

УДК 621.9.04  
DOI: 10.12737/18079

**В.В. Клепиков, д.т.н.,  
А.А. Черепакхин, к.т.н.**  
(Московский государственный машиностроительный университет (ММИ))  
E-mail: prof\_klepikov@mail.ru

## **Влияние метода формообразования зубьев на форму припуска под зубоотделочные операции и их точность**

*Рассмотрено влияние метода формирования зубчатого профиля на точность обработки. Показано, что в условиях крупносерийного производства наибольшую точность даст технологическая цепочка «черновая обработка – метод копирования → чистовая обработка – метод обката».*

**Ключевые слова:** зубчатое колесо; припуск на обработку; метод обработки; точность; производительность.

**V.V. Klepikov, D.Eng.,  
A.A. Cherepakhin, Can.Eng.**  
(Moscow State Machine-building University (MAMI))

## **Effect of tooth shaping method upon allowance shape for tooth finishing operations and their accuracy**

*The effect of a tooth profile formation method upon machining accuracy is considered. It is shown that under conditions of large-scale production the highest accuracy will be obtained with the aid of a technological chain “roughing – copying method → finishing – running-in method”.*

**Keywords:** cog-wheel; allowance for machining; machining method; accuracy; productivity.

В условиях производства зубчатых колес для автомобилестроения приоритетной задачей является повышение производительности процесса обработки при сохранении требуемой точности зубчатого колеса.

Формообразование зубьев цилиндрических колес на предварительных этапах может осуществляться различными методами (обкатка, огибание и копирование), что ведет к изменению формы припуска на отделочную обработку. Наиболее часто имеют место равномерный или клиновой припуск. Равномерный припуск получают при формировании зубчатого венца методами обката. Клиновой припуск получают при обработке венца методами копирования [1 – 5].

Зависимость формы припуска под последующую обработку от метода формообразования зубьев можно объяснить тем, что при методе обката установочные перемещения

производящего контура инструмента не влияют на погрешность профиля зуба, а только вызывают изменение толщины последнего. При методе копирования в этом случае возникает как изменение толщины зубьев, так и искажение профиля их боковых сторон (рис. 1).

Профиль зубьев обрабатываемого колеса, имеющий клиновой припуск, дает возможность значительно уменьшить нагрузку на периферийную режущую кромку зубьев отделочного инструмента при обработке участков, расположенных в зоне переходной кривой у дна впадины. Тем самым улучшаются условия отделочной обработки зубьев, и повышается стойкость инструмента.

В литературе по зубчатым передачам рекомендуется при изготовлении зубчатых колес из нелегируемых сталей применять клиновой припуск, предусматривающий в процессе нарезания зубьев увеличение их нормального

шага, что вызвано стремлением локализовать в какой-то мере вредное действие деформаций, возникающих при термической обработке.

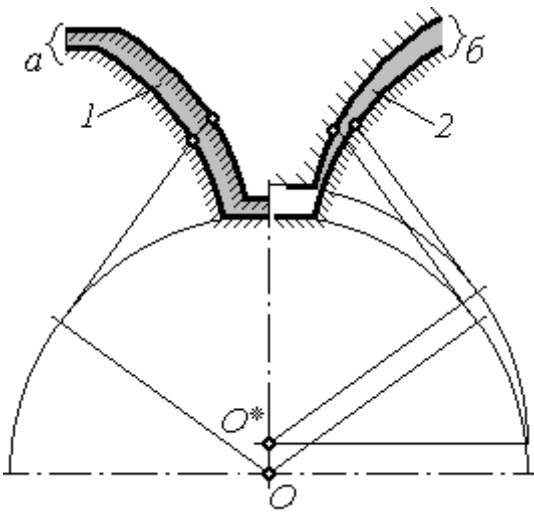


Рис. 1. Смещение эвольвентного профиля при обработке венца методом обката (а) и копирования (б) при установочных смещениях  $OO^*$ :

1 – припуск под шевингование после обработки червячной фрезой; 2 – припуск под шевингование после обработки кругодиагональной протяжкой.

При зубонарезании червячной фрезой клиновидный припуск можно получить корректированием зуборезного инструмента путем уменьшения угла профиля производящего контура и соответствующего увеличения радиуса основной окружности.

Рассмотрение станочного зацепления инструмента и обрабатываемого колеса при зубоотделке показывает, что условия удаления равномерного и клинового припуска на зубоотделочных операциях различны. Поэтому представляет интерес вопрос исправления погрешности предварительного формообразования зубьев на зубоотделочных операциях в зависимости от формы припуска под отделочную обработку.

При отделочной обработке зубчатых колес под действием сопротивлений, возникающих в процессе удаления припуска, инструмент и деталь нагружаются силой  $P$ , которую можно представить как результирующую составляющих  $P_p$ ,  $P_o$  и  $P_T$ , где  $P_p$  – распорная составляющая (направлена перпендикулярно осям инструмента и детали),  $P_o$  – осевая составляющая (направленная вдоль оси детали) и  $P_T$  – окружная, тангенциальная, составляющая (направленная по линии действия). Наибольшее влияние на выходную точность колеса при зубоотделочной обработке оказывает

окружная составляющая  $P_T$ .

В случае обработки зубчатых колес с равномерным припуском, сила  $P_T$  имеет постоянную величину на всем эвольвентном участке профиля зуба. При клиновидном припуске величина силы  $P_T$  меняется в соответствии с величиной снимаемого припуска по мере перемещения линии действия к головке обрабатываемого зуба.

В процессе отделочной обработки зуб обрабатываемого колеса входит во впадину между соседними зубьями инструмента, и сила  $P_T$  перераспределяется между последними, вызывая их изгиб относительно опасного сечения (рис. 2).

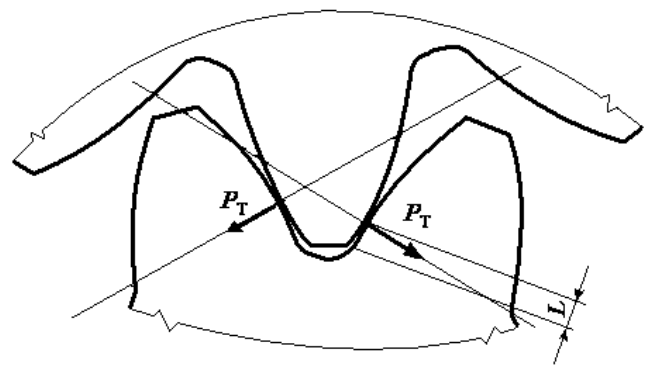


Рис. 2. Воздействие тангенциальной силы  $P_T$  на зуб колеса:  $L$  – плечо силы  $P_T$

Величина изгиба зубьев инструмента вытекает в дальнейшем в погрешности эвольвентного профиля обрабатываемых зубьев и определяет исправляющую способность операции отделочной обработки зубьев. Так как при зубоотделке точка контакта зуба колеса и инструмента перемещается по эвольвентному профилю, величина плеча  $L$  от точки приложения силы  $P_T$  до опасного сечения изменяется.

Изгиб зуба инструмента под действием силы  $P_T$  пропорционален изгибающему моменту  $M_{изг} = P_T L$ , максимальное значение которого будет при  $L_{max}$ , т.е. при обработке основания зуба колеса. Вид припуска, как упоминалось выше, влияет на величину  $P_T$ , а, следовательно, при обработке зубьев колес с клиновидным припуском величина  $M_{изг}$  (при  $L_{max}$ ) будет значительно меньше, чем при обработке колес с равномерным припуском.

Если более детально рассматривать изгибные явления зубьев, то нетрудно увидеть, что в ходе зацепления зубьев шевера и обрабатываемого колеса оба подвергаются изгибу вследствие действия сил резания, что показано на рис. 3.

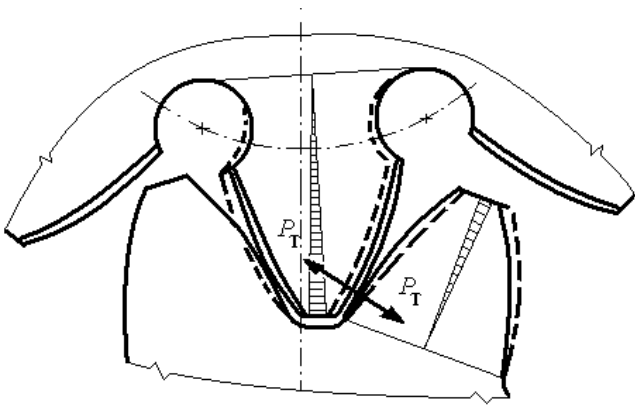


Рис. 3. Эпюры изгибов зубьев шевера и обрабатываемого колеса под действием тангенциальной силы

Эпюры изгибов иллюстрируют, какой элемент и в какой мере претерпевает упругий изгиб во время резания. Это значит, что в ходе взаимных отжатый инструмента и детали происходит уменьшение снимаемого припуска. При токарной обработке борьба с этими явлениями очевидна – глубина поперечной подачи увеличивается или уменьшается на величину упругих отжатый системы. То же самое происходит и в системе шевер–зубчатое колесо. Но в отличие от токарной обработки определить изгиб зубьев заготовки и инструмента значительно сложнее.

Определить изгиб зуба можно, представив его как консоль равного сопротивления изгибу. Однако в ходе коррекции профиля зуба подобная идеальная зависимость может нарушаться, поэтому целесообразно рассматривать зуб как консоль переменного сечения, подвергающуюся изгибу от одной сосредоточенной силы в каждый момент времени. Это так, поскольку инструмент и деталь в каждый момент времени зацепляются по линии на эвольвентной поверхности. И перпендикулярно этой поверхности на деталь действует тангенциальная составляющая  $P_T$  силы резания. Причем сила этой же величины, но противоположного знака действует и на шевер.

Зная силу изгиба, геометрические параметры шевера и колеса можно определить деформацию, а, следовательно, можно корректировать толщину припуска. Это позволит более точно определить величину снимаемого припуска при шевинговании, следовательно, более точно обработать зуб.

Из сказанного можно заключить, что изгиб зубьев инструмента при удалении клиновидного припуска значительно меньше, а исправление погрешностей предварительного фор-

мообразования зубьев колес идет более интенсивно. Следовательно, выходная точность зубоотделочных операций повышается при переходе от равномерного припуска к клиновидному.

Последнее обстоятельство давно было отмечено практикой зубообработки и использовалось в производстве путем преднамеренной модификации исходного контура червячных фрез.

В условиях автотракторного производства все зубчатые колеса подвергаются промежуточному контролю до и после зубоотделочных операций. Производственный контроль чаще всего проводится с помощью приборов для комплексной двухпрофильной проверки обрабатываемого колеса при зацеплении без зазора с мерительной шестерней. На этих приборах после предварительной и отделочной зубообработки контролируется размер зубчатого колеса с учетом припуска под последующую обработку и колебания измерительного межосевого расстояния (ИМР) за оборот колеса и на шаг.

Поскольку этому контролю подвергаются все колеса, представляет интерес вопрос влияния формы припуска под зубоотделку на поэтапную точность зубчатых колес. Основным критерием оценки этой точности в настоящее время являются параметры  $F_{ir}''$ ,  $f_{ir}''$ ,  $F_{\beta r}$  и  $V_{wr}$ . Априорно считая, что припуск по ширине зуба равномерный, параметр  $F_{\beta r}$  можно исключить из рассмотрения данного вопроса, используя остальные параметры:  $F_{ir}''$  – колебание измерительного межосевого расстояния (ИМР) за оборот колеса;  $f_{ir}''$  – колебание измерительного межосевого расстояния на одном зубе;  $F_{\beta r}$  – колебание длины общей нормали.

Беря в основу единую систему отсчета погрешностей при зубообработке, влияние формы припуска на выходную точность предварительных и отделочных зубообрабатывающих операций можно объяснить следующим образом.

На рис. 4 видно, что изменение отрезков линий действия на всем протяжении эвольвентного профиля зуба колеса имеет одну и ту же величину  $\Delta F$  для равномерного припуска (рис. 4, а) и переменную величину  $\Delta F$  для клиновидного (рис. 4, б).

Диаграмма изменения длин отрезков линий действия при различной форме припуска под зубоотделку показана на рис. 5.

Из этой диаграммы можно заключить, что при двухпрофильном контроле колес с клино-

видным припуском будет наблюдаться значительно большее колебание ИМР на шаг и за оборот, чем у колес с равномерным припуском, хотя величины этих припусков могут быть равными. Следовательно, форма припуска сказывается на выходной точности предварительных операций и оказывает существенное влияние на результаты контроля колес перед зубоотделочной обработкой и должна учитываться при организации метрологического обеспечения производства зубчатых колес.

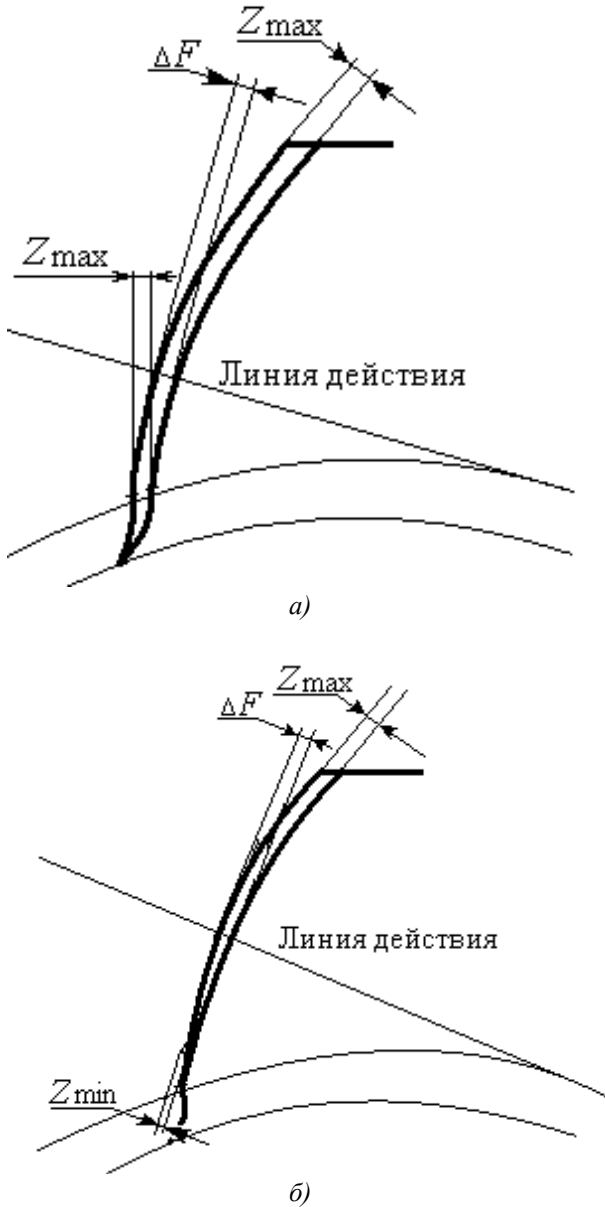


Рис. 4. Изменение отрезков линий действия для равномерного (а) и клиновидного (б) припусков

Из-за погрешности размерной наладки зубообрабатывающих станков и других факторов происходят установочные перемещения производящего контура инструмента, что вле-

чет за собой изменение отрезков линий действия на величины  $\Delta F$ , зависящие от методов формообразования зубьев. При этом для метода обкатки  $\Delta F_{\text{п}} = \Delta F_{\text{л}} = \text{const}$  на всей длине рабочего участка профиля колеса ( $\Delta F_{\text{п}}$ ,  $\Delta F_{\text{л}}$  – изменение отрезков линий действия соответственно правого и левого профиля). Для метода копирования характерно изменение  $\Delta F$  на протяжении рабочего участка эвольвентного профиля, а также для правой и левой стороны зуба  $\Delta F_{\text{п}} \neq \Delta F_{\text{л}} \neq \text{const}$ . Последнее проявляется в ступенчатом характере изменения комплексной погрешности, и значительном увеличении  $f_{\text{ир}}$ .

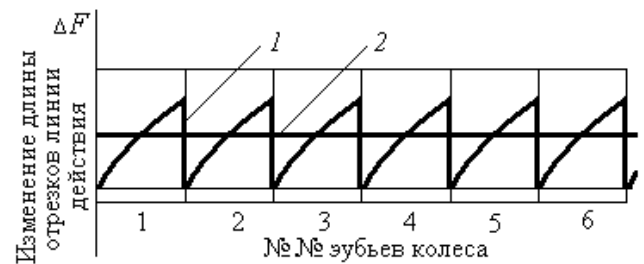


Рис. 5. Диаграмма изменения длин отрезков линий действия:

1 – для клиновидного припуска; 2 – для равномерного припуска

Изменение отрезков линий действия можно объяснить тем, что при методе обкатки установочные перемещения производящего контура инструмента не влияют на погрешность профиля зубьев, а только вызывает изменение толщин последних. При методе копирования в этом случае возникает как изменение толщины зуба, так и искажение профилей его боковых сторон.

Следовательно, при двухпрофильном контроле колес, обработанных по методу копирования, будут наблюдаться значительно большее колебание ИМР на шаг, чем у колес, нарезанных по методу обката, при одинаковом номинале ИМР и одинаковом припуске под шевингование. При этом в одном случае имеет место клиновидный припуск (для колес, нарезанных по методу копирования), а в другом – равномерный (для колес, обработанных по методу обката).

Проявляясь в ухудшении выходной точности операции зубонарезания, клиновой припуск под последующую отделочную обработку практически не сказывается на точности последней, и в ряде случаев позволяет уменьшать размер протуберанца, улучшая условия шевингования и шлифования зубьев. Экспе-

риментальные исследования точности шевингования зубчатых колес, нарезанных зубофрезерованием и кругодиагональным протягиванием, показали значительно лучшую шевингуемость колес, нарезанных по методу копирования.

В качестве объекта исследования использовалась шестерня заднего хода КПП автомобиля ЗИЛ-4331 ( $z = 20$  мм;  $m = 4,25$  мм;  $b = 26$  мм), нарезаемая с припуском под шевингование, равным 0,1 миллиметр на зуб. При этом после зубофрезерования  $F_{ir}'' = 0,07$  и  $f_{ir}'' = 0,03$ , а после кругодиагонального протягивания  $F_{ir}'' = 0,098$  и  $f_{ir}'' = 0,07$ . Точность зубчатых колес (партии по 50 шт.) после шевингования была у предварительно протянутых колес выше, чем у предварительно фрезерованных червячной фрезой.

Исходя из вышеизложенного, можно заключить, что метод формообразования зубьев цилиндрических колес при прочих равных условиях, оказывает существенное влияние на выходную точность операций зубонарезания. Также следует отметить, что при формировании технологического процесса зубообработки на предварительных операциях формообразования зубьев целесообразно использовать метод копирования, а на отделочных операциях – метод обката.

Данные рекомендации позволяют увеличить производительность черновых операций, повысить точность отделочных операций, сократить требуемое количество оборудования и снизить производственные затраты на зубообработку.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Критерии** оптимизации зубообрабатывающих операций основанных на различных методах формообразова-

ния зубьев/ А.А. Черепакхин, В.М. Виноградов // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2012. Т. 2. № 2 (14), С. 238–242.

2. **Параметрическая** оптимизация зубообрабатывающих операций/ А.А. Черепакхин, В.М. Виноградов // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2013. Т. 2. № 1 (15). С. 22–30.

3. **Повышение** качества и производительности процесса шевингования зубчатых колес / Б.М. Солоницын, В.В. Клепиков // Вестник машиностроения. 2008. №8. С. 54–55.

4. **Пути** совершенствования технологических систем / О.В. Таратынов, В.В. Клепиков, А.А. Черепакхин // Технологии машиностроения. 2014. № 9. С. 61 – 63.

5. **Технологические** процессы машиностроительного производства/ А.А. Черепакхин, В.А. Кузнецов, В.В. Клепиков, В.Ф. Солдатов: М.: МГИУ, 2011. 118 с.

## REFERENCES

1. Criteria for optimization of tooth machining operations based on different methods of tooth shaping/ A.A. Cherepakhin, V.M. Vinogradov // *Proceedings of Moscow State Technical University MAMI*. 2012. Vol. 2. No 2(14), pp. 238–242.

2. Parametric optimization of tooth machining operations/ A.A. Cherepakhin, V.M. Vinogradov // *Proceedings of Moscow State Technical University MAMI*. 2013. Vol. 2. No 1 (15). pp. 22–30.

3. Quality and productivity increase in cog-wheel shaving process / B.M. Solonitsyn, V.V. Klepikov // *Bulletin of Mechanical Engineering*. 2008. No 8. pp. 54–55.

4. Ways for technological system updating / O.V. Taratynov, V.V. Klepikov, A.A. Cherepakhin // *Engineering Techniques*. 2014. No 9. pp. 61–63.

5. *Technological Processes in Mechanical Engineering* / A.A. Cherepakhin, V.A. Kuznetsov, V.V. Klepikov, V.F. Soldatov: M.: MSEU, 2011. pp. 118.

Рецензент д.т.н. А.С. Тарапанов

