

# ТЕПЛОФИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТЯХ КОНТАКТА В ПРОЦЕССЕ ВИБРОУПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Игорь Е. ГРИЦАЙ<sup>1</sup>  
Андрей В. КОЗАК<sup>2</sup>

## STRESZCZENIE

*Наведено описание нового метода чистовой и упрочняющей обработки зубчатых колес на основе введения на контактных поверхностях заготовки и инструмента-обкатника виброколебаний с приложением ограниченной радиальной нагрузки. Приведены зависимости для расчетов основных технических и технологических параметров процесса, тепловых потоков на поверхностных слоях зубьев обрабатываемого колеса и температуру процесса.*

Как известно, в начальной стадии приработки деталей и во время эксплуатации машин на поверхностях контакта происходят процессы ускоренного истирания, переходящего в стадию равномерного износа на протяжении всего периода работы машин и механизмов. Эти процессы характеризуются уменьшением высоты микро- и макронеровностей (одновременно с увеличением зазоров в сопряжениях), поверхностным упрочнением, перераспределением напряжений в поверхностных слоях и формированием новой структуры деталей. Однако эти процессы, сказывающиеся отрицательно на показателях эксплуатационного качества, можно использовать в технологии окончательной обработки деталей

---

<sup>1</sup> prof. dr hab. inż. Igor E. Hrycaj – Politechnika Lwowska

<sup>2</sup> mgr inż. Andrej W. Kozak – doktorant Politechniki Lwowskiej

машин для обеспечения заданных свойств их поверхностных слоев с целью повышения долговечности и работоспособности деталей.

Рассмотрим сущность такой технологии на примере обработки зубчатых колес. Для чистовой обработки и поверхностного упрочнения зубьев в автомобильной промышленности применяют метод силовой обкатки, заменяющий малоэффективный процесс зубошевиногования. В нашем методе, в отличие от известного, на порядок уменьшаем силу обката. Одновременно, для интенсификации контактных процессов и возникновения теплового воздействия используем колебания в технологической системе с диапазоном частот 80 – 200 Гц. Инструментом служит зубчатое колесо, на эвольвентных профилях которого нанесен регулярный рельеф, например, сечения или раскатка. Принимая во внимание характер процесса, точность изготовления инструмента можно ограничить 8 – 9 степенью точности, при чем перед нанесением рифления и термообработкой (до 47-52 *HRc*) зубья должны быть шлифованы,  $R_a 1,25-2,5$  [1].

Уменьшение усилия обкатки позволяет реализовать данный метод с использованием стандартного оборудования, например на станках токарной или фрезерной групп. Для придания инструменту радиальных колебаний можно использовать серийные электромагниты.

Данный метод можно реализовать в беззазорном зацеплении обрабатываемого колеса и инструмента, при двустороннем контакте зубчатых профилей. В этом случае колесо-инструмент не имеет собственного привода, а обкатка осуществляется за счет вращения заготовки от шпинделя станка. (рис.1). Для однопрофильного зацепления станок необходимо оснастить дополнительной гитарой деления. Ведущая шестерня гитары устанавливается на рабочую оправку, а сама гитара – на суппорт токарного станка. Принудительное вращение инструмента, согласованное с помощью гитары с вращением заготовки, передается инструменту через дополнительный шпиндельный узел. Увеличить жесткость системы можно с помощью 1-го или 2-х колес того же модуля, устанавливаемых со стороны, противоположной действию радиальной силы. Регулирование радиального усилия в схеме, приведенной на рис.1, возможно с помощью пружины 12, а изменение амплитуды колебания достигается за счет изменения величины воздушного зазора  $\Delta$  между торцом электромагнита и подвижной плитой привода штока.

Предварительное нагружение системы осуществляется радиальным сближением заготовки и инструмента. Тарирование нагрузки в системе можно производить с помощью статического динамометра. Начальное статическое усилие выбирается в зависимости от радиальной жесткости станка с такого расчета, чтобы прогиб оправки с заготовкой,

установленной в патрон с поджатием центром задней бабки, не превышал  $1/80 - 1/100$ .

Для моделирования теплофизических процессов, происходящих на контактируемых поверхностях, необходимо выполнить ряд взаимосвязанных действий и расчетов.

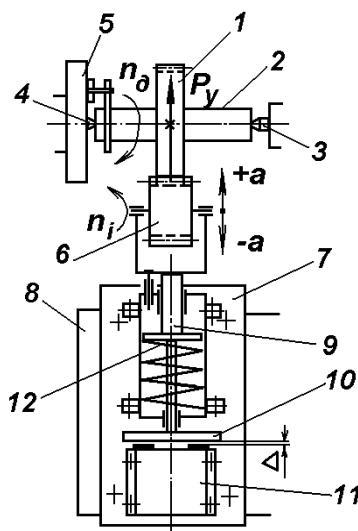


Рис.1. Схема установки виброупрочняющей обработки

1- заготовка зубчатого колеса; 2 - рабочая оправка; 3 - центр пиноли задней бабки; 4 - передний центр; 5 - поводковый патрон; 6 - инструмент-обкатник; 7 - колебательный механизм; 8 - поперечный суппорт; 9 - шток обкатника; 10 - подвижная пластина; 11 - электромагнит; 12 - пружина; - зазор

## 1.СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ В ЗАЦЕПЛЕНИИ

По обеим системам профилей обкатника и зубчатого колеса действуют тангенциальная сила  $P_z$  от вращательного момента на шпинделе, создаваемая приводом станка и сила радиального нагружения  $P_y$  (предварительного натяжения в системе, статического сближения). Выразим составляющую  $P_z$  с помощью соотношения  $P_z = k P_y$ , тогда в полюсе зацепления силы, действующие по нормали к профилям равны:

$$\begin{aligned} N_l &= P_y (\sin \alpha_{\varpi} + k \cos \alpha_{\varpi}); \\ N_n &= P_y (\cos \alpha_{\varpi} - k \sin \alpha_{\varpi}) \end{aligned} \quad (1)$$

Вследствие движения обката силы, действующие на правые и левые профили в зацеплении, будут различными. Как следует из зависимостей (1), только лишь при соотношении  $k = P_z / P_y = 0,5$  нормальные к левым и

правым профилям силы будут равны по величине. Следовательно, для одновременной обработки двух систем профилей (без реверса) усилие радиального сближения необходимо определять в зависимости от мощности от главного привода и общего передаточного отношения к шпинделю станка.

## 2.ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТИЧЕСКОЙ ПЛОЩАДИ КОНТАКТА, ДАВЛЕНИЯ И УДЕЛЬНОЙ СИЛЫ ТРЕНИЯ

В результате приложения первоначальной статической нагрузки происходит сминание микрообъемов боковых поверхностей зубьев заготовки и сближение контактируемых эвольвентных профилей заготовки и инструмента. В пределах длины контакта эвольвентных профилей шлифованную поверхность обкатника будем считать гладкой, а шероховатость зубчатого колеса отвечает качеству черновой обработки поверхности с параметром  $R_z$  16-20 мкм. Условия упругого контакта поверхности зуба заготовки и инструмента в пределах единичного выступа микронеровности примем, как контакт гладкой поверхности с поверхностью сферы. Для этого случая воспользуемся зависимостью для расчета радиального сближения  $y$ , полученной на основании формулы Герца [2]:

$$y = 0,83 \cdot \left[ \frac{N^2}{r} \cdot \left( \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)^2 \right]^{1/3}, \quad (2)$$

где  $\mu_{1,2}$ ,  $E_{1,2}$  - соответственно, коэффициент Пуассона и модуль упругости материалов обкатника и заготовки;  $r$  – радиус округления вершины выступа (сферы);  $N$ .- сила, вызывающая деформацию, направленная по нормали к профилям.

По экспериментальным данным Петросова В.В. величина радиуса кривизны опорной поверхности профиля для предварительно обработанных поверхностей составляет [3]:

Параметр шероховатости поверхности $R_a$ , мкм	Радиус кривизны опорной поверхности профиля, мкм	
	в продольном направлении, $r_x$	в поперечном направлении $r_y$
5 - 0,32	10 - 25	20 - 120

Приведенный радиус опорной поверхности:  $r = \sqrt{r_x^2 + r_y^2}$ . Согласно

данным Демкина Н.Б. и Рыжова Э.В. для условий, близких к зубофрезерованию,  $r = 15 - 55$  мкм.

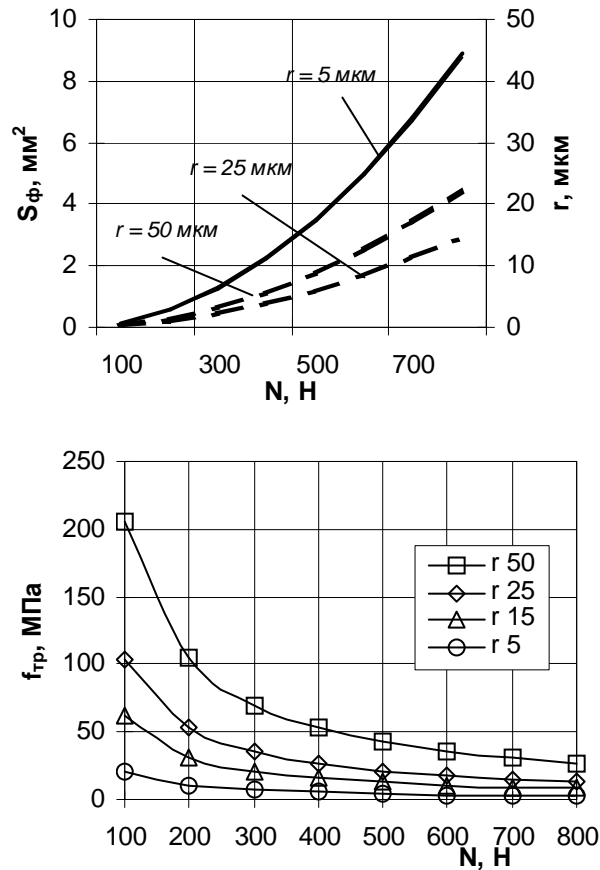


Рис.2. Зависимость фактической площади  $S_\phi$  (а) и удельной силы трения  $f_{тр}$  на поверхностях зубьев колеса от нагрузки и радиусов округления опорной поверхности  $E = 2,05 \cdot 10^5$  МПа;  $\mu_1 = 0,26$  (сталь 45, заготовка);  $\mu_2 = 0,3$  (легированная сталь, инструмент); ширина венца 20 мм; длина контакта (для  $R_z = 16 - 20$ ) 2, мм.; коэффициент сухого трения 0,15

На основании исследований Крагельского И.В. и Демкина Н.Б. относительная площадь контакта на расстоянии от вершины выступа до уровня поверхности основания, равной  $(R_z - y)$  можно определить из зависимости:

$$\eta = b \cdot \left( \frac{y}{R_z} \right)^v = \frac{S_\phi}{S_n}, \quad (3)$$

где:  $b, v$  - параметры, зависящие от вида обработки;  $S_{\mu}, S_{\phi}$  – фактическая и номинальная (максимально возможная) площадь контакта. Величины  $b$  и  $v$  для поверхностей предварительно нарезанных зубьев примем как для поверхностей после фрезерования и токарной обработки:  $v = 3$ ;  $b = 1-3$ . Зависимости (1) – (3) дают возможность определить давление на фактических поверхностях контактирования обкатника и заготовки зубчатого колеса и величину удельной силы трения, вызывающую нагрев и тепловые потоки на сопряженных поверхностях и телах (рис.2).

### 3. СКОРОСТЬ СКОЛЬЖЕНИЯ

Скорость скольжения профилей  $V_{sy}$  в зубчатом зацеплении определим как скорость взаимного перемещения профилей сопрягаемых колес с учетом виброколебаний. Если амплитуда вибраций обкатника  $a$ , мм а частота –  $f$ , Гц, то для зубчатого зацепления

$$V_{sy} = \frac{d_u}{2} \cdot (\omega_1 + \omega_2) \cdot (tg \alpha_y - tg \alpha_{\omega})_y \pm 2 \cdot a \cdot f, \quad (4)$$

где  $d_b$  – диаметр начальной окружности колеса;  $\omega_{1,2}$  - угловая частота вращения заготовки и обкатника;  $\alpha_y$  - центральный угол, отвечающий положению рассматриваемой точки скольжения на линии зацепления.

В полюсе зацепления  $\alpha_y = 0$ , а взаимное движение профилей отвечает условиям качения. Максимальное скольжение, соответствующее значению  $\alpha_y = \alpha_{\omega}$ , происходит в основании ножки и на вершине выступов зубьев.

### 4. ТЕПЛОТА И ТЕМПЕРАТУРА НА ПОВЕРХНОСТЯХ КОНТАКТА.

Вследствие вибраций в контактной зоне трение скольжения и теплообразование происходит не только как результат обкатки, но и как следствие периодических возвратно - поступательных движений инструмента. Количество циклов трения  $N_u$  зависит от соотношения между амплитудой и частотой вибраций и скоростью скольжения профилей. Путь источника теплоты, который перемещается со скоростью относительного скольжения  $V_{sy}$  за время, равное периоду колебаний  $T$  обкатника равен  $L_T = V_{sy} \cdot T$ , а путь этого источника вследствие колебаний составит  $2a$ . Тогда количество циклов трения в точке профиля (т.е. линии на ширине венца) можно определить из соотношения:

$$N_u = \frac{2a}{L_T} = \frac{2a}{T} \cdot \frac{1}{V_{sy}} = \frac{V_a}{V_{sy}}, \quad (6)$$

где  $V_a$  - скорость перемещения источника теплоты вследствие вибраций с

параметрами  $a$ ,  $T$ .

На рис.3. показана зависимость количества циклов обработки от положения точки контакта на длине линии зацепления для различных модулей по правой и левой системам профилей. Данные для расчетов: частота колебаний 100 Гц, амплитуда  $\pm 0.2$ ; скорость вращения заготовки 7,2 м/мин.; количество зубьев заготовки  $z_1 = 27$ , инструмента  $z_2 = 54$ , передаточное отношение 0,5.

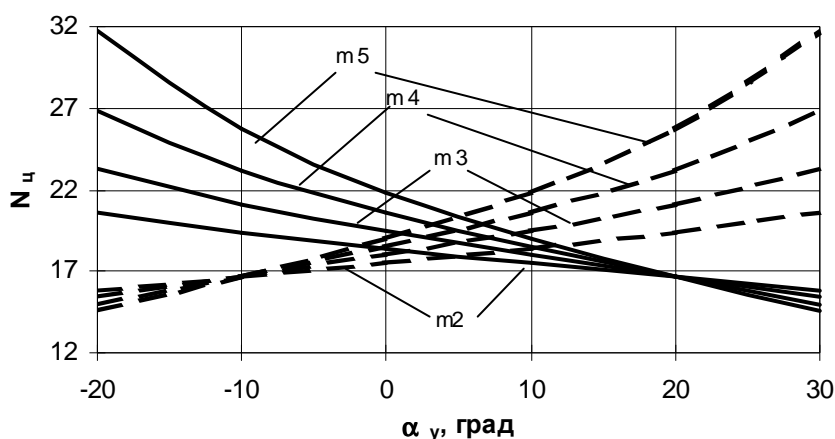


Рис.3. Количество циклов обработки на длине линии зацепления по левой (сплошные линии) и правой (штриховые линии) системам профилей при значении модуля 2 – 5 мм

В предложенном методе обработки и упрочнения поступление энергии извне отсутствует, вся теплота генерируется на площадке контакта зубьев обкатника и заготовки, а места образования теплоты совпадают с зоной трения и деформирования. Эта зона ограничена торцами — свободными поверхностями заготовки и инструмента и размерами площадки контакта, определяемыми шириной венца  $B$  и длиной прилегания поверхностей  $l_k$ . Скорости перемещения контактируемых поверхностей и условия зубчатого зацепления — закрытость рабочего пространства — дают основания считать для практических расчетов процесс теплообмена адиабатическим, а вся теплота, выделяющиеся вследствие трения будет распределена между инструментом и заготовкой.

Очаг интенсивного деформирования и тепловыделения создает тепловые потоки, перетекаемые в заготовку и инструмент. Распределение теплоты между обкатником и заготовкой определится соотношением удельной теплоемкости материалов этих тел:  $C_{и} / C_{д}$ . Величину теплового потока, направленного в зубчатое колесо в результате действия  $N_{ц}$ ,

определим на основании удельной силы трения и скорости взаимного скольжения поверхностей:

$$q = \frac{f_{mp} \cdot V_{sy}}{1 + \frac{C_u}{C_o}} \cdot N_u \quad (8)$$

где  $f_{mp}$  - удельная сила трения на фактической площади контакта, МПа;  $V_{sy}$  - скорость взаимного скольжения профилей в м/мин (размерность  $q$  – Дж/(мм<sup>2</sup> \* мин)). На рис.4 наведена зависимость интенсивности тепловых потоков в заготовку при соотношении  $C_u / C_d = 0,5$  (поверхность закаленная высокой твердости - инструмент и поверхность незакаленная, низкой твердости - заготовка) от удельного трения и нормальной к профилям силы при частоте колебаний 100-300 Гц.

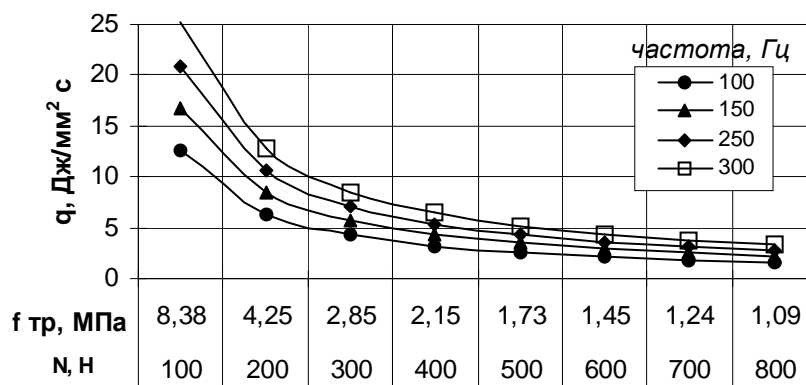


Рис.4. Интенсивность тепловых потоков в заготовку в зависимости от удельного трения и нормальной силы для частоты колебаний обкатника 100-300 Гц

В рассматриваемом методе чистовой обработки и упрочнения процесс пластического деформирования поверхностного слоя осуществляется силой трения, действующей по касательной к обрабатываемой поверхности. Под действием тангенциального циклически действующего нагружения изменения в поверхностном слое происходит вследствие сдвиговой деформации, т.е. данный процесс является микрорезанием. Аналогия с резанием позволяет использовать для расчета температуры поверхностного слоя зависимости, полученные для процесса резания, в частности, результаты исследований А.Н. Резникова [4].

В общем случае для линейного быстродвижущегося равномерно распределенного источника теплоты зависимость для расчета



максимальной температуры на поверхности контакта тела ограниченной толщины имеет вид [4]:

$$\theta_{\max} = \frac{2 \cdot q}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{B \cdot \chi}{\pi \cdot V_{sy}}} \cdot k_{\phi}, ^{\circ}\text{C},$$

где  $\lambda_0$  - коэффициент теплопроводности инструментального материала, Дж / см·с· $^{\circ}\text{C}$ ;  $\chi$  - коэффициент температуропроводности инструментального материала, см $^2$  / с;  $q$  - интенсивность источника теплоты, Дж / см $^2$ ·с;  $B$  - линейная длина источника, равна ширине венца, мм;  $V_{sy}$  - скорость взаимного скольжения, м / мин.;  $K_{\phi}$  - коэффициент формы быстродвижущегося источника теплоты [4].

По данным Резникова А.Н. теплофизические характеристики инструментальных сталей мало зависят от температуры, поэтому коэффициенты теплопроводности и теплоемкости во всех точках на контактных поверхностях будем считать постоянными, а их значения примем равными значениям этих величин в ожидаемом температурном режиме, т.е. 100 - 200 $^{\circ}\text{C}$ .

Закономерности распределения средней температуры на поверхностях контакта зубьев на условиях пластического деформирования наведены на рис.5 (частота вращения шпинделя с заготовкой 7,2 мин $^{-1}$ , что соответствует скорости заготовки 0,76 м/мин). Деформирование с нагревом в результате вибраций на поверхностях в условиях сухого контактного трения позволяет уменьшить предел прочности на сдвиг, уменьшить высоту микронеровностей, сформировать сжимающие напряжения в поверхностных слоях. Интенсивный нагрев поверхности зубьев способствует скоростному упрочнению и дает возможность повысить степень упрочнения рабочих поверхностей зубчатых колес. Предложенная методика расчетов позволяет назначать основные конструктивно-технологические параметры процесса вибросилового обкатывания – скорость обката, число зубьев частоту и амплитуду колебаний обкатника, усилие предварительного натяжения в системе для формирования заданных физико-механических свойств зубчатых колес.

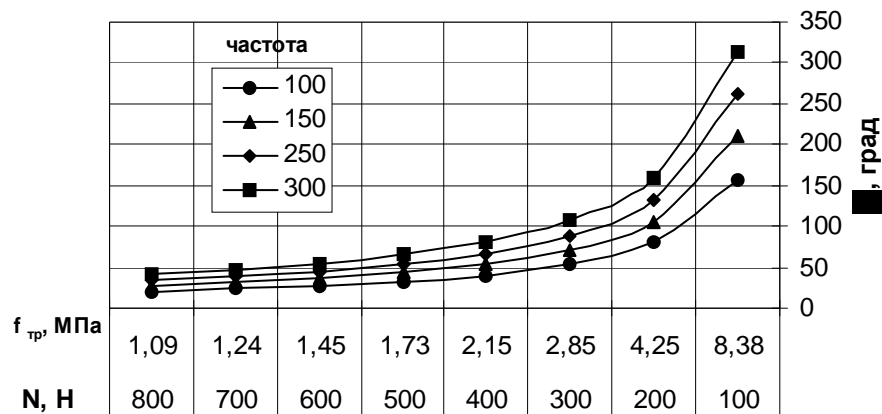


Рис.5. Средняя температура на поверхности контакта в зависимости от удельного давления при частоте вибраций 100 – 300 Гц и скорости шпинделя 0,76 м/мин

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Грицай І.Є., Кук А.М. Спосіб чистового оброблення і поверхневого зміцнення зубчастих коліс. Патент України на корисну модель № 24170 від 25.06.2007.
- [2] Рыжов Э.В. Контактная жесткость деталей машин. М.: Маш-е, 1966. – 196 с.
- [3] Петросов В.В. Гидродробеструйное упрочнение деталей и инструмента. М.: Маш-е, 1977. – 103 с.
- [4] Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
- [5] Якимов А.В. и др. Теплодинамика механической обработки / А.В.Якимов, П.Т.Слободянюк, А.В.Усов. – К.; Одесса: Лыбидь, 1991. – 240 с.