ). Как показали наблюдения за процессом восстановительной обработки, данная величина пропорциональна значению ширины фаски износа ( $h_3$ ) (рис. 2,  $b$ ). Следовательно, значение  $h_3$  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 [10] 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, так как 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). Данная температура позволяет обобщить влияние температур, определяемых на передней и задней поверхностях режущего лезвия.

Температура формоустойчивости отражает комплексное влияние максимальных температур на передней ( $\theta_{п, \max}$ ) и задней ( $\theta_{з, \max}$ ) поверхностях режущего лезвия, значения которых определяются с использованием термомеханического подхода [11, 12]. Кроме того, используется условие равенства этих температур, т. е. при  $\theta_0 = 400 \text{ }^\circ\text{C}$ :

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

Анализ применяемых в ремонтных депо режимов восстановительной обработки выявил, что температура формоустойчивости находится в диапазоне от 950 до 1000  $^\circ\text{C}$ . Однако ведущие фирмы-производители, например SandvikCoromant [1, 4], рекомендуют режимы обработки, соответствующие температуре формоустойчивости, равной 850  $^\circ\text{C}$ . Следовательно, оптимизация применяемых при восстановлении профиля колеса режимов

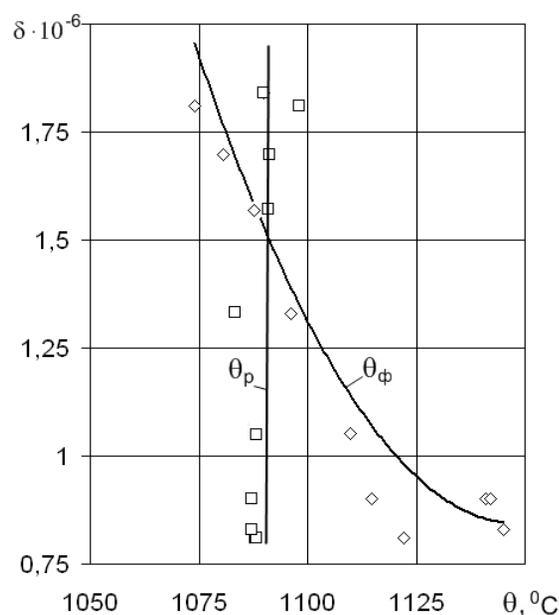


Рис. 3. Влияние температуры на интенсивность изнашивания при точении профиля колеса (285НВ) призматической пластиной (Т14К8,  $\phi = 75^\circ$ ,  $\gamma = 10^\circ$ ,  $\alpha = 8^\circ$ ,  $r = 4 \text{ мм}$ ,  $t = 8 \text{ мм}$ ,  $V = 45 \text{ м/мин}$ ,  $s = 0,8-1,2 \text{ мм/об}$ )

резания является одним из направлений снижения температуры формоустойчивости.

Формы износа режущего инструмента и экспериментальных характеристик (см. рис. 2)

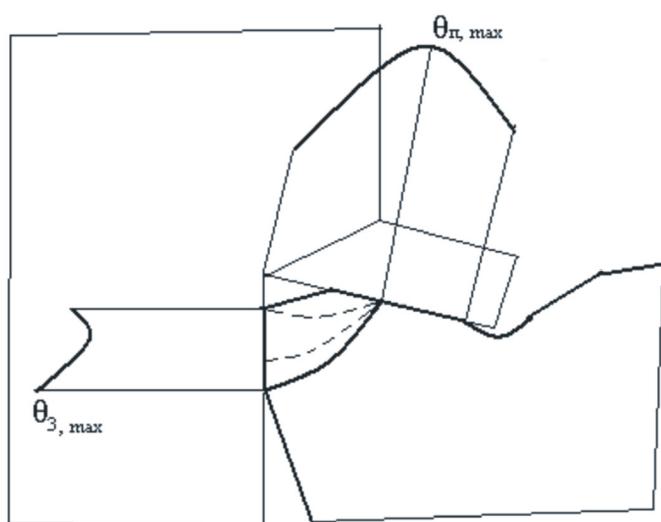
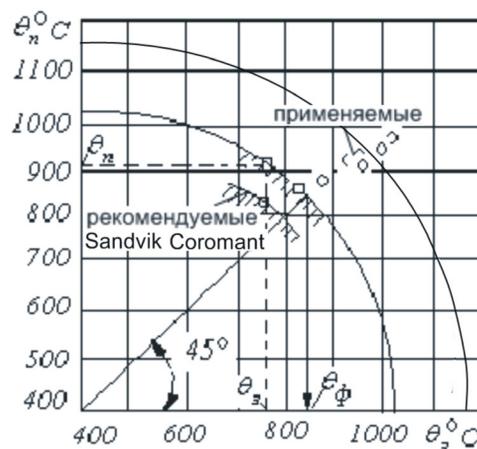


Рис. 4. Определение максимальных температур на поверхностях режущего инструмента при точении профиля колеса (285НВ) призматической пластиной (Т14К8,  $\phi = 75^\circ$ ,  $r = 4 \text{ мм}$ )



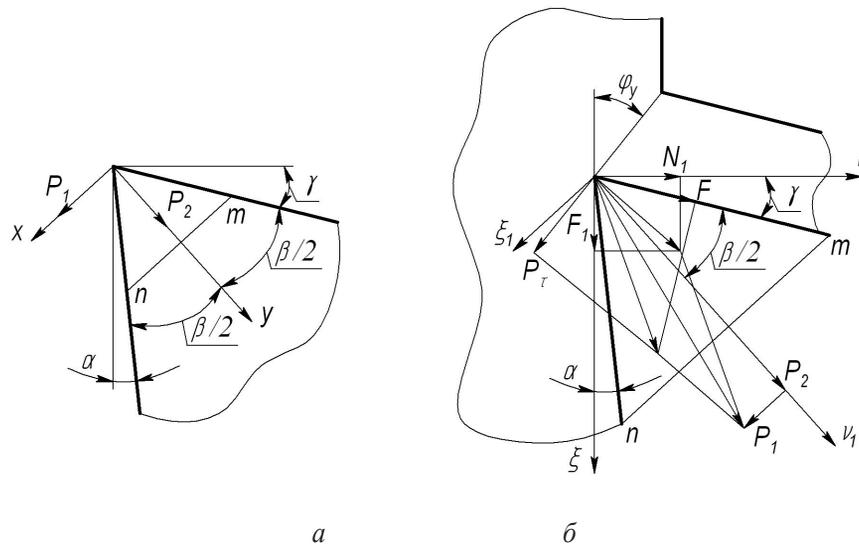


Рис. 5. Схема сил, действующих на клин режущего инструмента

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 [13].

В процессе обработки режущее лезвие испытывает нормальные и касательные напряжения. Однако действие нормальных напряжений на процессы деформации и изнашивания инструмента невелико, так как 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 [14]. При этом касательные напряжения определяются через тангенциальную силу  $P_1$ , а нормальные через радиальную  $P_2$  (рис. 5).

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 силы на оси координат, проецируя равнодействующую сил, расположенных на передней и задней поверхностях клина режущего инструмента.

Для этого сначала определим компоненты сил на передней поверхности режущего клина ( $P_\tau$  и  $F$ ) в системе координат  $\nu, \xi$ :

$$P_\tau = \frac{\bar{\tau}}{S_b} \frac{1}{\sin \varphi_y} S_b St, \quad F = \frac{\bar{q}_F}{S_b} \frac{2C_1}{a} S_b St. \quad (2)$$

Далее вычислим равнодействующую силы на передней поверхности в новой системе координат  $\nu_1, \xi_1$ :

$$\begin{aligned} R_{\xi_1} &= R_\xi \cos(\gamma + \beta/2) - R_\nu \sin(\gamma + \beta/2) = \\ &= P_\tau \frac{\cos(\beta/2)}{\cos(\varphi_y - \gamma)} - F \frac{\sin(\varphi_y - \gamma - \beta/2)}{\cos(\varphi_y - \gamma)}, \\ R_{\nu_1} &= R_\xi \sin(\gamma + \beta/2) + R_\nu \cos(\gamma + \beta/2) = \\ &= P_\tau \frac{\sin(\beta/2)}{\cos(\varphi_y - \gamma)} + F \frac{\cos(\varphi_y - \gamma - \beta/2)}{\cos(\varphi_y - \gamma)}. \end{aligned} \quad (3)$$

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

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

Принимая во внимание полученные зависимости, тангенциальная проекция силы резания 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 [5], уравнение для определения касательных напряжений в режущем клине (сечение  $m - n$ ) примет следующий вид:

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

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  $\sigma_m$ , учитывающей

влияние касательных напряжений в режущем клине на деформацию (скорость ползучести), примет следующий вид:

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

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  $\beta$  вызывает снижение степени влияния касательных напряжений  $\tau_m$ .

При износе резца по задней поверхности наблюдается снижение силы  $P_1$  (рис. 7, а) и касательных напряжений  $\tau_m$  (рис. 7, б) и, следовательно, уменьшается скорость ползучести. Это хорошо согласуется с практическими наблюдениями, так как 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, пре-

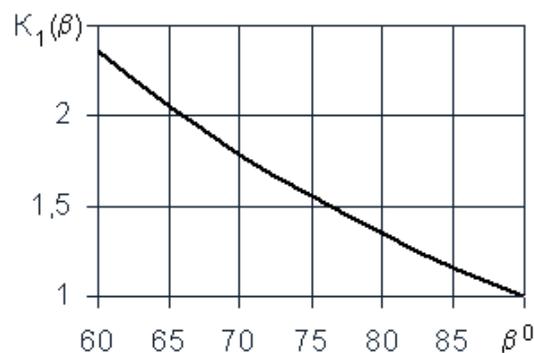


Рис. 6. Зависимость коэффициента  $K_1(\beta)$  от угла заострения режущего клина резца

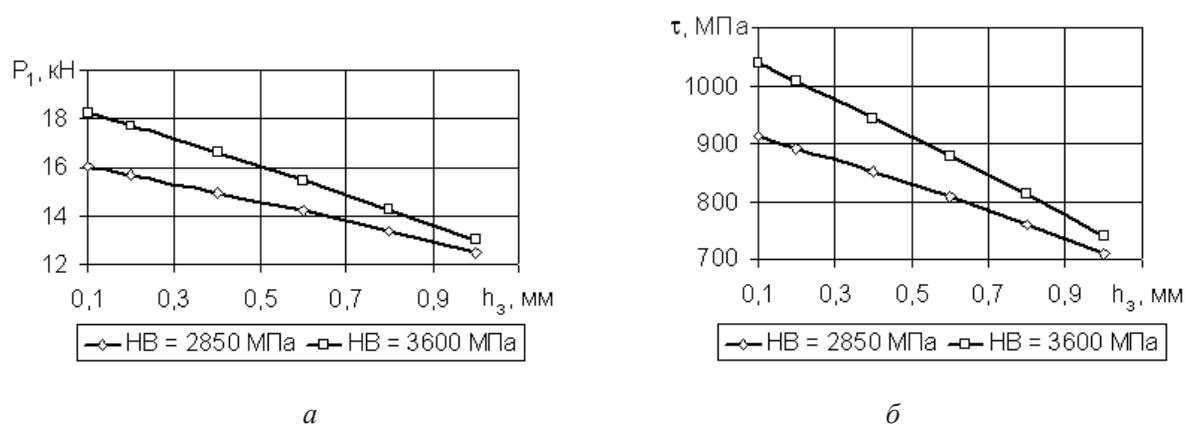


Рис. 7. Зависимости силы  $P_1$ :  
 а — и напряжения  $\tau_m$ ; б — от величины фаски износа задней поверхности  
 при точении профиля колеса (285НВ) призматической пластиной  
 (Т14К8,  $\varphi = 75^\circ$ ,  $\gamma = 10^\circ$ ,  $\alpha = 8^\circ$ ,  $r = 4$  мм,  $t = 8$  мм,  $V = 45$  м/мин,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

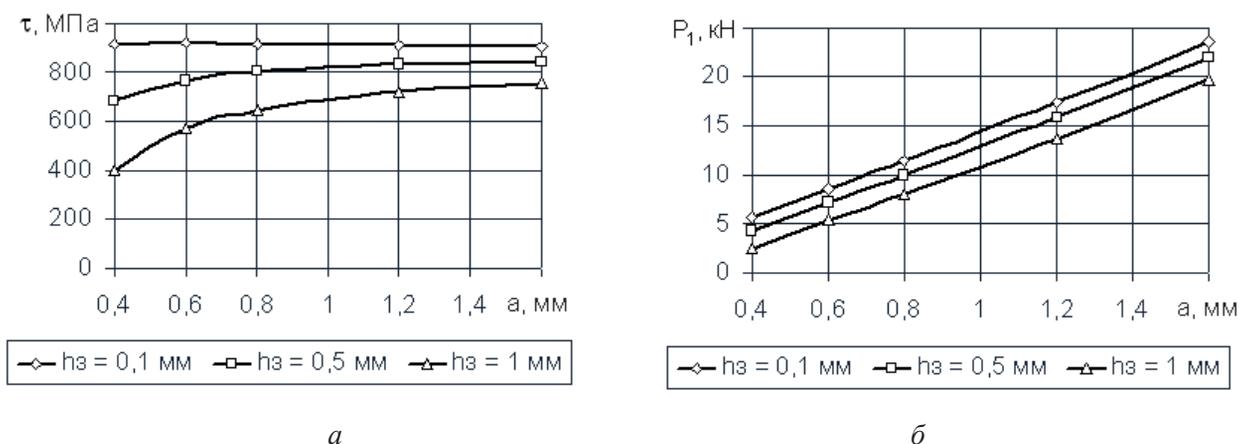


Рис. 8. Зависимости силы  $P_1$ :  
 а — и напряжения  $\tau_m$  б — от толщины срезаемого слоя при точении профиля колеса (285НВ)  
 призматической пластиной (Т14К8,  $\varphi = 75^\circ$ ,  $\gamma = 10^\circ$ ,  $\alpha = 8^\circ$ ,  $r = 4$  мм,  $t = 8$  мм,  $V = 45$  м/мин)

вышающие 0,3–0,4 мм, приводят к увеличению 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.

Для оценки условий пластической деформации при обработке профиля железнодорожных

колес резанием проанализируем безразмерный комплекс (7) и влияние на него толщины срезаемого слоя и ширины фаски износа (рис. 9).

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

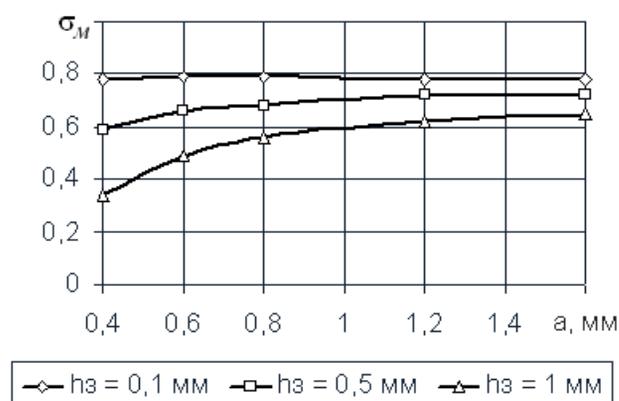


Рис. 9. Зависимость безразмерного комплекса  $\sigma_m$  от толщины срезаемого слоя и величины фаски износа задней поверхности при точении профиля колеса (285НВ) призматической пластиной (Т14К8,  $\varphi = 75^\circ$ ,  $\gamma = 10^\circ$ ,  $\alpha = 8^\circ$ ,  $r = 4$  мм,  $t = 8$  мм,  $V = 45$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

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):

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

### Заключение

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  $h_3$  возможно использовать в качестве одного из главных критериев износа, так как величина фаски износа задней поверхности резца при обработке профиля железнодорожного

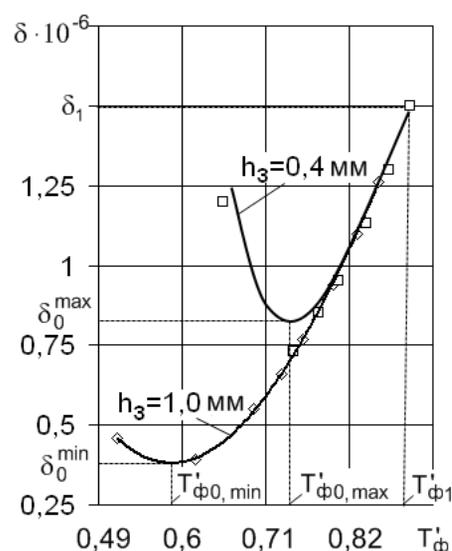


Рис. 10. Обработка колесной стали призматическим резцом марки Т14К8,  $\varphi = 75^\circ$ ,  $\gamma = 10^\circ$ ,  $\alpha = 8^\circ$ ,  $r = 4$  мм,  $r = 4$  мм,  $t = 8$  мм,  $s = 1,2$  мм/об,  $V = 38$  м/мин

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

### Библиографический список

1. Воробьев А. А. Ресурс и ремонтпригодность колесных пар подвижного состава железных дорог: монография / А. А. Воробьев и др.; под ред. проф. И. А. Иванова. — М.: ИНФРА-М, 2011. — 264 с.
2. Крутько А. А. Повышение эффективности восстановительной токарной обработки железнодорожных колесных пар: монография / А. А. Крутько, В. С. Кушнер, А. А. Воробьев. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2013. — 176 с.

3. Кушнер В. С. Влияние структуры и механических характеристик колесных сталей на изнашивание и режимы восстановления профиля колесных пар: монография / В. С. Кушнер и др.; под ред. И. А. Иванова и В. С. Кушнера; Минобрнауки России, ОмГТУ. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. — 224 с.
4. Воробьев А. А. Совершенствование технологии восстановления колесных пар: монография / А. А. Воробьев // LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. — 2011. — 186 с.
5. Воробьев А. А. Finite element method for transport applications: монография / А. А. Воробьев и др. // Silesian university of technology Gliwice. — 2011. — 208 с.
6. Воробьев А. А. Совершенствование технологии ремонта колес железнодорожного подвижного состава: монография / А. А. Воробьев, А. М. Перепеченов, М. С. Буянов // Военная академия материально-технического обеспечения им. Генерала армии А. В. Хрулева. Военный институт (Железнодорожных войск и военных сообщений), СПб.: Петергоф, 2020. — 104 с.
7. Повышение работоспособности колесных пар подвижного состава: монография / О. С. Валинский, А. А. Воробьев, С. И. Губенко и др.; под ред. И. А. Иванова. — Казань: Бук, 2022. — 324 с.
8. Воробьев А. А. Оценка напряженно-деформированного состояния и прочности режущего инструмента при обточке железнодорожных колес / А. А. Воробьев, Д. А. Потахов, А. А. Крутько, В. И. Фисенко // Омский научный вестник. — 2015. — № 140. — С. 62–66.
9. Воробьев А. А. Анализ условий работы твердосплавного инструмента в тяжелых условиях обработки колесных сталей / А. А. Воробьев, В. С. Кушнер, А. А. Крутько и др. // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. — 2015. — № 3(31). — С. 24–29.
10. Макаров А. Д. 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.
11. Крутько А. А. Расчет температуры при резании закаленных сталей на основе термомеханического подхода / А. А. Крутько, А. М. Бадамшин // Техника и технологии машиностроения: материалы VIII Международной научно-технической конференции, Омск, 22–25 мая 2019 г. — Омск: Омский государственный технический университет, 2019. — С. 212–217.
12. Кушнер В. С. 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.
13. Кушнер В. С. Влияние температуры и напряжений на интенсивности формоизменения режущего лезвия при обработке никелевых сплавов / В. С. Кушнер, А. Н. Жавнеров, В. А. Горшенин // Омский научный вестник. — 2007. — № 3(60). — С. 26–28.
14. Тимошенко С. П. Теория упругости: Пер. с англ. / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер; под ред. Г. С. Шапиро. — 2-е изд. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. — 560 с.

**Исследования, выполняемые по данной тематике, проводились в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет-2030».**

Дата поступления: 27.05.2022

Решение о публикации: 30.08.2022

**Контактная информация:**

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — д-р техн. наук, доц.; 79219751198@yandex.ru

КРУТЬКО Андрей Александрович — канд. техн. наук, доц.; andrey\_904@mail.ru

СЕДЫХ Дарья Александровна — канд. техн. наук, доц.; lebedevada@list.ru

## Investigation of Tense State of Carbide Instrument at Turning Treatment of Railway Wheels

A. A. Vorobyev<sup>1</sup>, A. A. Krutko<sup>2</sup>, D. A. Sedykh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

<sup>2</sup>Omsk state technical University, 11, pr. Mira, Omsk, 644050, Russian Federation

**For citation:** Vorobyev A. A., Krutko A. A., Sedykh D. A. Investigation of Tense State of Carbide Instrument at Turning Treatment of Railway Wheels // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 479–488. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-479-488

### Summary

**Purpose:** Investigation of the tense state of carbide cutting instrument at turning treatment of railway wheels.

**Methods:** Influence of temperatures and forces on wear and plastic deformation of hard alloy is estimated using mathematical modeling and Mitchell methods as well as on thermomechanical approach basis. **Results:** The stress-strain state of cutting plates was evaluated and the analysis of wear shape was carried out which revealed that increase in wear chamfer occurs along back surface mainly in the vicinity of cutter tip. It is shown that shape stability temperature and tangential tensity are the factors affecting treatment conditions and wear rate of cutting plate. **Practical significance:** Dependences have been determined that allow assigning rational modes of treatment of railway wheel pairs during repairment.

**Keywords:** Wheel profile, cutting wedge, shape stability temperature, tangential tensities, deformation.

### References

1. Vorob'ev A. A. *Resurs i remontoprigradnost' kolesnykh par podvizhnogo sostava zheleznykh dorog* [Resource and maintainability of wheel sets of railway rolling stock]. Moscow: INFRA-M Publ., 2011. 264 p. (In Russian)
2. Krut'ko A. A., Kushner V. S., Vorob'ev A. A. *Povyshenie effektivnosti vosstanovitel'noy tokarnoy obrabotki zheleznodorozhnykh kolesnykh par* [Improving the efficiency of restorative turning of railway wheelsets]. Omsk : OmGTU Publ., 2013. 176 p. (In Russian)
3. Kushner V. S. *Vliyaniye struktury i mekhanicheskikh kharakteristik kolesnykh staley na iznashivaniye i rezhimy vosstanovleniya profilya kolesnykh par* [Influence of the structure and mechanical characteristics of wheel steels on wear and modes of restoration of the wheel pair profile]. Omsk: OmGTU Publ., 2015. 224 p. (In Russian)
4. Vorob'ev A. A. *Sovershenstvovaniye tekhnologii vosstanovleniya kolesnykh par* [Improving wheelset recovery technology]. 2011. 186 p. (In Russian)
5. Vorob'ev A. A. *Finite element method for transport applications* / Silesian university of technology gliwice, 2011. 208 p.
6. Vorob'ev A. A., Perepechenov A. M., Buyanov M. S., Fiskevich A. S., Fedorchenko A. A. *Sovershenstvovaniye tekhnologii remonta koles zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava: monografiya. Voennaya akademiya material'no-tekhnicheskogo obespecheniya im. Generala armii A. V. Khruleva. Voennyi institut (Zheleznodorozhnykh voysk i voennykh soobshcheniy)* [Improving the technology of repair of wheels of railway rolling stock: monograph. Military Academy of Logistics. Army General A. V. Khruleva. Military Institute (Railway Troops and Military Communications)]. St. Petersburg: Petergof Publ., 2020. 104 p. (In Russian)
7. Valinskiy O. S., Vorob'ev A. A., Gubenko S. I. *Povyshenie rabotosposobnosti kolesnykh par podvizhnogo sostava* [Improving the performance of wheel sets of rolling stock]. Kazan': Buk Publ., 2022. 324 p. (In Russian)

8. Vorob'ev A. A. Otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i prochnosti rezhushchego instrumenta pri obtochke zhelezodorozhnykh koles [Evaluation of the stress-strain state and strength of the cutting tool when turning railway wheels]. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin]. 2015, I. 140, pp. 62–66. (In Russian)

9. Vorob'ev A. A., Kushner V. S., Krut'ko A. A., Krut'ko A. A. Analiz usloviy raboty tverdosplavnogo instrumenta v tyazhelykh usloviyakh obrabotki kolesnykh staley [Analysis of the working conditions of a hard-alloy tool under severe conditions for processing wheel steels]. *Vestnik Instituta problem estestvennykh monopolii: Tekhnika zheleznykh dorog* [Bulletin of the Institute for Problems of Natural Monopolies: Railway Engineering]. 2015, I. 3(31), pp. 24–29. (In Russian)

10. Makarov A. D. Vliyanie sredney temperatury kontakta pri rezanii na osnovnye kharakteristiki kachestva poverkhnostnogo sloya [Influence of the average contact temperature during cutting on the main characteristics of the quality of the surface layer]. *Teplofizika tekhnologicheskikh protsessov* [Thermophysics of technological processes]. Kuybyshev: Kn. izd-vo Publ., 1970, pp. 270–275. (In Russian)

11. Krut'ko A. A. Raschet temperatury pri rezanii zakalennykh staley na osnove termomekhanicheskogo podkhoda [Calculation of temperature during cutting of hardened steels based on the thermomechanical approach]. *Tekhnika i tekhnologii mashinostroeniya: Materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Omsk, 22–25 maya 2019 goda* [Engineering and technology of mechanical engineering: Proceedings of the VIII International

Scientific and Technical Conference, Omsk, 22–25 May 2019]. Omsk: Omskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet Publ., 2019, pp. 212–217. (In Russian)

12. Kushner V. S., Storchak M. G., Vorob'ev A. A. Sovershenstvovanie rascheta temperatury pri rezanii na osnove termomekhanicheskogo podkhoda [Improving the calculation of temperature during cutting based on the thermomechanical approach]. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin]. 2009, I. 1(77), pp. 10–14. (In Russian)

13. Kushner, V. S. Vliyanie temperatury i napryazheniy na intensivnosti formoizmeneniya rezhushchego lezviya pri obrabotke nikelovykh splavov [Influence of temperature and stresses on the intensity of cutting blade shaping in the processing of nickel alloys]. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin]. 2007, I. 3(60), pp. 26–28. (In Russian)

14. Timoshenko S. P., Gud'er Dzh. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Moscow: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko – matematicheskoy literatury Publ., 1979. 560 p. (In Russian)

Received: May 27, 2022

Accepted: August 30, 2022

#### Author's information:

Alexander A. VOROBYEV — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; 79219751198@yandex.ru

Andrey A. KRUTKO — PhD in Engineering, Associate Professor; andrey\_904@mail.ru

Daria A. SEDYKH — PhD in Engineering, Associate Professor; lebedevada@list.ru