

## Modern Methods of Cylindrical Gear Wheels Finishing

*Gear-grinding is one of the most wide-spread methods of cylindrical gear wheels finishing. For several decades, the leading position in the sphere of continuous grinding equipment production has been occupied by the Swiss company Reishauer AG. Producing its machines Reishauer uses its own patented designs, for example, a unique planetary gear drive for billets. The machine family also includes machines for intermittent profile gear grinding.*

# СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЧИСТОВОЙ ОБРАБОТКИ зубьев цилиндрических колес

**Зубошлифование является одним из самых распространенных методов чистовой обработки цилиндрических зубчатых колес. В области производства оборудования для шлифования непрерывным обкатным методом на протяжении нескольких десятков лет лидирующее положение на мировом рынке занимает швейцарская компания Reishauer AG. При изготовлении станков Reishauer применяет собственные запатентованные разработки, например, оригинальный планетарный механизм для привода заготовки. В модельном ряду присутствуют также станки, позволяющие производить обработку методом прерывистого профильного зубошлифования.**

А.С. Калашников, д.т.н., профессор, директор представительства Reishauer AG, г. Москва (Россия)

В условиях рыночной экономики важной задачей для машиностроения является создание и производство конкурентоспособных машин и механизмов, обладающих высокими технико-экономическими показателями при малых массогабаритных размерах. Ее решение в значительной степени зависит от качества и эффективности изготовления и сборки основных деталей машин и механизмов. К таким деталям относятся и зубчатые передачи, имеющие исключительно широкое распространение во многих отраслях машиностроения.

Цилиндрические передачи внешнего зацепления с прямыми и косыми зубьями предназначены для сообщения механической энергии от одного вала другому, расположенному на параллельной оси. Высокий коэффициент полезного действия (97–98,5%), возможность передавать вращающие моменты с большими диапазонами передаточных чисел (1,0–20,0) и окружными скоростями до 200 м/с способствовали их широкому распространению в машиностроительной промышленности.

В табл. 1 рассматриваются наиболее часто применяемые в промышленности методы чистовой обработки зубьев цилиндрических колес. Технологический процесс, при котором колеса после предварительного зубонарезания ше-

вингуют, а затем подвергают химико-технической обработке (ХТО), доминировал в промышленности в 50–90-х годах прошлого столетия. В качестве инструмента при этом чаще всего используют дисковый шевёр, выполненный в виде прямоугольного или косозубого зубчатого колеса. Профиль зубьев шевёра имеет ряд мелких зубчиков, режущие кромки которых снимают волосовидные стружки. Обработка производится при свободной кинематической связи винтовой передачи — зубчатого колеса и дискового шевёра, установленных на перекрещивающихся осях и вращающихся в беззазорном зацеплении.

Зубошевингование является самым производительным среди рассматриваемых методов чистовой обработки. Возможность производить обработку с параллельным, диагональным, тангенциальным и врезным движением подачи позволяет использовать зубошевингование для различных конструкций заготовок цилиндрических колес, включая заготовки с близко расположенными венцами.

При зубошевинговании с помощью наладки станка и конструкции шевёра можно производить продольную и профильную модификацию зубьев, что позволяет предотвратить концентрацию нагрузки на кромках зубьев, снизить уровень шума и повысить срок службы зубчатой передачи.

Основным недостатком зубошевингования следует считать то, что обработку зубьев производят в незакаленном виде. Относительно высокая точность зубьев (5–7 степень по ГОСТ 1643-81), полученная при зубошевинговании, снижается на 1–2 степени после выполнения ХТО.

Кроме того, для компенсации деформаций, возникающих при ХТО, необходимо выполнение сложнейших модификаций зубьев шевёра, в результате чего очень сложно обеспечить воспроизводимость и стабильность процесса. Нежесткая кинематическая связь между шевёром и заготовкой делает шевингование очень зависимым от качества предварительной обработки зубьев.

Указанные недостатки и, главным образом, невысокая конечная точность шевингованных зубчатых колес явились причиной повсеместного вытеснения из промышленности зубошевингования методами обработки зубьев, производимыми после ХТО.

Для чистовой обработки цилиндрических зубчатых колес все более широко применяют зубошлифование. При этом наибольшее распространение получили два метода — непрерывное обкатное шлифование червячным шлифовальным кругом (рис. 1) и прерывистое профильное двухсторонним коническим кругом.



Головная фирма

Рейсхауэр АГ  
Индуштриштрассе 36  
8304 Валлизеллен  
Швейцария

Тел. +41 44 832 22 11  
Факс +41 44 832 23 90

info@reishauer.com  
www.reishauer.com

Рейсхауэр АГ  
Пресненский вал, дом 3, кв. 87  
123022, Москва  
Россия

Тел. +7 495 253 40 93  
Факс +7 495 253 40 93

russia@reishauer.com  
www.reishauer.com

# REISHAUER

Зубошлифовальные станки  
Алмазные и CBN - инструменты

Сравнительные технологические характеристики методов чистовой обработки зубьев цилиндрических колес

Технические параметры	Зубошвингование	Непрерывное обкатное зубошлифование	Прерывистое профильное зубошлифование	Зубофрезерование твердосплавными червячными фрезами	Зубохонингование
Модуль обрабатываемых зубчатых колес, мм	0,5–12	0,5–8,0	0,5–35	1–30	0,5–4,0
Производительность	+++	++	+ / –	+ / –	+ / –
Точность по ГОСТ 1643-81	5–7 / 7–9 до ХТО/после ХТО	3–5	3–5	6–8	5–7
Шероховатость поверхности зубьев по Ra, мкм	0,8–2,5 / 1,2–3,2 до ХТО/после ХТО	0,4–1,6	0,4–1,6	0,2–0,8	0,2–0,7
Скорость резания	90–130 м/мин	50–75 м/с	35–45 м/с	50–100 м/мин	0,5–10 м/с
Твердость заготовки HRC	≤ 32	58–63	58–63	≤ 62	58–63
Необходимость подрезки впадины зуба (протуберанец)	–	+	+	–	–
Возможность обработки дна впадины зубьев	–	+	+	–	–
Возможность обработки близко расположенных зубчатых венцов	+	–	+	+ / –	+
Возможность создания внутренних напряжений сжатия на поверхности зубьев	–	+	+	+	+
Возможность профильной и продольной модификации зубьев	+	+	+	+ / –	+ / –
Воспроизводимость процесса	+ / –	+	+	+	–

В качестве шлифовального инструмента используют абразивные или металлические круги с одно- или многослойным покрытием нитрида бора. Низкая стоимость, а также возможность целенаправленного изменения рабочей поверхности шлифовального инструмента при обработке зубьев с различной геометрией способствовали широкому применению в промышленности абразивных шлифовальных кругов.

Для шлифования рассматриваемыми методами не требуется подрезание профиля в ножке зуба обрабатываемого колеса (таб. 1), что существенно снижает затраты на предварительную обработку.

Возможность обработки впадины зубьев и создания внутренних напряжений сжатия на поверхности зубьев позволяет при использовании зубошлифования существенно повы-

сить контактную и изгибную износостойкость цилиндрических зубчатых передач.

На рис. 2 показано, что как при непрерывном обкатном зубошлифовании абразивным червячным кругом 2, так и при прерывистом профильном — двухсторонним металлическим кругом с гальваническим покрытием кубическим нитридом бора 1, на поверхности зубьев цилиндрических колес возникают внутренние напряжения сжатия, близкие по величине получаемым при зубохонинговании 3.

Воспроизводимость процесса зубошлифования обеспечивается жесткой и точной кинематической связью между заготовкой и режущим инструментом, а также прецизионным профилированием абразивного инструмента непосредственно на станке, что позволяет получать стабильное качество изготовления

как внутри обрабатываемой партии заготовок зубчатых колес, так и при переходе от партии к партии.

Прерывистое профильное зубошлифование характеризуется высокой теплонпряженностью процесса вследствие линейного контакта между боковыми поверхностями зубьев и профилем шлифовального круга, поэтому высока вероятность образования прижогов на поверхности зубьев. Условия шлифования также ухудшаются из-за ограничения доступа смазочно-охлаждающей жидкости в зону резания.

Объективным критерием оценки производительности приведенных выше методов является объем снятого материала в единицу времени. При непрерывном обкатном методе объем снимаемого металла в единицу времени при обработке зубчатых колес

Рис. 1. Кинематическая схема резания при непрерывном обкатном зубошлифовании

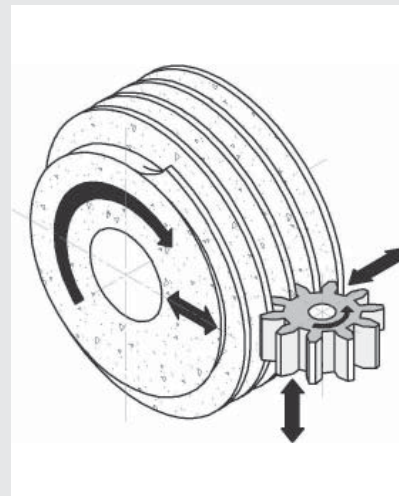
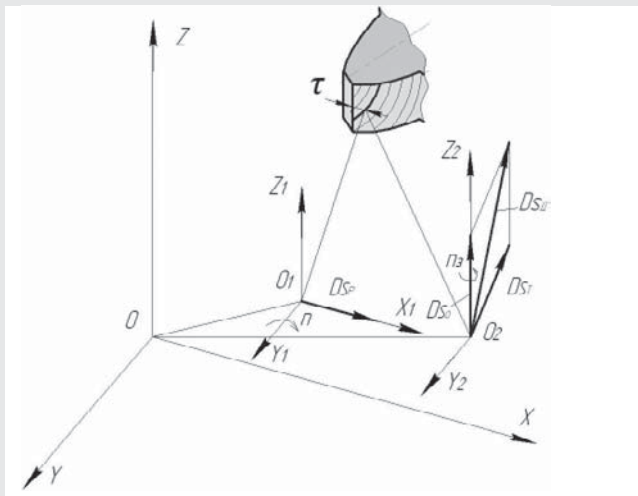


Таблица 2

## Зубошлифовальные станки с ЧПУ Reishauer (Швейцария)

Модель станка /Технические параметры	RZ 150	RZ 260 (рис. 4)	RZ 303C	RZ 400/ RZ basic	RZ 630	RZ 800	RZ 1000
Начало производства	2003	2009	2006	2001 / 2006	2007	2007	2007
Внешний диаметр заготовки, максимальный, мм	150	260	300	400	630	800	1000
Модуль, мм	1–3	1–4	0,5–5,5	0,5–8,0	1–8,0 1–16,0 <sup>3</sup>	1–8,0 1–16,0 <sup>3</sup>	1–8,0 1–16,0 <sup>3</sup>
Число зубьев	6–150	6–150	5–999	5–999	5–999	5–999	5–999
Ширина зубчатого венца (ход шлифовальной каретки Z1), мм	0–100	0–180	0–300	0–300	0–200	0–200	0–200
Угол наклона зуба, град.	0...± 40	0...± 40	0...± 45	0...± 45	0...± 40	0...± 40	0...± 40
Максимальная масса заготовки, кг	3 <sup>1</sup>	5 <sup>1</sup>	12 <sup>1</sup>	300 с оправкой	600 с оправкой	600 с оправкой	600 с оправкой
Максимальная длина заготовки, мм	350	500	400	700	700	700	700
Число заходов круга	1–7	1–7	1–7	1–5 <sup>2</sup>	1–5 <sup>2</sup>	1–5 <sup>2</sup>	1–5 <sup>2</sup>
Наружный диаметр круга, мм	275–206	275–206	300–206	300–206	300–206	300–206	300–206
Высота круга, мм	125	125	145	125	145	145	145

Примечания: <sup>1</sup> вес заготовки при автоматической загрузке; <sup>2</sup> максимальный шаг винтовой линии 32 мм; <sup>3</sup> при шлифовании профильным методом.

с модулем от 2 до 5 мм абразивными шлифовальными кругами в 4–5 раз превышает тот же объем при прерывистом профильном зубошлифовании.

Указанные положительные свойства непрерывного обкатного метода являются причиной его широкого применения в мелко-, средне- и крупносерийном производстве.

Чистовую обработку зубьев твердосплавными червячными фрезами стали применять в промышленности в 80-х годах прошлого столетия. Основанием для этого послужило создание статически и динамически жестких и термостойких зубофрезерных станков. От зубофрезерования закаленных заготовок этот метод отличается только конструкцией режущего инструмента и режимами обработки.

В качестве режущего инструмента применяют высококачественные твердосплавные червячные фрезы. Большой передний угол  $\gamma = -10... -30^\circ$  зубьев червячной фрезы, а также отсутствие зазоров в приводах инструмента и заготовки обеспечивают равномерное (без ударов) резание.

Чтобы избежать чрезмерного износа головки зубьев фрезы, необходимо предварительную обработку заготовки производить с подрезкой впадины зубьев.

Использование «сухого» (без подачи СОЖ) зубофрезерования делает этот процесс более эффективным и экологически чистым. Однако из-за низкой производительности и невысокой точности область его применения ограничивается единичным и мелкосерийным производством.

Преимущество этот процесс получает в тех случаях, когда один и тот же зубофрезерный станок можно использовать для обработки

незакаленных и закаленных заготовок зубчатых колес.

Зубохонингование применяют для чистовой обработки зубьев закаленных цилиндрических зубчатых колес преимущественно абразивными правящимися инструментами. Скорость резания при этом методе в 5–10 раз ниже, чем при зубошлифовании, поэтому доминирующими при зубохонинговании являются механические напряжения вместо термических при зубошлифовании. Существуют два метода зубохонингования — хонами с внешним и внутренним зацеплением. Большие технологические возможности хонеров с внутренним зацеплением определили их преимущественное применение в промышленности.

Несмотря на довольно широкую область применения зубохонингования, которое

можно производить после зубонарезания и ХТО, зубонарезания, зубошвингования и ХТО, зубонарезания, ХТО и зубошлифования, в настоящее время оно не получило широкого распространения в промышленности.

Среди производителей зубошлифовальных станков, работающих непрерывным обкатным методом, лидирующее положение на мировом рынке на протяжении последних нескольких десятков лет занимает фирма Reishauer AG (Швейцария) (рис. 3). Современные зубошлифовальные станки Reishauer работают непрерывным обкатным двусторонним методом и могут шлифовать зубчатые колеса с модулем 0,5–8,0 мм, внешним диаметром 20–1000 мм и с различной геометрической формой: валы, диски, зубчатые сегменты (табл. 2).

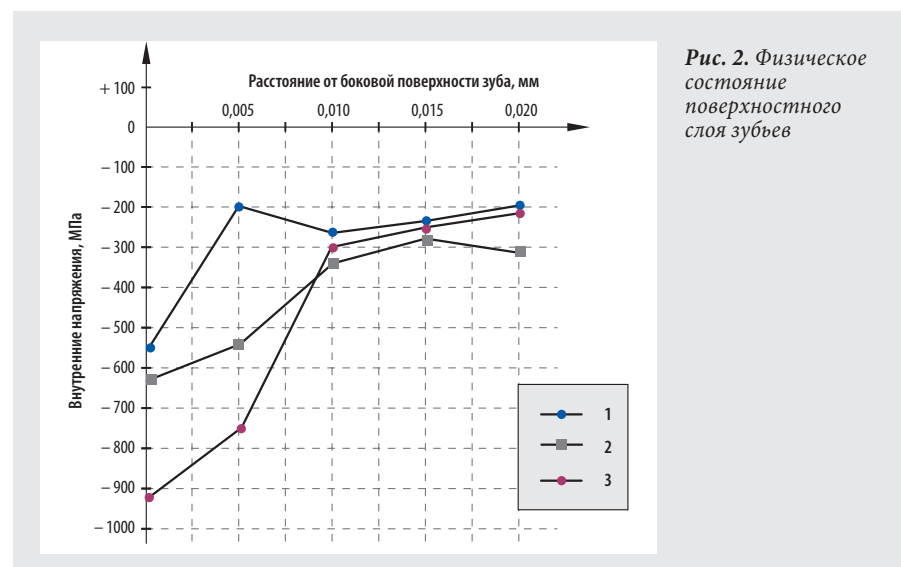


Рис. 2. Физическое состояние поверхностного слоя зубьев

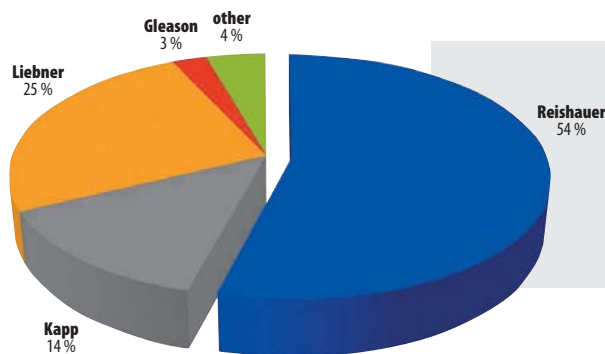


Рис. 3. Доля мирового рынка, занимаемого производителями станков, работающих непрерывным обкатным методом

Привод заготовки в станках RZ 303C, RZ 400, RZ 630, RZ 800 и RZ 1000 осуществляется через оригинальный планетарный механизм, запатентованный фирмой Reishauer. Поэтому шпиндель является чрезвычайно жестким и допускает большие вращающие моменты (например, у станка RZ 400—180 Нм), что позволяет станкам работать многозаходными червячными шлифовальными кругами с большими осевыми и радиальными подачами.

Станки Reishauer имеют высокую точность позиционирования: линейных осей — 0,001 мм, круговых осей — 0,001 град.

В качестве зажимных средств на зубошлифовальных станках применяют разжимные гидравлические оправки и механические оправки с разрезными коническими цапгами, которые при разжиме обеспечивают беззасторное центрирование и закрепление заготовки. Это значительно снижает негативное влияние погрешности диаметра и формы посадочного отверстия на точность шлифования зубьев.

Возможность гибкого изменения профиля инструмента при обработке зубчатых колес с различными параметрами зубьев (модуль, число зубьев, угол профиля и т. д.) — основная причина широкого применения правящих абразивных кругов при непрерывном обкатном зубошлифовании.

Обработку зубьев производят высокопористыми шлифовальными кругами. Чем больше суммарный объем пор и крупнее поры, тем лучше охлаждение и эффективнее резание.

Наибольшее применение на станках Reishauer получила профильная правка с помощью двух односторонних конусных кругов, а также одно- и двухзаходных сборных роликов. Режущие поверхности правящих роликов покрывают одним слоем природных алмазных зерен с гальваническим никелевым покрытием. Алмазные зерна имеют размер 0,3–0,42 мм и форму тетраэдра или октаэдра с отношением длины к толщине, близким к единице.

Непременным условием качественного зубошлифования является эффективное применение смазочно-охлаждающей жидкости. Она оказывает непосредственное влияние на производительность и качество обработки зубьев, осуществляя смазку контактирующих поверх-



Рис. 4. Зубошлифовальный станок RZ 260

ностей инструмента и заготовки, а также отвод тепла, продуктов износа шлифовального круга и мелкой стружки из зоны обработки.

Для повышения режущих свойств круга и устранения возможности образования прижогов на поверхности зубьев подачу СОЖ в зону шлифования производят напорной струей под давлением 0,8–2,0 МПа с производительностью 160 л/мин.


Зубошлифовальные станки RZ 630, RZ 800 и RZ 1000 имеют измерительное устройство (рис. 5) для контроля зубьев до и после обработки, их оценки и аттестации в соответствии с требованиями ГОСТ 1643-81. Они могут производить обработку также прерывистым профильным зубошлифованием, которое применяется для зубчатых колес с модулем 1–16,0 мм, колес с близко расположенными венцами и малым числом зубьев. 



Рис. 5. Измерительное устройство на станках RZ 630, RZ 800 и RZ 1000