
**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ,
ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

УДК 662.34

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ БЛОКОВ ШЕСТЕРЕН
КОМБИНИРОВАННОЙ ОТДЕЛОЧНОЙ ОБРАБОТКОЙ**© 2025 г. А. Ю. Албагачиев¹, А. П. Яковлева^{1, 2}, А. Г. Караванова¹¹ *Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия*² *Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет), Москва, Россия*** e-mail: yakovleva525@mail.ru*

Поступила в редакцию 06.06.2024 г.

После доработки 09.12.2024 г.

Принята к публикации 20.12.2024 г.

При изготовлении зубчатых колес и блоков шестерен образуется большое количество брака из-за термических прижогов и трещин. В статье представлен процесс комбинированной отделочной обработки для снижения дефектов — прижогов и термических трещин на эвольвентной поверхности блоков шестерен. Проведены теоретические исследования влияния режимов комбинированной отделочной обработки на температуру в зоне резания, величину и знак остаточных напряжений после комбинированной отделочной обработки. Проведено сравнение полученных значений с экспериментальными исследованиями.

Ключевые слова: качество поверхности, блок шестерен, комбинированная отделочная обработка, остаточные напряжения, термические дефекты

DOI: 10.31857/S0235711925020065, **EDN:** DHCGUE

В авиационной промышленности изготавливают большое количество зубчатых колес, в том числе и блоков шестерен. Их применяют в двигателях самолетов. К этим деталям применяют высокие требования по надежности и долговечности. Блоки шестерен — это сложные детали, включающие цилиндрическое и коническое колесо, с внешним зацеплением и модулем от 2.5 мм до 4 мм (рис. 1). Эти блоки изготавливают из сталей 16ХЗНВФМБ-Ш, 16ХЗНВФМБ и др. При изготовлении этих деталей требуется обеспечить: высокую степень точности венца (согласно ГОСТ 1643-81), минимальную шероховатость эвольвентных профилей зубьев $Ra = 0.16\text{--}0.2$ мкм, отсутствие термических прижогов и трещин. Кроме этого требуется обеспечить параметры качества поверхностного слоя: микротвердость, глубину упрочнения и сжимающие остаточные напряжения.

Точность размеров, формы и качество поверхностных слоев формируется на окончательных операциях технологического процесса. Применения зубошлифования, как окончательной операции, приводит к возможности получения прижогов, трещин, а так же скрытых дефектов. Это является причиной появления большого количества брака при изготовлении блоков шестерен [1–3].

Для решения этой задачи был разработан метод комбинированной отделочной обработки (КОО), который заключается в последовательном применении зубошлифования и зубохонингования. В настоящей статье сделано предположение, что после



Рис. 1. Пример блока шестерен в авиационном двигателе.

КОО на поверхности не будут образовываться прижоги и термические трещины, а так же возможно снижение шероховатости поверхности и образования в поверхностном слое благоприятных сжимающих напряжений. Для проверки этих предположений необходимо разработать теоретические зависимости температуры в зоне резания и остаточных напряжений от режимов комбинированной отделочной обработки.

Теоретические зависимости для определения температуры при шлифовании и зубошлифовании подробно рассмотрено в работах В. А. Кузнецова, А. Н. Резникова, В. П. Анцупова, А. Г. Сулова, О. А. Горленко, Г. И. Грановского, В. Н. Подураева, В. П. Калинина и др. Однако при зубохонинговании этими зависимостями воспользоваться нельзя, т.к. эти процессы принципиально различаются: при зубохонинговании происходит прижим заготовки к хону, а при зубошлифовании нет. При этом важно понимать, на сколько температура будет отличаться в зоне обработки при КОО, чтобы прогнозировать отсутствие дефектов в виде прижогов и трещин.

Вопросам хонингования посвящены работы [4, 5], однако недостаточно исследовано изменение температуры при различных режимах обработки, в том числе с учетом силы прижима зубчатого хона к детали. Поэтому эта задача является актуальной.

При определении температуры в зоне зубохонингования закон теплового распределения является важнейшей характеристикой. В процессе обработки возникает несколько источников теплоты. Чтобы определить тепловую мощность, необходимо: определить общее количество теплоты процесса и распределение его между конкретными источниками, возникающими в процессе обработки.

При этом необходимо принять некоторые допущения: 1) количеством теплоты, уходящим со стружкой, можно пренебречь; 2) процесс зубохонингования происходит без СОЖ; 3) распределение теплового потока на поверхности хона и блока шестерен принять одинаковыми.

Таким образом, $Q_{\text{общ}} = Q$.

Составим уравнение распределения количества теплоты

$$Q = Q_1 + Q_2, \quad (1)$$

где Q_1 — количество теплоты, полученное хонем; Q_2 — количество теплоты, полученное деталью.

Определим количество теплоты, образовавшееся во время хонингования

$$Q_{\text{общ}} = Pvt, \quad (2)$$

где P — сила прижатия хона к детали; v — скорость резания; t — время контакта.

Получаем

$$Q_1 + Q_2 = Pvt. \quad (3)$$

Определим количество теплоты, полученное хонем:

$$Q_1 = \rho_1 V_1 C_1 \theta_1, \quad (4)$$

где ρ_1 — плотность материала хона; V_1 — объем нагрева контактной зоны хона; C_1 — удельная теплоемкость материала хона; θ_1 — температура нагрева.

Определим количество теплоты в поверхностном объеме колеса:

$$Q_2 = \rho_2 V_2 C_2 \theta_2, \quad (5)$$

где ρ_2 — плотность материала колеса; V_2 — объем прогревания зоны контакта; C_2 — удельная теплоемкость материала; θ_2 — температура нагрева; $\theta_1 = \theta_2$, поскольку температура в зоне контакта одинаковая.

Объем прогревания хона находится по формуле

$$V_1 = h_1 A, \quad (6)$$

где $h_1 = 1.73 \sqrt{\frac{\lambda_1}{C_1 \rho_1}} t$ — глубина распространения теплового импульса в хоне; A — площадь пятна контакта хона и колеса (одинакова при расчете V_1 и V_2); λ_1 — теплопроводность хона; t — время контактирования хона с колесом (одинаково при расчете V_1 и V_2).

Подставив формулу для расчета глубины распространения теплового импульса в формулу (6), получаем

$$V_1 = 1.73 A \sqrt{\frac{\lambda_1}{C_1 \rho_1}} t. \quad (7)$$

Аналогично получаем формулу для расчета объема прогревания колеса

$$V_2 = 1.73 A \sqrt{\frac{\lambda_2}{C_2 \rho_2}} t, \quad (8)$$

где h_2 — глубина распространения теплового импульса в детали; A — площадь пятна контакта (одинакова при расчете V_1 и V_2); λ_2 — теплопроводность инструмента; t — время контактирования колеса с хонем (одинаково при расчете V_1 и V_2).

Подставив (4), (5), (7), (8) в выражение (3), получаем

$$\rho_1 1.73 A \sqrt{\frac{\lambda_1}{c_1 \rho_1}} t c_1 \theta + \rho_2 1.73 A \sqrt{\frac{\lambda_2}{c_2 \rho_2}} t c_2 \theta = Pvt.$$

Упростив выражение, получаем

$$1.73 A \theta \sqrt{t} \left(\rho_1 c_1 \sqrt{\frac{\lambda_1}{C_1 \rho_1}} + \rho_2 c_2 \sqrt{\frac{\lambda_2}{C_2 \rho_2}} \right) = Pvt, \quad (9)$$

где $a = \sqrt{\frac{\lambda}{C\rho}}$ — температуропроводность, м²/с.

Из формулы (9) для расчета средней температуры пятна контакта при зубохонинговании θ , получаем

$$\Delta\theta = \frac{Pv\sqrt{t}}{1.73A(\sqrt{\lambda_1\rho_1c_1} + \sqrt{\lambda_2\rho_2c_2})}, \quad (10)$$

где P — нормальная сила хонингования, Н; v — результирующая скорость, м/с; t — время контакта хона с колесом, с; A — площадь срезаемого слоя, м²; ρ_1 и ρ_2 — плот-

ность хона и обрабатываемого материала, $\text{кг}/\text{м}^3$; c_1 и c_2 — удельная теплоемкость материала хона и обрабатываемого материала, $\text{Дж}/\text{кг}\cdot^\circ\text{C}$; λ_1 и λ_2 — теплопроводность материала хона и обрабатываемого материала, $1/\text{град}$.

Площадь срезаемого слоя определена во многих работах, но наиболее рациональная зависимость предложена Е. П. Калининым [5, 6] при зубошлифовании:

$$A = 0.11\sqrt{rS_{\text{рад}}}\left(\pi\sqrt{S_{\text{рад}}D_{\text{кр}}}+2S_{\text{пр}}\right), \quad (11)$$

где r — радиус основной окружности зубчатого колеса; $S_{\text{рад}}$ — радиальная подача; $S_{\text{пр}}$ — продольная подача круга; $D_{\text{кр}}$ — диаметр круга.

Зависимость (11) можно использовать при определении площади срезаемого слоя при зубохонинговании:

$$A = 0.11\sqrt{rS_{\text{рад}}}\left(\pi\sqrt{S_{\text{рад}}D}+2S_{\text{пр}}\right), \quad (12)$$

где r — радиус основной окружности эвольвентного профиля детали; $S_{\text{рад}}$ — радиальная подача хона; $S_{\text{пр}}$ — продольная подача хона; D — диаметр хона.

Таким образом, выведена теоретическая зависимость средней температуры в зоне контакта при зубохонинговании с учетом принятых допущений.

Для проверки адекватности теоретической зависимости и правильности сделанных ранее предположений были проведены серии экспериментов — проведено измерение температуры при зубошлифовании и зубохонинговании. Изменение проводили на приборе Smart Sensor AR872D (рис. 2а). Поверхностные дефекты определяли на приборе Infinite Focus G5 Alicona. Образцы вырезали из блоков шестерен после зубошлифования и после зубохонингования (рис. 2б). Режимы обработки при КОО подробно описаны в [7, 8].

Исследования показали, что после зубошлифования на поверхности визуализируются поверхностные дефекты в виде прижогов (красные пятна) (рис. 2в — 1), а после зубохонингования таких дефектов не наблюдается (рис. 2в — 2).

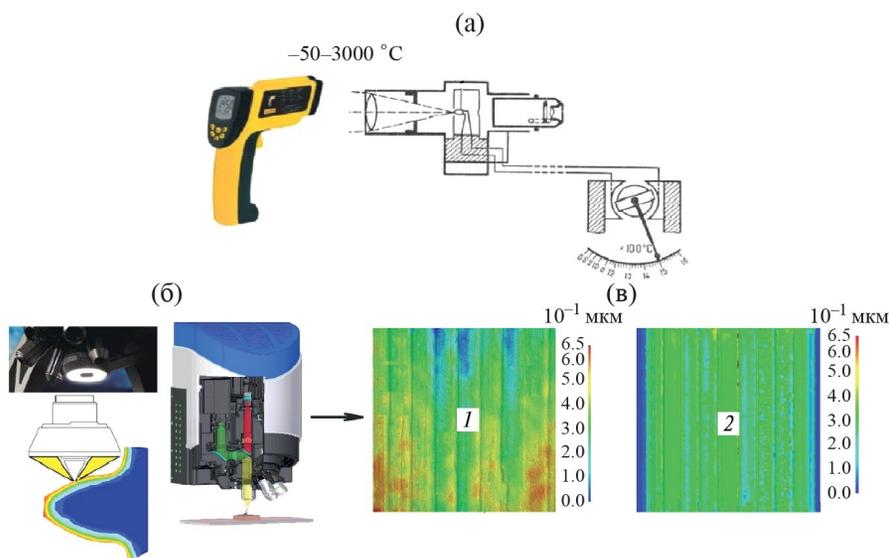


Рис. 2. Измерение температуры при комбинированной отделочной обработке: (а) — прибор для измерения; (б) — методика определения дефектов в зоне обработки образцов; (в) — веерная структура поверхности зубьев после зубошлифования (1) и зубохонингования (2).

Результаты измерения температуры для различных режимов зубошлифования и зубохонингования представлены на рис. 3а, б.

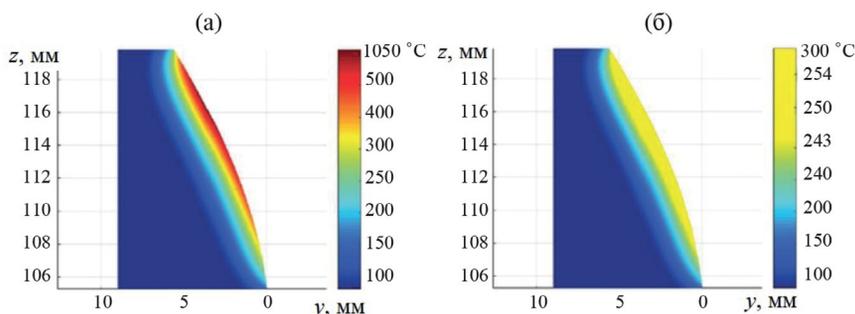


Рис. 3. Результаты замеров температуры при комбинированной отделочной обработке: (а) — зубошлифование; (б) — зубохонингование.

Температура при обработке блоков шестерен методом зубошлифования достигла значений 1050–600 °С, методом зубохонингования 200–300 °С.

Одним из основных параметров качества поверхности являются остаточные напряжения. В работах [7, 10, 11] доказано, что после шлифования в поверхностном слое образуются растягивающие остаточные напряжения. Это снижает усталостную прочность деталей [1, 3, 10]. Эти остаточные напряжения формируются за счет быстрого нагрева поверхностных слоев в процессе обработки до температур выше структурных превращений [11, 12]. При зубохонинговании температуры значительно ниже, поэтому было сделано предположение, что после зубохонингования в поверхностном слое могут образоваться сжимающие остаточные напряжения. Для проверки этого предположения проведены серии теоретических и практических исследований.

В работах А. А. Фадеева, Ю. И. Няшина, П. В. Трусова и др. [13–16] доказано, что остаточные напряжения, образующиеся на поверхности, при различных видах обработки, складываются из нескольких составляющих:

$$\sigma_{\text{ост}} = \sigma_1 + \sigma_2 + \dots + \sigma_n.$$

При КОО окончательное формирование величины и знака остаточных напряжений будет проходить в процессе зубохонингования. При КОО остаточные напряжения будут складываться из следующих составляющих:

$$\sigma_{\text{ост}} = \sigma_{\text{тем}} + \sigma_{\text{мех}} + \sigma_{\text{с.-ф.}}$$

где $\sigma_{\text{тем}}$ — температурные остаточные напряжения; $\sigma_{\text{мех}}$ — механические остаточные напряжения; $\sigma_{\text{с.-ф.}}$ — структурно-фазовые напряжения.

На температурную составляющую влияние будет оказывать температура при зубохонинговании, на механические остаточные напряжения будет влиять величина срезаемого слоя и на структурно-фазовые напряжения — физико-механические свойства материалов. При этом основное формирование остаточных напряжений будет осуществляться только при изменении температуры в зоне контакта. Поэтому механической составляющей и структурно-фазовой составляющей можно пренебречь: структурных изменений не происходит при зубохонинговании и величина срезаемого слоя металла мала по сравнению с другими методами механической обработки.

Однако формула (10) не позволяет провести расчет распределения температуры при хонинговании по глубине от контактной поверхности. Представленная

зависимость позволяет определить температуру только на поверхности, а при расчете температурной составляющей остаточных напряжений важно знать распределение температуры по глубине.

Для этого случая необходимо решать уравнения теплопроводности Фурье в частных производных

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2}. \quad (11)$$

С начальным условием: $\Theta = 0$ при $t = 0$ и граничными условиями

$$-\lambda \frac{\partial \Theta}{\partial z} = \frac{PVt}{A}, \quad \Theta = 0 \text{ при } z = \infty.$$

Уравнение (11) решаем методом преобразования Лапласа

$$\Theta(z, t) = \frac{(1 - \alpha_T)PV}{\sqrt{\pi A \lambda}} \left\{ 2\sqrt{at} \exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right) - Z \left[1 - \Phi\left(\frac{Z}{2\sqrt{at}}\right) \right] \right\}, \quad (12)$$

где $\alpha_T = \frac{\sqrt{\lambda_1 C_1 \rho_1}}{\sqrt{\lambda_1 C_1 \rho_1} + \sqrt{\lambda_2 C_2 \rho_2}}$ — коэффициент распределения тепловых потоков между хонем и колесом.

При $Z = 0$ формула расчета контактной температуры принимает вид

$$\Theta(z, t) = \frac{2(1 - \alpha_T)PV\sqrt{at}}{\sqrt{\pi A \lambda}}.$$

Таким образом, температурная составляющая остаточных напряжений, а следовательно, и напряжений при КОО можно рассчитать по формуле

$$\sigma = \alpha E \frac{(1 - \alpha_T)PV}{\sqrt{\pi A \lambda}} \left\{ 2\sqrt{at} \exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right) - Z \left[1 - \Phi\left(\frac{Z}{2\sqrt{at}}\right) \right] \right\},$$

где α — коэффициент линейного расширения; E — модуль упругости.

Для проверки теоретической зависимости проведены эксперименты: остаточные напряжения после КОО измеряли по методике Довиденкова на автоматизированном комплексе МерКулОн «Тензор-3» (рис. 4). Образцы, вырезанные из блоков шестерен травили в электролите. Точный расчет глубины стравленных слоев проводили по количеству пропущенного электрического тока по специальной программе «Радиус».

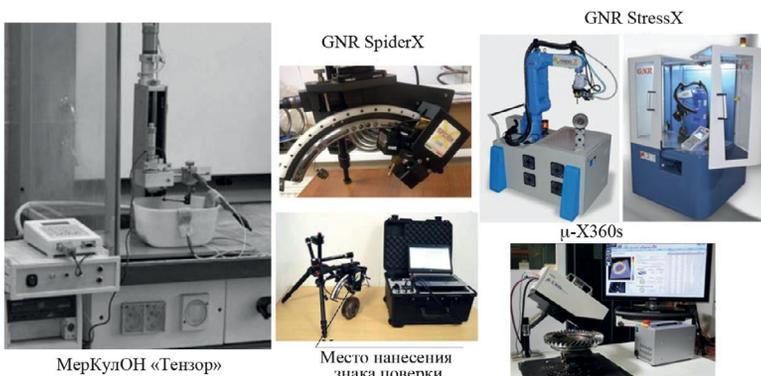


Рис. 4. Теоретическое определение величины и знака остаточных напряжений после КОО на приборе МерКулОн «Тензор».

На рис. 5 представлены результаты измерений остаточных напряжений. После первого рабочего хода значение остаточных сжимающих напряжений равно 220 МПа (рис. 5, кривая 1), но после второго рабочего хода значение сжимающих остаточных напряжений увеличивается до 600 МПа и плавно снижается до 300 МПа по мере удаления от поверхности (рис. 5, кривая 2).

Таким образом, подтвердилось правильность сделанных предположений. На поверхности блоков шестерен не будут образовываться термические дефекты и прижоги после КОО. Кроме того: 1) зубошлифованием обеспечивается заданная точность размеров, формы и взаимного положения, но при этом образуются термические трещины, прожоги и растягивающие остаточные напряжения; 2) после зубохонингования удаляются поверхностные дефекты в виде прижогов и термических трещин и образуются сжимающие остаточные напряжения.

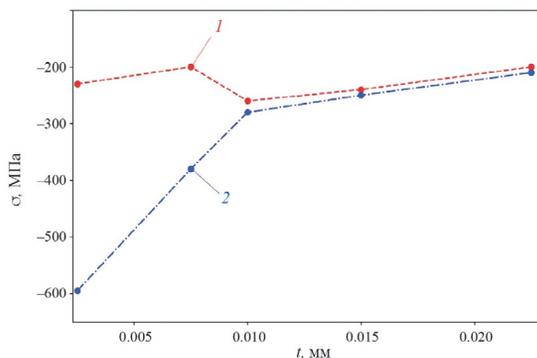


Рис. 5. Результаты измерений остаточных напряжений: 1 — после первого рабочего хода; 2 — после второго рабочего хода.

Таким образом, установлена взаимосвязь режимов обработки и температуры в зоне резания при КОО; впервые получена теоретическая зависимость температуры от режимов при зубохонинговании с учетом особенностей процесса резания; установлена взаимосвязь остаточных напряжений и режимов обработки при КОО; получена теоретическая зависимость остаточных напряжений от режимов при КОО.

В перспективе развития данной тематики планируется разработать компьютерную программу на языке Python для расчета температуры и остаточных напряжений.

Финансирование. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Института машиноведения им. А. А. Благонравова РАН и МГТУ им. Н. Э. Баумана. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. У авторов нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горленко О. А., Бишутин С. Г. Методология аналитического исследования процесса формирования функциональных параметров качества поверхностей деталей машин при шлифовании // Славянтрибо-4: материалы междунар. науч.-практич. симпозиума. Рыбинск, 1997. Ч. 3. С. 43.
2. Сулов А. Г., Бишутин С. Г., Захаров Л. А. Исследование процесса обработки плоских поверхностей абразивными брусками // Проблемы определения технологических условий по заданным показателям качества изделий: матер. российской науч.-техн. конф. Рыбинск, 2003. С. 222.
3. Лурье Г. Б. Шлифование металлов. М.: Машиностроение, 1991. 75 с.

4. Полянчиков Ю. Н., Секачев С. А., Усов В. В., Поступаев Ю. Н. Многокритериальная оптимизация процесса хонингования // Инструмент и технологии. 2002. № 7–8. С. 157.
5. Калинин Е. П. Оптимизация режимов профильного зубошлифования методом копирования с учетом затупления инструмента // Современные технологические в машиностроении, качество, точность, эффективность обработки материалов: материалы междунар. науч.-техн. конф. СПб.: ПИМаш, 2004. С. 46.
6. Калинин Е. П., Милиганов И. Е. Оптимизация режимов профильного шлицешлифования с учетом затупления инструмента // Прогрессивные технологии, машины и механизмы в машиностроении: материалы междунар. науч.-техн. конф. Калининград: КГТУ, 2002. С. 30.
7. Кузнецов В. А., Черепахин А. А., Смирнов А. В. Системный анализ и моделирование технологических методов изготовления детали. М.: Русайнс, 2019. 248 с.
8. Калашников А. С., Моргунов Ю. А., Аббясов В. М., Караванова А. Г. Технологические возможности повышения прочности цилиндрических зубчатых колес // Вестник машиностроения. 2022. № 2. С. 34.
9. Калашников А. С., Моргунов Ю. А., Караванова А. Г. Шлифование зубьев цилиндрических колёс червячными высокопористыми кругами // Международная научно-практическая конференция «Сборник научных трудов ИТМ». 2020. № 5. С. 234.
10. Горленко О. А., Бишутин С. Г. Модель рабочей поверхности абразивного инструмента // СТИН. 1999. № 2. С. 25.
11. Григорьянц А. Г., Сафонов А. Н., Майоров В. С., Басков А. Ф., Ивашов Г. П. Распределение остаточных напряжений на поверхности сталей, упрочненных непрерывным CO₂-лазером // Металловедение и термическая обработка металлов. 1987. № 9. С. 45.
12. Кузнецов В. А. Синтез и исследование технологических структур методов механической обработки поверхностей деталей машин: Дис. ... докт. техн. наук. Москва, 2000. 421 с.
13. Поздеев А. А., Няшин Ю. И., Трусов П. В. Остаточные напряжения: теория и приложения. М.: Наука, 1982. 112 с.
14. Поздеев А. А., Трусов П. В., Няшин Ю. И. Большие упругопластические деформации: теория, алгоритмы, приложения. М.: Наука, 1986. 232 с.
15. Yakovleva A. P., Albagachiev A. Y. Theoretical Investigation of the Influence of Combined Machining Modes on the Value and Character of Residual Stresses in the Surface Layer of Cylindrical Friction Pairs // J. of Mach. Manuf. and Reliab. 2020. V. 49 (3). С. 237.
16. Биргер И. А. Остаточные напряжения. Издание второе, М.: ЛЕНАНД, 2015. 234 с.