

УДК 621.91

**А. С. Калашников**, д.т.н., проф., **Ю. А. Моргунов**, к.т.н., проф., **П. А. Калашников**, к.т.н., доц., Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)

E-mail: [alexandr\\_kalashnikov45@rambler.ru](mailto:alexandr_kalashnikov45@rambler.ru)

## **Чистовая обработка зубьев хонингованием**

*Рассмотрены основные методы зубохонингования прямозубых и косозубых цилиндрических колёс внешнего зацепления. Изложено влияние скорости скольжения хона по профилю и длине зуба и следов резов на образование гидродинамической смазочной плёнки.*

**Ключевые слова:** цилиндрические зубчатые колёса, зубохонингование, инструмент с внутренним зацеплением, припуски, машинное время, шероховатость, точность.

**A. S. Kalashnikov, Yu. A. Morgunov, P. A. Kalashnikov**

## **Gear Finishing by Honing**

*We consider the basic methods of honing of spur and helical cylindrical gears of external engagement. We study the effect of the honing's sliding velocity on the profile and the length of the gear and traces of cuts to appearance of lubricant slick.*

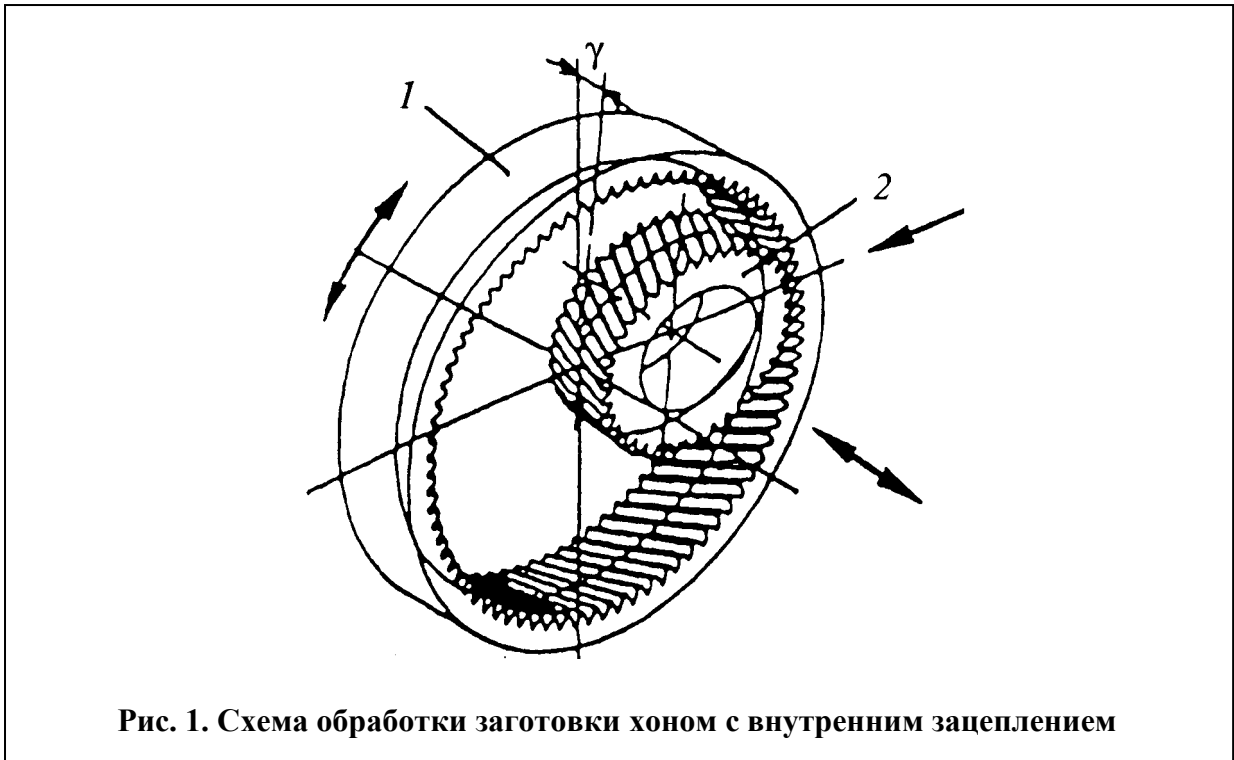
**Keywords:** spur and helical gears, gear honing, honing external tools, allowances, machinerunning time, roughness, accuracy.

**Зубохонингование** – процесс чистовой обработки зубьев закалённых цилиндрических колёс внешнего и внутреннего зацепления. Обработку производят зубчатыми хонами, режущими элементами которых являются хаотически расположенные на поверхности зубьев хона зёрна абразивного материала, алмазов или кубического нитрида бора.

В промышленности применяют два метода зубохонингования: инструментами с внешним и внутренним зацеплением зубьев [1].

Зубохонингование хонами с внутренним зацеплением обладает большими технологическими возможностями, поэтому этот процесс имеет преимущественное распространение в промышленности [4].

Зацепление зубчатого хона 1 с заготовкой 2 выполняют под углом скрещивания  $\gamma$  (рис. 1). При свободной кинематической связи ведущим элементом является хон, а при жёсткой кинематической связи вращение хона и заготовки осуществляют отдельно с высокой точностью синхронизации с помощью электронной системы управления



**Рис. 1. Схема обработки заготовки хонем с внутренним зацеплением**

Ширина хона больше ширины зубчатого венца. Кроме вращения зубчатый хон совершает радиальное движение подачи, а заготовка для улучшения условий резания осуществляет осевые осциллирующие движения, амплитуда которых должна быть не менее 3...4 мм.

Большой коэффициент перекрытия при зацеплении хона с зубьями обрабатываемой заготовки способствует исправлению погрешностей зубьев и повышению точности их обработки.

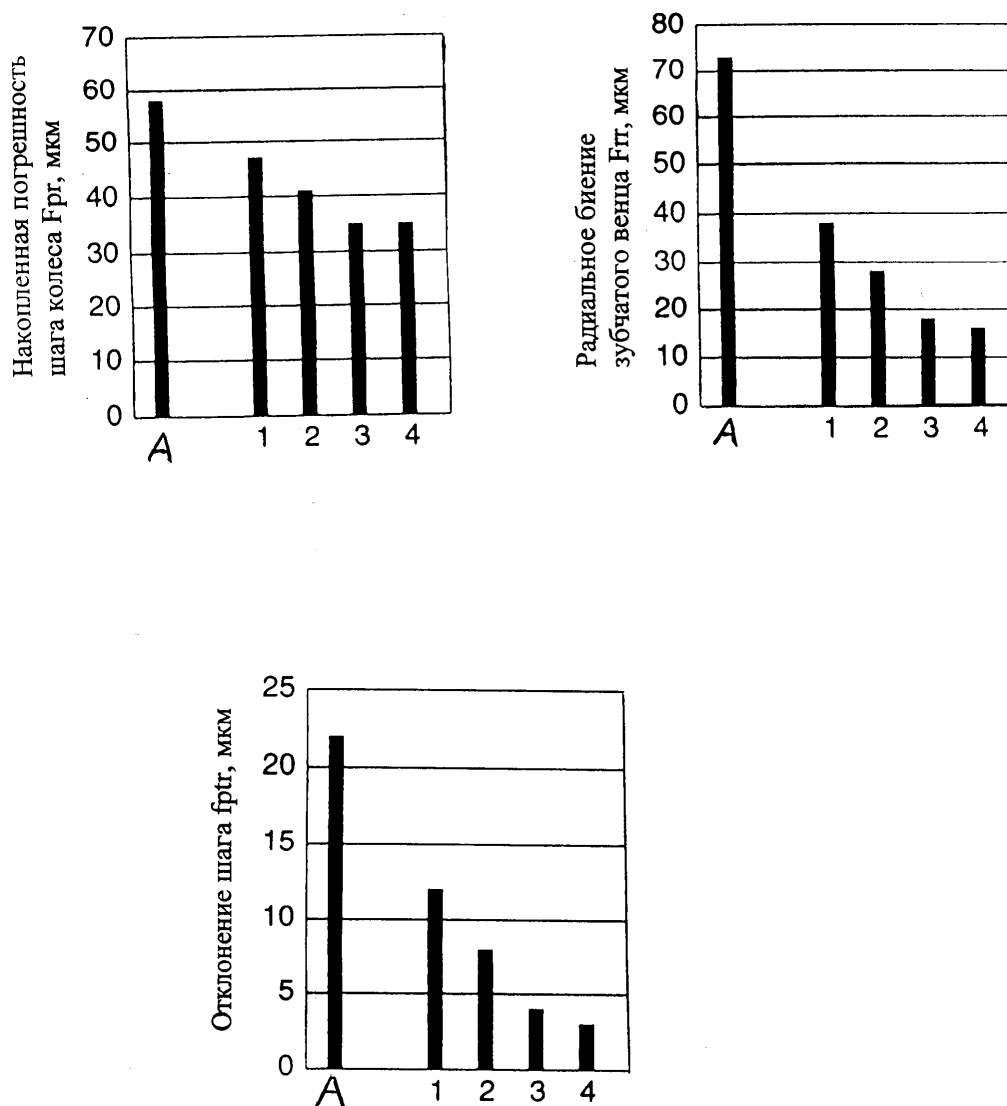
Зубохонингование хонем с внутренним зацеплением применяют в серийном и массовом производстве для уменьшения шероховатости поверхности до  $Ra = 0,1...0,8$  мкм, повышения точности зубьев на 1,2 степени (до 6-7 степени точности по ГОСТ 1643-81), снижения уровня шума при зацеплении зубьев и удаления небольших забоин и заусенцев.

Зубчатые хоны, используемые при зубохонинговании, могут быть правящими и неправящими. В качестве абразивного материала у правящих зубчатых хонем с внутренним зацеплением применяют электрокорунд высшего качества или микрокристаллический корунд с размером зерна 88...149 мкм.

Наиболее важной структурной составляющей не только объёмного строения хона, но и его технологических и эксплуатационных свойств является связка [2,3]. Для правящих хонем используют связки: керамическую и из эпоксидной искусственной смолы. Благодаря хрупкости и низким демпфирующим свойствам этих связок абразивные зёрна, имеющие критический износ, под действием силы резания выламываются из хона, открывая для работы лежащие ниже абразивные зёрна. Таким образом, обеспечивается самозатачивание инструмента.

Часто применяют следующее соотношение объёмных долей: абразив – 50%, связка – 40% и поры – 10%.

При исследовании процесса хонингования зубьев в качестве заготовок использовали косозубые цилиндрические колёса ( $z=59$ ;  $m=2,0$  мм;  $\alpha=20^\circ$ ;  $\beta=15^\circ$ ;  $b=36,0$  мм) из легированной стали 18ХГТ после зубофрезерования, зубошевингования и химико-термической обработки с твёрдостью поверхности зубьев HRC 58-63. Обработку производили правящимся абразивным хонем с внутренним зацеплением за 4 рабочих хода стола с углом скрещивания осей  $15^\circ$ . Режимы обработки: скорость подачи стола 200 м/мин, радиальная подача 0,005 мм на ход стола, припуск на сторону зуба 0,015-0,020 мм, число обработанных заготовок между двумя правками 40 заготовки, время правки хона 1,6 мин.



**Рис. 2. Точность зубьев заготовок:**

А- перед зубохонингованием;  
 после 1, 2, 3 и 4- рабочих ходов при зубохонинговании

Проведённые в МГМУ «МАМИ» исследования показали, что зубохонингование обладает способностью существенно исправлять погрешности зубьев, возникающие на предыдущих операциях. Точность зубьев по накопленной погрешности шага  $F_{pr}$ , радиальному биению зубчатого венца  $F_{rr}$  и отклонению шага  $f_{pr}$  измеряли после выполнения каждого рабочего хода. Результаты измерения показали, что точность зубьев после 4-х рабочих ходов повышается в среднем в два раза (рис. 2). При последующих рабочих ходах (2-4 хода в зависимости от модуля обрабатываемого зубчатого колеса) точность зубьев повышается незначительно.

Штучное время обработки одной заготовки  $t_{шт} = 0,91$  мин, которое состояло из машинного  $t_m = 0,72$  мин, вспомогательного  $t_{всп} = 0,15$  мин и времени правки хона, приходящееся на одну заготовку  $t_{пр} = 0,04$  мин, свидетельствует о высокой производительности процесса зубохонингования.

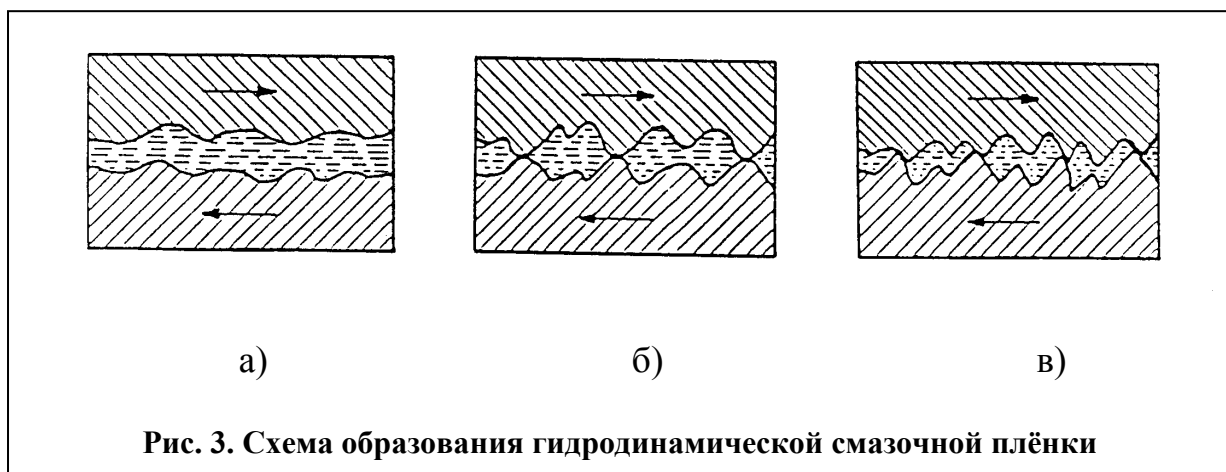
Особенностью процесса зубохонингования является достижение высоких показателей шероховатости поверхности зубьев. Совокупность неровностей с относительно малыми шагами, образующих микрорельеф боковых поверхностей зубьев, является важнейшим показателем качества зацепления зубчатых передач [4,5]. Микрорельеф поверхности зубьев оказывает существенное влияние на качество эксплуатации зубчатых передач:

- виброакустическую активность под воздействием высоких частот;
- удержание смазочной плёнки на поверхности зубьев;
- продолжительность периода обкатки зубчатой передачи, при котором технологический рельеф зубьев становится эксплуатационным.

Для определения влияния параметров и структуры неровностей микрорельефа поверхности зубьев на условия их контакта при зацеплении и воздействия гидродинамической смазки были проведены сравнительные испытания коробок перемены передач легкового автомобиля при средних нагрузках. Чистовую обработку зубьев цилиндрических колёс (модуль  $m = 2$  мм, угол профиля  $\alpha = 20^\circ$ ) производили фрезерованием, шевингованием, шлифованием и хонингованием.

У окончательно фрезерованных до ХТО методом обката цилиндрических колёс шероховатость боковых поверхностей зубьев составляла  $R_a = 2,5 - 3,8$  мкм. Структура неровностей определялась следами огибающих резцов червячной фрезы. Испытания таких колёс показали значительный износ поверхности зубьев в результате металлического трения (рис. 3, в).

Зубчатые колёса, изготовленные шевингованием ( $R_a = 1,25 - 2,0$  мкм) и шлифованием ( $R_a = 0,5 - 2,0$  мкм) имели незначительный износ зубьев, главным образом, по вершинам микронеровностей в результате смешанного трения (рис. 3, б).



**Рис. 3. Схема образования гидродинамической смазочной плёнки**

Боковые поверхности хонингованных зубьев цилиндрических колёс имели самый низкий параметр шероховатости  $Ra$  0,25 – 0,5 мкм и при испытании у зубьев практически отсутствовал металлический контакт и износ (рис. 3, а).

В результате проведённых испытаний было установлено, что низкие параметры шероховатости хонингованных зубьев, а также веерная структура расположения неровностей от следов резов позволяет при зацеплении стабильно удерживать на поверхности зубьев смазочную плёнку толщиной 3-5 мкм и тем самым минимизировать износ.

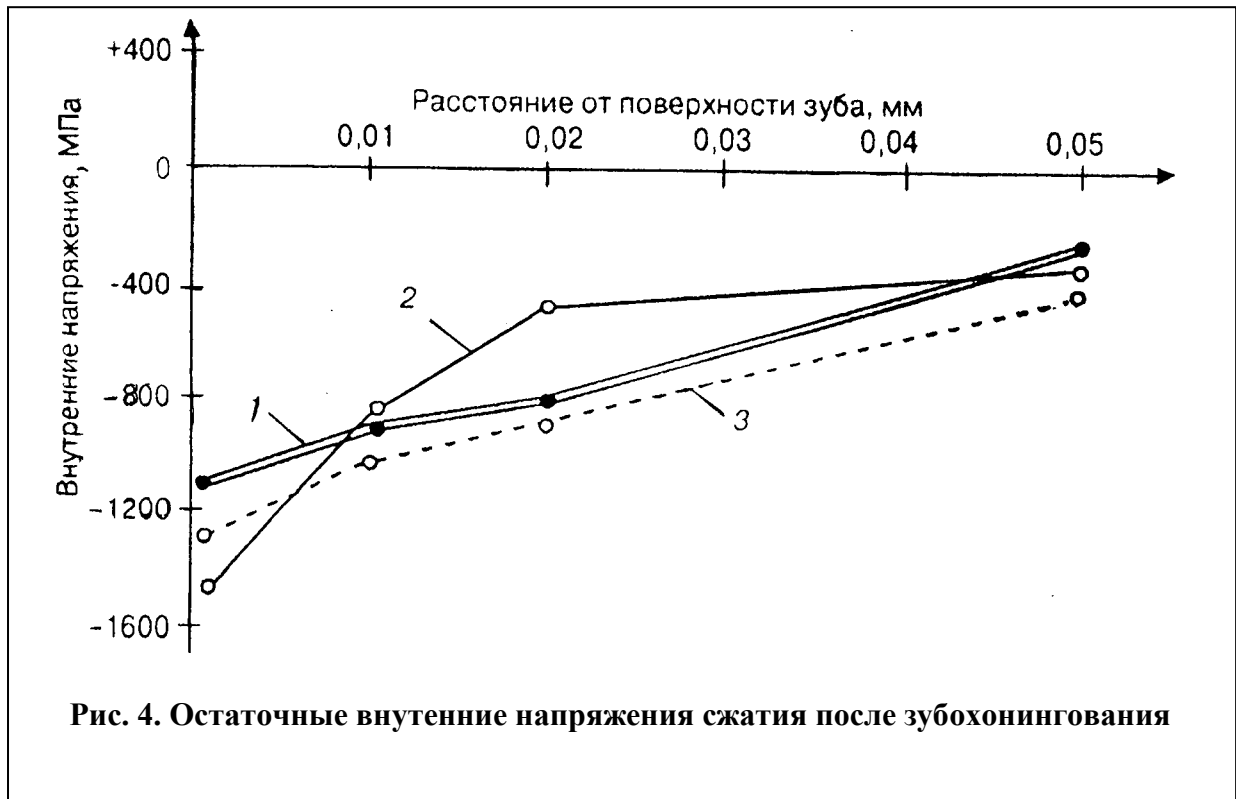
Известно, что образование в поверхностных слоях зубьев внутренних напряжений сжатия повышает их контактную выносливость, которая характеризуется сопротивлением типовым отказам рабочих поверхностей зубьев – питингу, микропитингу, износу под действием контактных нагрузок. При этом внутренние напряжения растяжения в поверхностных слоях снижают контактную выносливость зубьев [1, 5].

Зубохонингование относится к группе методов, выполняющих микрорезание твёрдых поверхностных слоёв зубьев большим числом не ориентированных в пространстве режущих элементов. Вследствие низких скоростей резания ( $V = 0,5...13,0$  м/с) мощность зубохонингования достаточно высокая. Поэтому в зоне резания преобладают не термические, а механические процессы и отсутствует термическое разрушение поверхностей зубьев. Количество теплоты и время её действия в контактной зоне недостаточно, чтобы вызвать термические изменения свойств поверхностных зон.

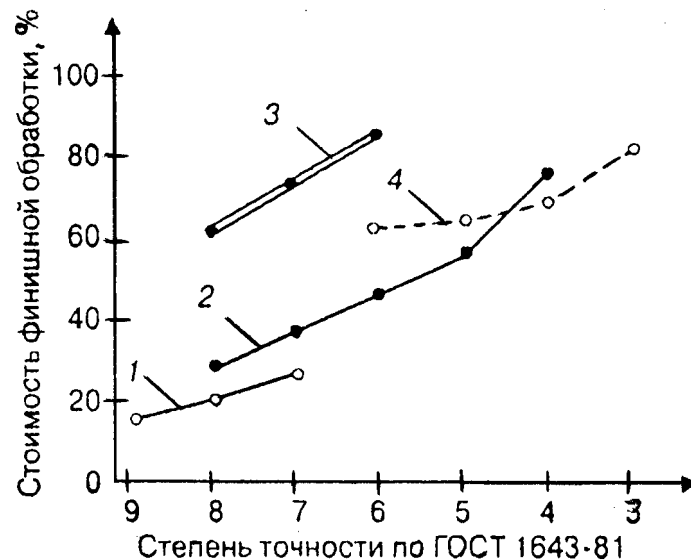
Так как механическое воздействие доминирует при зубохонинговании, поэтому в поверхностных слоях зубьев образуются остаточные внутренние напряжения сжатия, величина которых на поверхности достигает 900-1600 МПа. Глубина остаточных напряжений сжатия после зубохонингования может достигать 150 мкм.

На рис. 4 показан уровень остаточных внутренних напряжений сжатия, возникающих в поверхностном закалённом слое зубьев, после

хонингования правящимися абразивными хонами 3 и неправящимися алмазными 1 и хонами из кубического нитрида бора 2. Максимальные значения внутренних напряжений сжатия получают при обработке металлическими зубчатыми хонами с однослойным покрытием зёрнами кубического нитрида бора. Такие хоны обладают высокой жёсткостью и допускают большие радиальные и окружные подачи при низкой окружной скорости.



Проведённый технико-экономический анализ чистовой обработки зубьев цилиндрических колёс методами: зубошевингования 1, зубохонингования абразивными правящими хонами 2, зубофрезерования твёрдосплавными червячными фрезами 3 и зубошлифования червячными шлифовальными кругами 4 позволил определить эффективную область применения этих методов (рис. 5).



**Рис. 5. Стоимость чистовой обработки зубьев и достигаемая точность**

В качестве критериев оценки использовали стоимость чистовой обработки и достигаемую степень точности по ГОСТ 1643-81.

В результате анализа было установлено:

1. Наименее затратным методом является зубошевингование. Однако этим методом стабильно достигают только 7-ю степень точности, которая для большинства современных механизмов и машин является низкой.

2. Самым эффективным с экономической точки зрения является метод зубохонингования. В качестве недостатков зубохонингования следует отметить высокую чувствительность к колебанию припусков после химико-термической обработки.

3. Непрерывное обкатное зубошлифование абразивным червячным кругом экономически менее эффективно, чем зубохонингование абразивным хонем, но менее зависимо от качества предварительной обработки и более стабильно в достижении точностных параметров зубьев.

4. Зубофрезерование твёрдосплавной червячной фрезой по стоимости существенно превышает остальные методы, поэтому оно применяется, главным образом, в единичном и мелкосерийном производстве, когда для обработки зубьев до и после химико-термической обработки можно использовать только один станок.

#### Список литературы

1. **Калашников А.С., Моргунов Ю.А., Калашников П.А.** Современные методы обработки зубчатых колёс. Издательский дом «Спектр», Москва, 2012, 238 с.

2. **Шандров Б.В., Моргунов Ю.А., Калашников П.А.** Экспериментальные исследования припусков при непрерывном обкатном

зубошлифовании . Справочник. Инженерный журнал №11,2007. М.: Машиностроение. С. 17-22.

3. **Шандров Б.В., Моргунов Ю.А., Саушкин Б.П.** Развитие и применение наукоёмких технологий в производстве летательных аппаратов. Журнал «Известия МГТУ «МАМИ», 2013, №2(16), Т.2, С. 278-283.

4. **Калашников А.С.** Технология изготовления зубчатых колёс. М.: Машиностроение, 2004. 479 с.

5. **Виноградов В.М., Черепяхин А.А.** Критерии оптимизации зубообрабатывающих операций, основанных на различных методах формирования зубьев. М., «Известия МГТУ «МАМИ», № 2 (14), том 2, 2012, С. 238-242.