УДК 621.92

Н.М. Расулов, Е.Т. Шабиев
Азербайджанский технический университет, Азербайджан
nariman.rasulov@yahoo.com; shebiyev@list.ru

О ГЛУБИНЕ РЕЗАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ЗУБЬЕВ КОПИРОВАНИЕМ

При шлифовке зубьев зубчатых колес способом копирования глубина резания распределяется вдоль профиля неравномерно, не обеспечивается эффективность процесса. Исследуется изменение глубины резания вдоль профиля при стабильности припуска обработки вдоль профиля. Получена система уравнений для определения глубины резания в любом участке эвольвентного профиля соответствующего искомого эвольвентного угла; проведен анализ и показано направление обеспечения относительно равномерного распределения глубины резание вдоль профиля.
Ключевые слова: *шлифовка, глубина, резание, профиль, круг, копирование, припуск.*

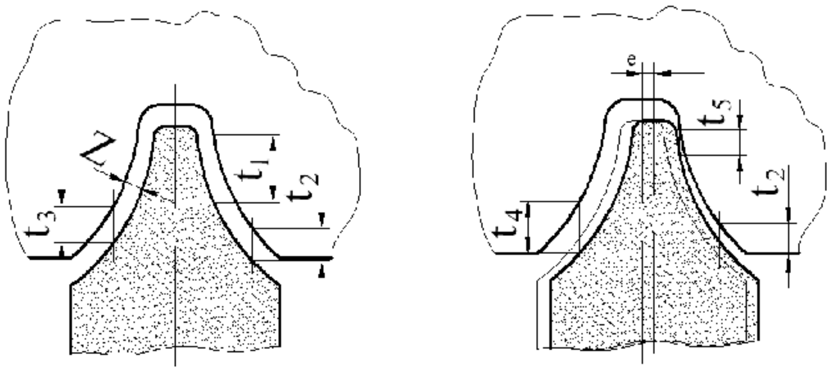
Введение. На современном этапе развития науки и техники качество производства и эксплуатация изделий приобретает первоначальное значение. В современных машинах, агрегатах и приборах широко применяются зубчатые передачи [1-3]. Эксплуатационные показатели технических средств, в том числе зубчатых передач формируются качеством их изготовления [4-6]. Одним из путей обеспечение высоких эксплуатационных показателей зубчатых передач является шлифование рабочих эвольвентных поверхностей щестерен и колес. Шлифование зубьев зубчатых колес наиболее надежный метод отделочной обработки, обеспечивающий высокую точность, обычно закаленных зубчатых колес. Одним из основных способов шлифования эвольвентных профилей является копирование с применением профильных шлифовальных кругов. Профиль абразивного круга имитирует профиль впадины между соседними зубьями [7,8].

Шлифование по методу копирования ведут дисковым кругом с профилем, точно соответствующим профилю впадины между соседними зубьями колеса. Абразивный круг периодически правят алмазным инструментом.

Припуск на шлифование составляет 0,2-0,3 mm на толщину зуба. Обработку производят в 3-4 прохода. Достигаемая точность 0,01-0,015 mm, шероховатость R_a=0.32 mkm. При шлифовании зубьев по методу копирования профиль шлифовального круга изнашивается неравномерно, искажается, что приводит к заметной погрешности формы зубьев колеса, особенно первого и последнего. При модуле зубьев более 10 mm одновременно шлифуют обе стороны одной впадины, при модуле менее 9 mm разные стороны двух соседних впадин [8].

Изменение глубины резания вдоль эвольвентного профиля. Изменение глубины резания при обработке поверхностей является одной из причин образования погрешностей обработки [4,7]. Так как поверхности зубьев являются криволинейными профилями, при их шлифовании глубины резания t вдоль эвольвентного профиля имеют разные значения. Они неравномерны по профилю и резко отличается от припуска Z и больше его ($t_1 \neq t_2 \neq t_3 \neq Z$; где t_1, t_2 и t_3 – глубины резания в разных участках профиля, рис. 1,а).

Кроме этого неравномерности глубины резание обусловливают еще:



а) б)

Рис.1. Схема изменения глубины резания: при идеальной организации

- погрешности базирование шлифуемой поверхности в двух направлениях:
процесса (а) и при смещении заготовки на величину *е* относительно инструмента (б)
смещения *(е)* плоскости симметрии канавки между соседними зубьями относительно плоскости симметрии абразивного круга (рис. 1,б; $t_1 \neq t_2 \neq t_4 \neq t_5 \neq Z$); погрешность углового положения шлифуемых зубьев.

- погрешности изготовление шлифуемых поверхностей на предыдущих операциях т.е. при нарезание зубьев лезвийными инструментами: отклонении эвольвентного профиля, шага и т. п.

Неравномерное распределение глубины резания по профилю порождает ряд негативных последствий. Неравномерность глубины резание вдоль шлифуемого профиля порождает в основном, нижеследующие недостатки процесса:

- ширина рабочей поверхности *H* абразивного круга значительно коротка по сравнению с длиной обрабатываемой поверхности. Интенсивность изнашивания инструмента при резании высока и быстро искажается его рабочий профиль. Поэтому частота исправления-заточки профиля высока, что снижает срок службы круга,

- рабочая поверхность круга а также его объем, принимающая теплоту, зарождаемую в зоне резания относительно мало, передача получаемой инструментом тепловой энергии в атмосферу слаба. Формируется высокий тепловой режим на обрабатываемой поверхности, создается условия “сгорания” обрабатываемой поверхности и на поверхности образовываются нежелательные микротрещины, являющиеся очагами разрушения рабочих поверхностей зубьев при работе. [1,2],

- для предотвращения (уменьшения) погрешности формы зубьев при шлифовании поворачивают шлифуемое колесо на несколько зубьев. Однако не выявлено до сих пор, оптимальное значение количества поворачиваемых зубьев, опираемое на эффективность процесса по каким-либо его параметром,

- погрешности формы зубьев, порождаемые из-за неравномерности глубины резания вдоль эвольвентного профиля обусловливают снижение эксплуатационных показателей зубьев.

- Мероприятия (например, увеличение количество проходов, облегчение режима обработки и т. п), принимаемые для исключения или снижения вышеуказанных недостатков приводят к увеличению машинного времени обработки, к снижению производительности и эффективности процесса.

Исходя из изложенного, выявление закономерности неравномерности распределения глубины резания вдоль эвольвентному профиля и разработка мероприятий обусловливающей ее сглаживание является актуальными.

Закономерность изменение глубины резания. Анализ механизма формирование профиля при шлифовании и вышеуказанных недостаток показывает, что основной причиной, порождающий их является почти совпадение направлений вертикальной подачи при наладке инструмента на глубины резания и эвольвентного профиля (почти вертикально). В результате чего, образуется неравномерность глубины резание по профилю во всех проходах круга.

Допустим, что для шлифовки профиля зуба предусмотрен равномерный по всему профилю припуск, глубиной *Z*. *AF* является искомой его частью (рис.2). Точка *G* есть началом эвольвента. Радиус основной окружности равен *R*. Каким либо эвольвентным углом θ_k образовано точка *A* профиля. Глубина резание в этой точке равна t_x, при этом $t_x=AB\neq Z$.

Анализом выбранной схемы шлифования нетрудно выявить, что глубина резания максимальна (t_{max}) в начале эвольвентного профиля (точка *G*) и минимально (t_{min}) в ее конце. Таким образом, выясняется целесообразность определение функциональной зависимости между глубиной резание и искомым эвольвентным углом $t_x=f(\theta_k)$.

Технологической задачей является выявление зависимости $t_x=f(\theta_k)$ и с управлением ее определить пути повышения эффективности шлифования зубьев копированием. Здесь решается в основном первая часть задачи.

Ясно, что при обеспечении стабильности припуска *Z* по всей поверхности зуба, поверхность зуба заготовки должна быть эквидистантой на рабочей эвольвентной поверхности. Проводим образующую MB от точки B, принадлежащей эвольвентному профилю заготовки. Для вывода $t_x=f(\theta_k)$ продлеваем образующие точек *A* и *B* до пересечения их с осью симметрии соседних зубьев (одновременно с осью симметрии абразивного круга), точки *C* и *E*. Принимаем, что угол поворота начальной точки эвольвента *G* относительно оси симметрии равен θ_k. От точки *B* проводим параллель *BD* к образующей *NE*. Тогда согласно условиям построения, из параллелограмма *BDEA* и Δ*BCD*:

$$AB \parallel CE; \qquad BD \parallel AE;$$

$$AB=t_x=DE; \qquad FB=Z$$

Учитывая, что в ΔCBD BC⊥MO и BD∥NO

где $\theta_н$ - угол поворота начальной точки эвольвента,

θ_k – эвольвентный угол искомой точки A профиля,

θ_t – эвольвентный угол, охватываемой глубиной резания,

$$\theta_t = \theta_f - \theta_x$$

θ_f – эвольвентный угол точек B и F.

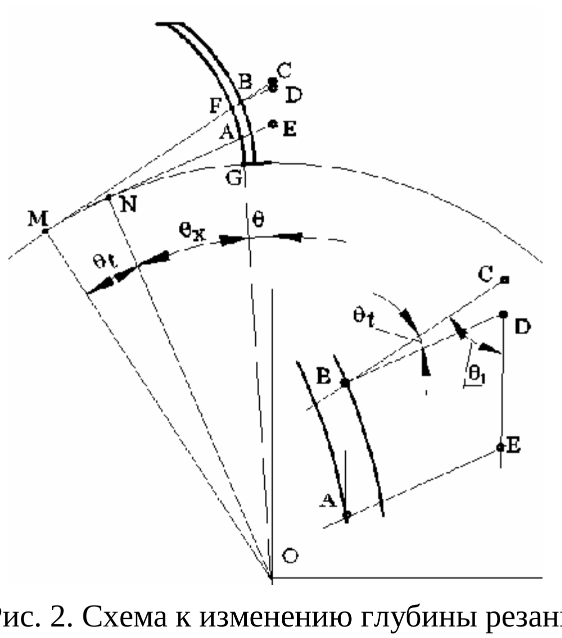


Рис. 2. Схема к изменению глубины резания

Найдем длины сторон ΔBCD.
Для простоты обозначим $t_x=x$.
Из ΔONE:

$$NE = NO\tan(\theta_x+\theta);= NA + AE = \rho_A + AE$$
$$EO = \frac{MO}{\cos(\theta_x+\theta)} = \frac{R}{\cos(\theta_x+\theta)} \quad (1)$$

где ρ_A– эвольвентный радиус точки профиля, $NA = \overset{\frown}{AG}$

$$\rho_A = \frac{2\pi R\theta_x}{360} = \frac{\pi R\theta_x}{180}\ ;\ NO = R \quad (2)$$

где R– радиус основной окружности.
Тогда

$$AE = NE - \rho_A = R\ \mathbf{tg}(\theta_x +]][(\theta) - \frac{\pi R\theta_x}{\mathbf{180}} = BD \quad (3)$$

Из ΔOMC:

$$CO = \frac{MO}{\cos(\theta_t+\theta_x+\theta)} = \frac{R}{\cos(\theta_t+\theta_x+\theta)} \quad (4)$$

$$MC = MO\ \mathbf{tg}(\boldsymbol{\theta_t}+\theta_x+]][(\theta) = R\ \mathbf{tg}(\boldsymbol{\theta_t}+\theta_x+]][(\theta) \quad (5)$$

Учитывая, что $MF = \overset{\frown}{MG}$ найдем эвольвентный радиус MF:

$$MF = \frac{\pi R(\theta_t+\theta_x)}{180} \quad (6)$$

Из геометрической построение очевидно, что

$$CD = CO - EO - DE;\quad BC = MC - MF - FB;\quad AE = NE - NA; \quad (7)$$

Если учесть (1), (2), (3), (4), (5) и (6) в (7) получим:

$$CD = \frac{R}{\cos(\theta_t+\theta_x+\theta)} - \frac{R}{\cos(\theta_x+\theta)} - x \quad (8)$$

$$BC = R\ \mathbf{tg}(\boldsymbol{\theta_t}+\theta_x+]][(\theta) - \frac{\pi R(\theta_t+\theta_x)}{\mathbf{180}} - z \quad (9)$$

Согласно теореме синусов, из ΔBCD:

$$\frac{BD}{\sin\theta_1} + \frac{CD}{\sin\theta_t} \quad (10)$$

Учитывая (3) и (8) в (10), получим:

$$\left[R\ \mathbf{tg}(\theta_x+]][(\theta) - \frac{\pi R\theta_x}{\mathbf{180}}\right]\sin\theta_t = \left[\frac{R}{\cos(\theta_t+\theta_x+\theta)} - \frac{R}{\cos(\theta_x+\theta)} - x\right]\sin\theta_1 \quad (11)$$

Согласно теореме косинусов, из ΔBCD:

$$CD^2 = BC^2 + BD^2 - 2BC\cdot CD\cdot cos\theta_t \quad (12)$$

Учитываем (3), (8) и (9) в (12):

$$\left[\frac{R}{\cos(\theta_t+\theta_x+\theta)} - \frac{R}{\cos(\theta_x+\theta)} - x\right]^2 = \left[R\,\mathrm{tg}[(\theta_t+\theta_x] + \theta) - \frac{\pi R(\theta_t+\theta_x)}{180} - z\right] +$$

$$+\left[R\,\mathbf{tg}(\square)[\theta_x + +\theta) - \frac{\pi R\theta_x}{180}\right]^2 - 2\left[R\,\mathbf{tg}(\theta_x+\theta) - \frac{\pi R\theta x}{180}\right]\left[R\,\mathbf{tg}(\theta_t+\theta_x+][\theta) - \frac{\pi R(\theta_t+\theta_x)}{180} - z\right]\cos\theta_t \quad (13)$$

Получена система уравнений состоящая из (11) и (13). Решением ее относительно *x* можно получить математическую модели глубины резания. При конкретных - локальных значениях, уравнения (11) и (13) обладают двумя неизвестными (x и θ_t). Нет необходимости представить здесь решение системы традиционными математическими методами. Также не представляет трудности решение ее с применением современных программ (например, МАТЛАБ и др.) относительно $x=t_x$. Диапазон изменений эвольвентного угла θ_x в уравнениях (11) и (13) ограничивается наружном диаметром колесо и $0\leq\theta_x\leq\theta_{max}$. Согласно (11) и (13) при $\theta_x=0$ глубина резания $t_x=t_{max}$ при $\theta_x=\theta_{max}$, $t_x=t_{min}$.

Если в уравнениях (11) и (13) принять $\theta_x=0$, то получим уравнения, соответствующие максимальной глубине резание, $x=t_{max}$:

$$R\,\mathrm{tg}\,\theta\sin\theta_t = \left(\frac{R}{\cos(\theta_t+\theta)} - \frac{R}{\cos\theta} - x\right)\cos(\theta_t+\theta) \quad (14)$$

$$\left(\frac{R}{\cos(\theta_t+\theta)} - \frac{R}{\cos\theta} - x\right)^2 = \left[R\,\mathrm{tg}[(\theta]_t+\theta) - \frac{\pi R\theta_t}{180} - z\right]^2 + (R\,\mathrm{tg}\,\theta)^2 - 2R\tan\theta\cdot$$

$$\cdot\left[R\,\mathrm{tg}[(\theta]_t+\theta) - \frac{\pi R\theta_t}{180} - z\right]\cdot cos\theta_t \quad (15)$$

Вложив в формулы (11) и (15) значения *R* и θ, выраженные модулем *m* и количеством зубьев *z* любого колеса можно определить максимальную глубины резания и сравнить его с припуском *z*.

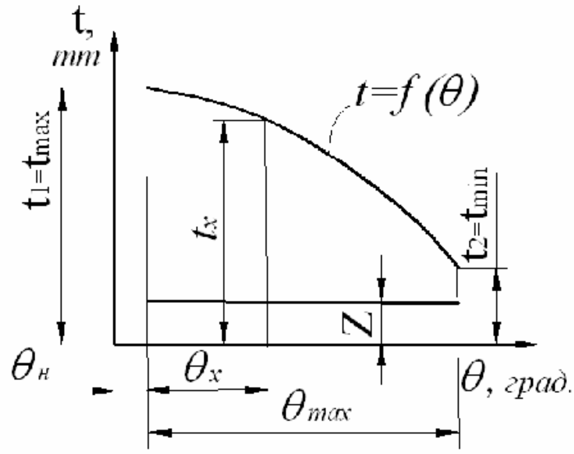


Рис. 3. Зависимость глубины резания

Анализом уравнений (11) и (13) выявляется, что с увеличением угла $\theta_н$ уменьшается глубина резания при данном значении припуска *z*, улучшается условия шлифования. Значит, увеличение наклона эвольвентного профиля обусловливает уменьшение глубины резания, обеспечивает более равномерное ее распределение. При $\theta_н=90^0$ $t_{max}=z$ обеспечивается. Однако при шлифовке зубьев копированием обеспечение $\theta_н=90^0$ невозможно.

Так как при этом абразивный круг срезает головку соседнего зуба. На от эвольвентного угла поворота рис. 2. представлена обобщенная графическая профиля зависимость $t_x=f(\theta_x)$ при минимальномзначении $\theta_н\theta min$.

Выводы:

- при шлифовании зубьев методом копирования глубина резания изменяется вдоль эвольвентного профиля;

- максимальное значение глубины резание соответствует к началу эвольвентного профиля, минимальное ее значение к концу профиля;

- с увеличением наклона эвольвентного профиля и с отделением ее участков от начала эвольвента значения глубин резания уменьшаются и приближаются к припуску;

- для повышения эффективности процесса шлифование зубьев копированием необходимо обеспечить относительно высокий наклон зубьев при шлифовании.

Список литературы:

1. Артамонов В.Д. Анализ эффективности процессов зубонарезания цилиндрических колес: монография / В.Д. Артамонов, Ю.Н. Федоров. – Тула: ТулГУ, 2008. – 356 с.

2. Калашников А.С. Технология изготовления зубчатых колес / А.С. Калашников. – М.: Машиностроение, 2004. – 480 с.

3. Производство зубчатых колес: Справочник / Под общ. ред. Б.А. Тайца. – [3-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Машиностроение, 1990. – 464 с.

4. Базров Б.М. Основы технологии машиностроения / Б.М. Базров. - М.: Машиностроение, 2005. - 736 с.

5. Расулов Н.М. Управление качеством изделия в процессе его изготовления / Н.М. Расулов // Вестник машиностроения. – 2013 - № 2. - С. 83-86.

6. Расулов Н.М. О качестве изготовления изделий и их долговечности / Н.М. Расулов, У.М. Надиров, Г. Р. Гусейнов // «Современные методы и технологии создания и обработки материалов»: Сб. науч. тр. - Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2013. – –

Кн. 2: Технология и оборудование мех. и физико-тех. обработки. - 2013. – С. 434-443.

7. Справочник технолога машиностроителя: в 2 т. / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. - Москва: Машиностроение, 2003. - 912 с.

8. Технология производства и методы повышения качества зубчатых колес и передач / Под общ. ред. В.Е. Старжинского и М.М. Кане. – СПб: Профессия, 2007. – 832 с.

Надійшла до редакції 11.02.2014

Н.М. Расулов, Е.Т. Шабиев

ПРО ГЛИБИНУ РІЗАННЯ ПРИ ШЛІФУВАННІ ЗУБІВ КОПІЮВАННЯМ

При шліфовці зубів зубчастих коліс способом копіювання глибина різання розподіляється уздовж профілю нерівномірно, не забезпечується ефективність процесу. Досліджується зміна глибини різання уздовж профілю при стабільності припуску обробки уздовж профілю. Отримана система рівнянь для визначення глибини різання у будь-якій ділянці евольвентного профілю відповідного шуканого евольвентного кута; проведений аналіз і показаний напрям забезпечення відносно рівномірного розподілу глибини різання уздовж профілю.

Ключові слова: *полірувальні глибину, різання, профіль, коло, копіювання, допомога.*

H. M. Rasulov, E.T. Shabiyev

DEPTH OF CUT IN GRINDING TEETH BY COPYING

During polishing the teeth of gears by copying the cutting depth is distributed along the profile unevenly and the process is not efficient. We studied the change of depth of cutting along the profile with stability of allowance of processing along profiles. We obtained a system of equations to determine the depth of cutting in any part of the involute profile corresponding to the desired angle of the involute, conducted the analysis and showed the direction of the relatively even distribution of cutting depth along the profile.

Keywords: *polishing depth, cutting, profile, circle, copy, allowance.*