

УДК 621.919  
DOI: 10.12737/20813

**В.В. Клепиков, Д.Т.Н.,  
А.А. Черепяхин, К.Т.Н.**  
(Московский государственный машиностроительный университет (ММИ))  
E-mail: prof\_klepikov@mail.ru , tkm1410@yandex.ru

## **Оптимизация процессов протягивания шлицевых отверстий и шлифования цилиндрических поверхностей закаленных зубчатых колес**

*Рассмотрено влияние технологических параметров на точность обработки зубчатого венца дискового колеса с центральным отверстием и стойкость режущего инструмента. Разработанная модель процесса обработки позволила снизить усилия резания за счет предварительного натяга на элементы, формирующие шлицевое отверстие.*

**Ключевые слова:** зубчатое колесо; центральное отверстие; протягивание; шевингование; точность обработки.

**V.V. Klepikov, D.Eng.,  
A.A. Cherepakhin, Can.Eng.**  
(Moscow State Mechanical Engineering University (MAMI))

## **Optimization of spline hole broach processes and grinding of cylindrical surfaces in hardened cog-wheels**

*One of the factors affecting considerably gear cutting accuracy consists in technological basis quality. The largest influence upon treatment accuracy of a reference hole have broach wear and errors in hole grinding. In the paper there are shown the investigation results of technological parameter effect upon broach stability and accuracy in broach treatment and grinding of a reference splined hole. The developed model of a process and a tool test allowed defining optimum parameters from the point of view of the treatment accuracy, surface layer parameters and life of a tool and cutting modes. It was considered simultaneously the hardening impact upon a reference hole surface layer.*

**Keywords:** cog-wheel; central hole; broach; shaving; machining accuracy.

В настоящее время при проектировании технологических процессов производства цилиндрических зубчатых колес необходим комплексный подход к решению задач по обеспечению заданной точности и качества рабочих поверхностей (зубьев и базовых поверхностей).

Исходя из принципа системности [3], технологический процесс обработки включает в себя способ воздействия на обрабатываемый материал. Алгоритмическая процедура целенаправленного совершенствования технологических процессов включает в себя экспериментальные исследования основных этапов обработки зубчатых колес и их теоретическое

обоснование [4].

Особое внимание необходимо уделять способам формообразования базовых и рабочих поверхностей детали.

Рассмотрим конкретный пример структурно-параметрического анализа отдельных методов чистовой обработки цилиндрических зубчатых колес, в частности обработки базового шлицевого отверстия протягиванием, обработки базового торца полированием и обработки зубьев колес – шевингованием.

При этом обрабатывающий инструмент представляется в виде интегральной характеристической способа обработки зубчатого колеса, а характеристики заготовки – как квази-

постоянных во времени [1].

В технологических лабораториях МГИУ и МГТУ (МАМИ) (в настоящее время объединенные в Университет машиностроения) проводился цикл НИР, целью которых являлось повышение точности обработки дисковых зубчатых колес с центральным базовым шлицевым отверстием.

Работы проводились в три этапа. На первом этапе проводились стойкостные испытания протяжек и исследование влияния технологических факторов на точность протягивания шлицевого отверстия [1]. На втором этапе исследовалась возможность повышения точности обработки базового торца. На третьем этапе исследовалась возможность повышения точности обработки зубчатых венцов с использованием традиционной технологии «фрезерование червячной фрезой – шевингование» за счет корригирования профиля зуба шевера.

Обычно шлицевое базовое отверстие в цилиндрических зубчатых колесах обрабатывается методом протягивания. При этом наиболее сложной проблемой остается повышение качества центрирующих боковых поверхностей, образующихся в результате их формирования вспомогательными кромками режущих зубьев протяжек [2].

В качестве объекта исследования взяты внутренние шлицевые поверхности с прямоугольным и эвольвентным профилем как прошедшие, так и не прошедшие термическую обработку.

В качестве заготовок применялись равножесткие (цилиндрические) и неравножесткие (конические) заготовки, а также шестерни промежуточного вала, шестерня первой передачи вторичного вала грузового автомобиля.

Исследования проводились при следующих условиях:

оборудование – вертикально-протяжной станок;

режущий инструмент – цельные шлицевые протяжки из быстрорежущей стали Р6М5; скорость протягивания – 2...8 м/мин;

технологическая база – обработанный торец заготовки;

технологический маршрут обработки отверстия: зенкерование, цилиндрическое протягивание, шлицевое протягивание.

Для определения скоростного диапазона протягивания были проведены испытания на различных скоростях резания.

В результате было выявлено, что скорость резания 8 м/мин является предельной. При

больших скоростях на обработанной поверхности появляются следы вибраций, распространяющиеся на всю длину обработки (рис. 1).

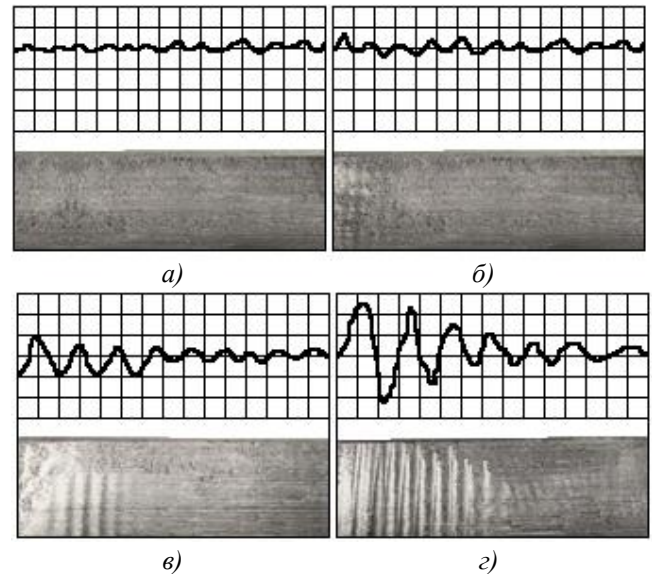


Рис. 1. Обработанная поверхность (сталь 18ХГТ;  $S_z = 0,04$  мм; материал режущей части – сталь Р6М5;  $\times 100$ ) после протягивания с различными скоростями резания:

а – 8 м/мин; б – 9 м/мин; в – 15 м/мин; з – 20 м/мин

Снижение качества протянутого шлицевого отверстия после термической обработки потребовало изучения технологических возможностей протяжного инструмента на заготовках, прошедших термическую обработку.

Стойкостные испытания проводились при протягивании шлицевого отверстия со скоростью резания 8 м/мин.

Для точного определения величины площадки износа на задних поверхностях зубьев нанесены базовые линии  $l$  (с помощью алмазной пирамидки микротвердомера ПМТ-3) параллельные главной режущей кромке (рис. 2). Во время испытаний через каждые 200 м пути резания режцовые блоки снимались и на инструментальном микроскопе БМИ-III проводились замеры расстояния от базовой линии до площадки износа [5].

Износ по задней поверхности ( $h_3$ ) определялся по формуле

$$h_3 = l_0 - l_i;$$

где  $l_0$  – расстояние от базовой линии до вершины неизношенного зуба, мм;  $l_i$  – расстояние от базовой линии до площадки износа после прохождения  $i$  метров пути резания ( $l_p$ ), м;

$$i = 50; 200 \dots 1200 \text{ м.}$$

Стойкостные испытания показали, что при подачах до 0,07 мм (рис. 3, а), превалирует абразивный износ.

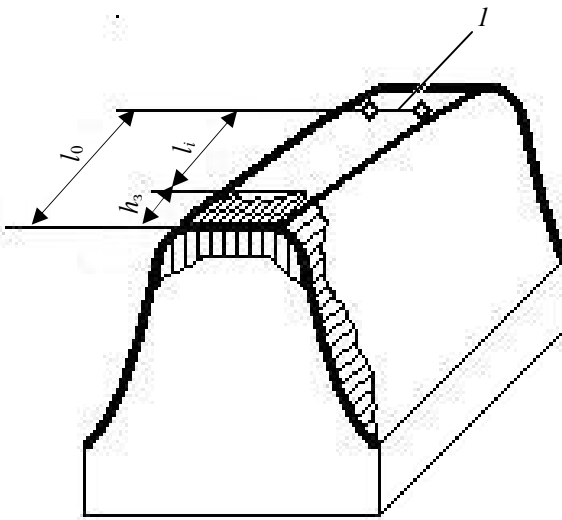


Рис. 2. Схема измерения износа по задней поверхности зуба протяжки:

$l$  – базовая линия;  $l_0$  – расстояние от базовой линии до вершины неизношенного зуба;  $l_i$  – расстояние от базовой линии до площадки износа;  $h_3$  – износ по задней поверхности

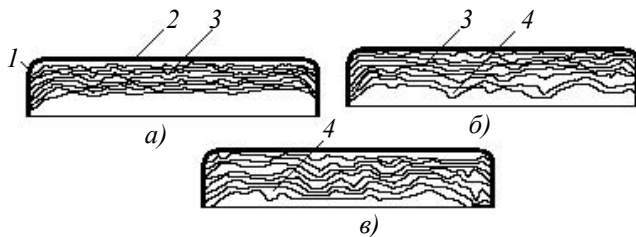


Рис. 3. Изолинии площадки износа по задней поверхности:

а – абразивный износ; б – совмещение абразивного износа и скалывания; в – скалывание; 1, 2 – боковые и верхняя режущие кромки; 3 – изолиния площадки абразивного износа; 4 – скол

При подачах более 0,1 мм происходит скалывание материала с режущих кромок (рис. 3, б, в). При этом сколы являются очагами повышенного износа. Если учитывать только абразивный износ, то кривые износа имеют классический вид, и с повышением подачи на зуб величина износа увеличивается (рис. 4)

Наиболее стабильные результаты по износам зубьев протяжек при обработке заготовок до их термической обработки были получены при использовании СОТС, состоящего из эмульсола ЭТ-2 (45 %) и латекса ПВХ (40 %). Однако проведенные испытания с термически обработанными заготовками показали, что при обработке шлицев наименьшему износу подвергались протяжки, работающие на

ализариновом масле.

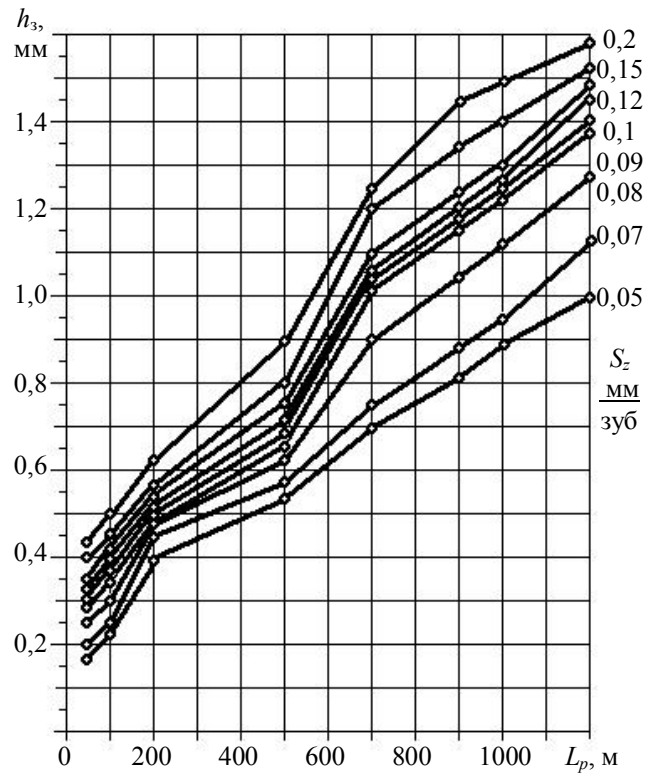


Рис. 4. Кривые абразивного износа зубьев протяжки при скорости резания 8 м/мин

При работе протяжек по термически обработанному материалу было замечено, что с увеличением длины обработки возрастает склонность зубьев протяжного инструмента к молекулярному схватыванию со стружкой. Проведение исследований на образцах из стали 18ХГТ протяжками с основным подъемом на зуб 0,1 мм показало что, с целью снижения вероятности молекулярного схватывания стружки с зубьями протяжки, скорость резания должна быть ограничена (при подъеме на зуб 0,15 мм – 3 м/мин, а при подъеме на зуб 0,05 мм – 7 м/мин).

Марка обрабатываемого материала оказывает существенное значение на износ протяжек. По мере увеличения содержания углерода (до 0,4 %) вне зависимости от подъема на зуб количество задиров на боковых сторонах шлицев уменьшается. Однако при дальнейшем увеличении содержания углерода в стали для всех подъемов на зуб количество задиров поверхностей увеличивается.

При этом было замечено, что радиус округления уголков лезвия зубьев оказывает более заметное влияние на формирование стружки, чем износ по задней грани. Рост радиуса округления достигает определенной величины и только тогда стабилизируется (начинает работать в условиях нормального износа), но не

исключает выкрашивание уголков лезвия зубьев и быстрого перехода на интенсивный их износ.

Стойкостные испытания быстрорежущего инструмента с покрытиями показали следующее.

Покрываются на основе Ti(C,N) обладают низким коэффициентом трения по стали, что позволяет уменьшить абразивный износ по задним поверхностям. Однако замещение атома азота углеродом в кристаллической решетке нитрида титана снижает ударную вязкость покрытия. Поэтому, при больших подъемах на зуб, наличие покрытия не позволило стабилизировать на длительное время исходный радиус уголков лезвия зубьев и не исключило выкрашивания уголков зубьев и быстрого перехода на интенсивный их износ.

При лезвийной обработке, в результате воздействия нормальной составляющей силы резания, обрабатываемая поверхность подвергается сжатию и вызывает явление наклепа. Осевая составляющая силы резания вызывает перед лезвием напряжение сжатия, а за ним напряжение растяжения. Их совокупное воздействие является причиной возникновения дефектов обрабатываемого поверхностного слоя.

Поэтому целесообразно коренным образом изменить условия резания боковых сторон шлицевого отверстия переходом на создание главной режущей кромки профилирующей боковые стороны шлицев в отверстии, но и в этом случае стабильности качественных показателей достигнуто не было.

Таким образом, предварительный натяг на деформирующие элементы, формирующие шлицевый профиль, создает условия для снижения усилий резания и повышения качества обработки. Следующие за ними выглаживающие элементы обеспечивают, главным образом, стабилизацию заданных качественных параметров боковых сторон шлицев в отверстиях деталей.

Проведенные исследования показали целесообразность применения протяжного инструмента для формирования шлицевых базовых отверстий зубчатых колес, прошедших термическую обработку (нитроцементацию).

Известно, что отклонение от перпендикулярности базового отверстия зубчатого колеса относительно торца и эксцентриситет базового отверстия относительно венца могут отличаться в зависимости от условий обработки цилиндрических зубчатых колес [6]. В процессе обработки базовых поверхностей рабочая поверхность инструмента находится во взаимодействии с заготовкой и претерпевает

различные стадии формирования заданных параметров, качества поверхностного слоя, которые изменяются в зависимости от способа и направления их взаимодействия, а также формы рабочих элементов и их сочетания.

При обработке базового торца и отверстия зубчатого колеса, направление воздействия на поверхность заготовки осуществлялась сначала в одном направлении, а затем в противоположном.

В подтверждении данной концепции рассмотрим результаты исследований упрочняющего шлифования. Исследования проводились на заготовках зубчатых колес и тех же образцах. При анализе изменяемых параметров, в частности глубины и скорости вращения заготовки, оценивались глубина, твердость, изменение структуры, фазовый состав заготовок, прошедших термическую обработку. Экспериментальные исследования проводились на круглошлифовальном станке. Чтобы исключить влияние затупления круга, его правка осуществлялась после обработки каждого образца.

Как показали результаты исследования, увеличение глубины резания (при силовом шлифовании) в 40 раз (от 0,01 до 0,40 мм) вызывает повышение твердости поверхностного слоя в 2 раза. При дальнейшем увеличении глубины резания повышение твердости замедляется и, достигнув определенной величины (0,7...0,9 мм), в дальнейшем практически не изменяется, что можно объяснить интенсивным и длительным нагревом поверхностного слоя, приводящим к более полной аустенизации металла.

Аналогичные результаты были получены и при увеличении частоты вращения заготовки. Таким образом, достигнув предельных значений, обеспечивающих условия полной аустенизации исходной структуры, дальнейшее повышение режимов резания не изменяет твердости поверхностного слоя заготовки.

При увеличении глубины резания и уменьшения скорости вращения заготовки или времени прогрева металла (от температуры выше критической) глубина упрочненного слоя увеличивается. Причем, если определенные значения глубины упрочнения (1,0...1,4 мм) имеют значимый разброс, то в тонких поверхностных слоях (0,1...0,3 мм) наблюдается стабильность полученных результатов.

Плотность теплового потока связана с мощностью процесса шлифования, поэтому за счет контроля мощности на приводе шлифовального круга осуществлялась корректиров-

ка режимов резания.

Экспериментальными исследованиями установлена эмпирическая зависимость между глубиной упрочнения и плотностью потока (рис 5). При снятии припуска в пределах 0,15...0,17 мм на сторону, глубина упрочненного слоя достигла 70 % от величины снимаемого припуска, а твердость возросла в 1,5 раза (от исходной). При снимаемом припуске 0,07 мм отклонение от цилиндричности составила 0,02 мм, а глубина упрочненного слоя 0,1 мм.

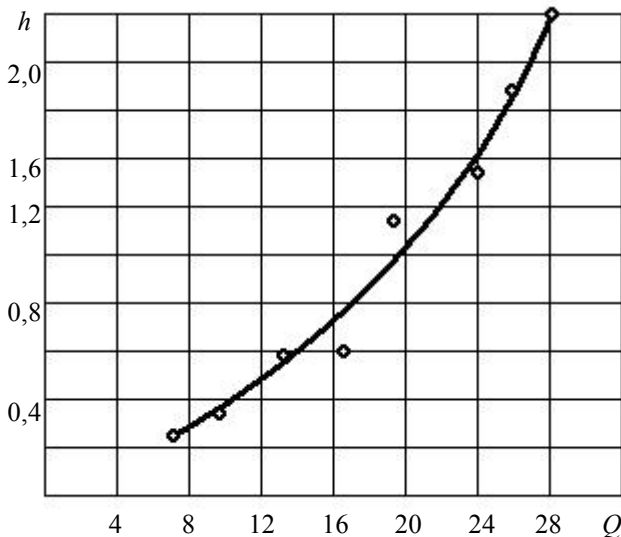


Рис. 5. Зависимость глубины упрочненного слоя  $h$  от плотности теплового потока  $Q$

Следует отметить, что мартенсит в упрочненном слое отличается мелкозернистостью (рис. 6), что также можно объяснить значительным нагревом металла вблизи зоны контакта круга с заготовкой.

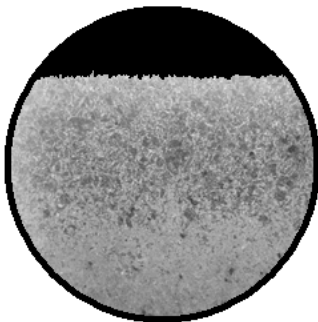


Рис. 6. Микроструктура поверхностного слоя,  $\times 200$

Известно, что кроме температуры на структуру упрочненного слоя оказывает влияние давления в зоне резания. Однако при длительном нагреве (малой скорости вращения заготовки) металл прогревается до пластического состояния, и влияние силового фактора становится незначительным. В тоже время значительное увеличение давления в зоне резания приводит к существенным искажениям структуры.

Таким образом, изменение условий обработки, вызванное упрочняющей обработкой, позволило внести более значительные изменения качественных параметров заготовок, чем традиционный подход решения той же задачи.

Например, если при обычном шлифовании, токарной обработке или протягивании базового отверстия зубчатых колес, осуществляемых в обычных условиях (например, при протягивании в 6...8 м/мин), часть параметров, оказывающих влияние на процесс обработки, не учитывались как незначительно влияющие на выходные параметры, то в новых условиях (при скоростях или усилиях на порядок выше) они превращаются в значимые факторы.

Проведенные исследования показывают, что имеется возможность значительного увеличения скорости резания, что позволяет изменить подход к построению технологических процессов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Диагностика процесса высокоскоростного протягивания фасонных поверхностей / А.А. Черепяхин, В.В. Клепиков, В.М. Виноградов // Научные технологии в машиностроении. – 2013. – № 9 (27). – С. 26–29.
2. Черепяхин, А.А., Клепиков, В.В., Солдатов, В.В. Методы обработки ответственных деталей автомобилей М.: МГИУ, 2011. – 214 с.
3. Параметрическая оптимизация обработки зубчатых колес: монография / А.А.Черепяхин, В.М. Виноградов, В.В. Клепиков / Deutschland, Saarbrucken, the publishing house LAP Lambert Academic Publishing GmbH &Co., 2012 г. 230 с.
4. Таратынов, О.В., Клепиков, В.В., Черепяхин, А.А. Пути совершенствования технологических систем // Технология машиностроения. – 2014. – № 9. – С. 61–63.
5. Черепяхин, А.А., Виноградов, В.М. Стойкость круговых протяжек для обработки цилиндрических зубчатых колес // Известия МГТУ «МАМИ». – 2010. – №1 (9). – С. 106 – 109.
6. Клепиков, В.В., Бодров, А.Н. Технология машиностроения. М.: Форум, 2004. – 860 с.

### REFERENCES

1. Diagnostics of profiled surface high-speed broach / A.A. Cherepakhin, V.V. Klepikov, V.M. Vinogradov // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2013. – № 9 (27). – pp. 26–29.
2. Cherepakhin, A.A., Klepikov, V.V., Soldatov, V.V. *Methods for Motor Car Critical Parts Machining* М.: MSIU, 2011. – pp. 214.
3. *Parameter Optimization of Cog-Wheel Working: Monograph* / A.A. Cherepakhin, V.M. Vinogradov, V.V. Klepikov / Deutschland, Saarbrucken, the publishing house LAP Lambert Academic Publishing GmbH &Co., 2012 г. pp.230.
4. Taratynov, O.V., Klepikov, V.V., Cherepakhin, A.A. Ways for technological system up-dating // *Engineering Techniques*. – 2014. – № 9. – pp. 61–63.
5. Cherepakhin, A.A., Vinogradov, V.M. Circular broach stability for cylindrical cog-wheels working // *Proceedings of MSTU "MAMI"*. – 2010. – №1 (9). – pp. 106 – 109.
6. Klepikov, V.V., Bodrov, A.N. *Engineering Techniques*. М.: Forum, 2004. – pp. 860.

Рецензент д.т.н. А.С. Тарапанов