

- современные зубофрезерные станки с высокопроизводительной системой ЧПУ (например, «Синумерик 840D»), обеспечивающей выполнение основных методов зубофрезерования, повышенной статической и динамической жёсткостью основных узлов, мощностью главного привода 25-30 кВт и бесступенчатым регулированием частоты вращения шлифовального шпинделя и шпинделя заготовки;
- червячные фрезы из порошковых быстрорежущих сталей и твёрдых сплавов, в том числе многозаходные, с маленьким внешним диаметром и большим числом стружечных канавок, с износостойкими покрытиями, как правило, возобновляемыми;
- надёжные быстродействующие зажимные приспособления, в том числе гидропластовые с возможностью увеличения посадочной втулки на 3-5% под действием гидравлической жидкости.

### Литература

1. Калашников А.С., Моргунов Ю.А., Калашников П.А. Современные методы обработки зубчатых колёс. Издательский дом «Спектр», Москва, 2012, 238 с.
2. Саушкин Б.П., Шандров Б.В., Моргунов Ю.А. Перспективы развития и применения физико-химических методов и технологий в производстве двигателей. // Известия МГТУ «МАМИ», 2012, № 2, с. 242-248.
3. Виноградов В.М., Черепухин А.А. Критерии оптимизации зубообрабатывающих операций, основанных на различных методах формирования зубьев. М., // Известия МГТУ «МАМИ», № 2 (14), т. 2, 2012. с. 238-242.
4. Типалин С.А., Шпунькин Н.Ф., Никитин М.Ю., Типалина А.В. Экспериментальное исследование механических свойств демпфирующего материала // Известия МГТУ «МАМИ», 2010. № 1. с. 166-170.

### **Особенности протягивания отверстий инструментом с регулярным микрорельефом**

д.т.н. проф. Колтунов И.И., к.т.н. проф. Лобанов А.С.

*Университет машиностроения*

8 (495) 223-05-23, доб.1206, iik@mami.ru, isidt@mami.ru

*Аннотация.* В работе представлена методика расчета сил деформирования при протягивании отверстий деталей рабочими элементами протяжек с регулярным микрорельефом с учетом фактической площади контакта взаимодействующих поверхностей.

*Ключевые слова:* обработка, силы деформирования, регулярный микрорельеф, площадь контакта, контактные давления.

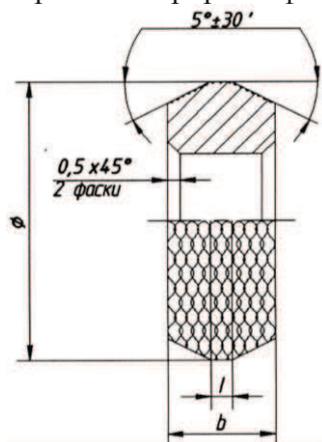
Важнейшей характеристикой процесса обработки отверстий деформирующими протяжками является сила деформирования, так как ее значение необходимо для расчета на прочность рабочих элементов, коэффициента трения, контактных давлений, температуры в зоне контакта инструмента с изделием, деформации обрабатываемой заготовки, а также для выбора оборудования, рациональных смазок и ряда других параметров.

Имеющиеся теоретические и эмпирические зависимости для определения сил деформирования не учитывают влияния фактической площади контакта деформирующих элементов с обрабатываемой заготовкой, несмотря на то что данный фактор является достаточно существенным.

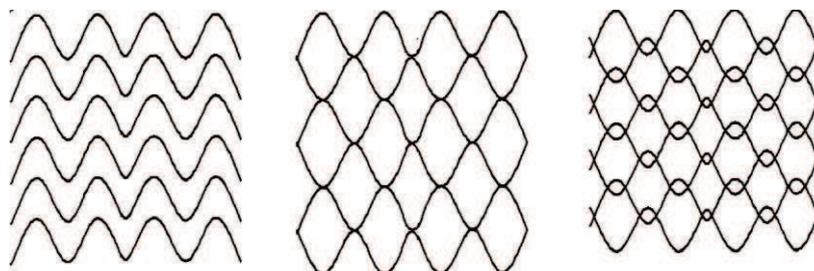
Это объясняется тем, что для деформирующих протяжек используются рабочие элементы с гладкими рабочими поверхностями, микрорельеф которых формируется традиционными методами финишной обработки (полированием, доводкой). В связи с тем что данные методы обработки не однородны по своей природе, образующийся микрорельеф рабочих по-

верхностей элементов носит иррегулярный, хаотичный характер. Такой характер микрорельефа не позволяет выполнять аналитические расчеты геометрических характеристик качества рабочих поверхностей, в частности фактической площади контакта деформирующих элементов с обрабатываемой заготовкой.

Данная задача может быть решена за счет применения деформирующих элементов с регулярным микрорельефом (РМР) (рисунок 1).



**Рисунок 1. Деформирующий элемент с регулярным микрорельефом**



**Рисунок 2. Виды микрорельефа поверхности при вибронакатывании**

Деформирующий элемент, имеющий симметричную форму с углом рабочего и обратного конусов  $5^{\circ} \pm 30'$  и цилиндрическую ленточку шириной  $0,8 \div 1$  мм, изготавливается по типовой технологии из быстрорежущей стали Р6М5 (HRC 62-65). Рельеф наносится алмазным выглаживателем с радиусом сферы  $R$  на токарном станке с помощью виброголовки.

Различают три основных вида РМР (1 вид – с непересекающимися канавками; 2 вид – с не полностью пересекающимися канавками; 3 вид – с полностью пересекающимися канавками) (рисунок 2).

Указанные виды микрорельефа формируются при выполнении следующих условий:

- для 1 вида микрорельефа

$$S > 2(\rho + e \cdot \sin \pi\{u\}); \quad (1)$$

- для 2 вида микрорельефа

$$2(\rho - e \cdot \sin \pi\{u\}) < S < (\rho + e \cdot \sin \pi\{u\}); \quad (2)$$

$$S > 2e \cdot \sin \pi\{u\}; \quad (3)$$

- для 3 вида микрорельефа

$$0 < S < 2e \cdot \sin \pi\{u\}; \quad (4)$$

$$S > 2(\rho - e \cdot \sin \pi\{u\}); \quad (5)$$

где:  $S$  – подача алмазного выглаживателя за один оборот обрабатываемого деформирующего элемента протяжки;

$\rho$  – радиус отпечатка, оставляющего при вдавлении сферического выглаживателя в рабочую поверхность деформирующего элемента

$$\rho = \sqrt{R \cdot h}; \quad (6)$$

$R$  – радиус сферического алмазного наконечника;

$h$  – глубина канавки;

$e$  – эксцентриситет эксцентрика создающего осцилляцию;

$\{u\}$  – дробная часть отношения

$$u = \frac{n_{\text{дв.х.}}}{n_x}, \quad (7)$$

показывающая величину смещения канавок относительно друг друга при каждом последующем обороте обрабатываемого элемента протяжки;

здесь:  $u$  – число циклов осцилляции за один оборот обрабатываемого элемента;

$n_{дв.х.}$  – число двойных ходов (циклов осцилляции);

$n_x$  – число оборотов обрабатываемых деформирующего элемента протяжки.

При наличии РМР площадь фактического контакта определяется как разность между номинальной площадью рабочих поверхностей деформирующих элементов и площадью, занимаемой на их развертке канавками, образованными на этих поверхностях в результате вибрационного выглаживания.

При обработке толстостенных деталей с малыми натягами контактирующими поверхностями является рабочий конус и цилиндрическая ленточка. Тогда, площадь фактического контакта  $F_{конт.}$  для данных поверхностей можно представить выражениями:

- для конической поверхности

$$F_{конт.к} = F_{ном.к} - F_{кан.}; \quad (8)$$

- для цилиндрической поверхности

$$F_{конт.л} = F_{ном.л} - F_{кан.}; \quad (9)$$

где:  $F_{ном.к.}$  и  $F_{ном.л.}$  – номинальные площади конической и цилиндрической поверхности, соответственно;

$F_{кан.}$  – площадь, занимаемая канавкой, образованной на данных поверхностях в результате выглаживания.

Для условий обработки, когда натяг деформирования  $i$  находится в пределах 0,02 - 0,4 мм, а отношение наружного диаметра заготовки к внутреннему составляет 1,3 номинальные площади рабочих поверхностей равны геометрическим площадям контакта:

- для конической поверхности

$$F_{ном.к} = \frac{\pi \cdot l}{2} \cdot (d_2 + d_1); \quad (10)$$

- для цилиндрической поверхности

$$F_{конт.л} = \pi \cdot d_1 \cdot b; \quad (11)$$

где:  $l$  – конической поверхности деформирующего элемента с обрабатываемой заготовкой;

$d_1$  – диаметр обрабатываемой заготовки;

$d_2$  – диаметр деформирующего элемента;

$b$  – ширина цилиндрической ленточки.

Ввиду того что угол рабочего конуса деформирующего элемента мал, то на малой ширине контакта ( $l = 0,2 \dots 3$  мм) конической поверхности с обрабатываемой заготовкой значением данного угла можно пренебречь.

Поэтому аналитический расчет площади занимаемой канавками, образованными на рабочем конусе и цилиндрической ленточке, можно выполнять по общей методике для РМР всех видов:

- при отсутствии пересечения канавок

$$F_{кан.} = \frac{u \cdot L \cdot z}{S}; \quad (12)$$

- при частичном пересечении канавок

$$F_{кан.} = \frac{u \cdot L \cdot (z - d)}{S}; \quad (13)$$

- при полном пересечении канавок

$$F_{кан.} = \frac{u \cdot L \cdot (z - 2\Sigma)}{S}; \quad (14)$$

где:  $z$  – площадь волны канавки, т.е. части канавки, образуемой за один период  $T$  осцилляции

$$z = \frac{2\pi \cdot \rho}{3 \cdot u} \cdot [2 d_2 + \sqrt{d_2^2 + (2e \cdot u)^2}]; \quad (15)$$

$d, \Sigma$  – площадь областей, по которым выдавливаемая канавка проходит более одного раза

$$d = \frac{16\pi \cdot d_2 \cdot e}{3 \cdot u} \cdot (\{u\} - \{u\}^2 + \frac{2\rho - S}{8e})^{\frac{3}{2}}; \quad (16)$$

$$\Sigma = \frac{2\rho^2 [d_2^2 + u^2 \cdot (4e^2 - S^2)]}{u \cdot d_2 \sqrt{4e^2 - S^2}}; \quad (17)$$

$L$  – длина обрабатываемого вибровыглаживанием участка рабочей поверхности деформирующего элемента ( $L = b$  – для цилиндрической ленточки;  $L = e$  – для рабочего конуса).

Подставляя формулы расчета номинальных площадей (10), (11) и площадей, занимаемых канавками (12), (13), (14), в выражения (8) и (9), получим зависимости для определения фактической площади контакта рабочих поверхностей деформирующих элементов с РМР всех видов.

В основу определения сил деформирования рабочими элементами с РМР с учетом фактической площади контакта положено решение, которое дает наиболее удовлетворительные результаты. Согласно данному решению, силу деформирования можно представить как сумму четырех слагаемых (рисунок 3):

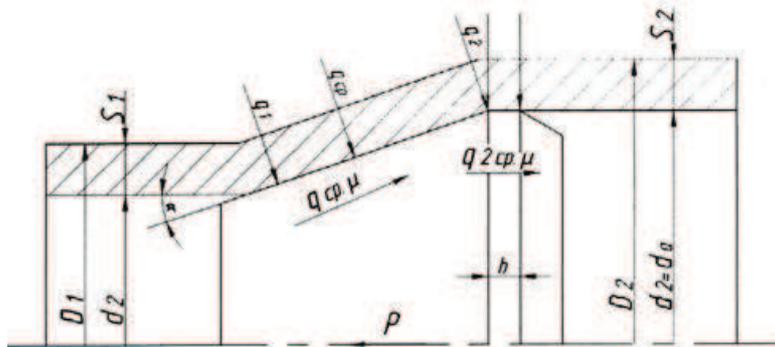


Рисунок 3. Схема расчета сил деформирования

$$p = p_d + p_m + p_l + p_{nam}, \quad (18)$$

где:  $p_d$  – сила на деформацию при формообразовании отверстия;

$p_m$  – сила на преодоление трения по конической поверхности деформирующего элемента;

$p_l$  – сила на преодоление трения по цилиндрической ленточке деформирующего элемента;

$p_{nam}$  – сила на преодоление внутреннего трения, обусловленная сдвиговыми деформациями и перегибами в сечении заготовки.

Необходимые для расчета составляющих силы деформирования давления на входе  $q_1$  и выходе  $q_2$  деформирующего элемента с учетом упрочнения металла и уточнения стенок заготовки определяются по формулам:

$$q_1 = \beta \cdot \sigma_1 \cdot \ln\left(\frac{D_1}{d_1}\right); \quad (19)$$

$$q_2 = \beta \cdot \sigma_2 \cdot \ln\left(\frac{D_2}{d_2}\right); \quad (20)$$

где:  $\beta = 1,0 - 1,15$  – коэффициент для плосконапряженного и плоскодеформированного состояния кольца;

$\sigma_1, \sigma_2$  – напряжение текучести металла, на выходе деформирующего элемента как функция относительного единичного натяга –  $e_d = \frac{i}{d}$ ;

$D, d$  – изменяющиеся размеры заготовки после деформирующего протягивания отверстия (рисунок 3).

Величины  $\sigma_1, \sigma_2$ , соответствующие расчетным значениям  $e_i = e_d$ , определяются по экстраполированным диаграммам.

Среднее значение давления на конической поверхности деформирующего элемента:

$$q = \frac{1}{2} \cdot (q_1 + q_2) = \frac{1}{2} \beta \cdot \left( \sigma_1 \cdot \ln \frac{D_1}{d_1} + \sigma_2 \cdot \ln \frac{D_2}{d_2} \right). \quad (21)$$

Зная среднее значение давления и фактическую площадь контакта рабочих поверхностей деформирующего элемента с РМР, можно определить составляющие силы деформирования.

Деформирующая сила, действующая по направлению движения инструмента, равна произведению среднего давления на проекцию контактной поверхности на плоскость, перпендикулярную к направлению деформирующей силы:

$$P_d = q_{ср.} \cdot F_{конт.} \cdot \sin \alpha. \quad (22)$$

Сила на преодоление трения по конической поверхности зависит от среднего давления и может быть учтена с помощью коэффициента трения:

$$P_m = q_{ср.} \cdot F_{конт.} \cdot \mu, \quad (23)$$

где:  $\mu$  – коэффициент трения.

Сила на преодоление трения по цилиндрической ленточке:

$$P_d = F_{конт.л.} \cdot \mu \cdot \sigma_2 \ln \frac{D_2}{d_2}. \quad (24)$$

Составляющие силы деформирования на преодоление внутренних потерь можно с достаточной степенью точности определить из уравнения:

$$P_{м.с.п.} = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \cdot k \cdot \sigma_{ср.} \cdot \alpha, \quad (25)$$

где:  $k$  – коэффициент трения, зависящий от условий обработки;

$\sigma_{ср.}$  – среднее деформационное напряжение текучести металла при деформировании отверстия заготовки с заданным натягом;

$\alpha$  – угол рабочего конуса деформирующего элемента в радианах.

Для выявления зависимости коэффициента  $k$  от натяга пластического деформирования  $i$ , толщины стенки заготовки  $t$  и твердости обрабатываемого материала (НВ) был проведен многофакторный эксперимент.

Была реализована матрица планирования вида  $2^3$ .

Таблица 1.

#### Уровни факторов

Уровни	$i$ , мм	$t$ , мм	(НВ)
Верхний	0,55	22,5	131
Основной	0,3	14	157
Нижний	0,05	5,5	183

В результате математической обработки получено выражение для определения коэффициента  $k$ :

$$k = 0,1795 + 1,7306 i - 0,0091 t - 0,03 it. \quad (26)$$

Суммируя значения составляющих, получим в общем виде уравнения для расчета силы деформирования при обработке отверстий деформирующим элементом с РМР всех видов, что позволяет оптимизировать параметры процесса деформирующего протягивания.

#### Литература

1. Фельдман Я.С. Технологическое обеспечение и оптимизация микрогеометрии поверхностей с частично регулярным микрорельефом: Дис... канд. тех. наук. Ленинград, Институт точной механики и оптики, 1986. - 183 с.
2. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. – Л.: Машиностроение, 1982. – 248 с.