

УДК 679.8

*И.Н. Миков, И.А. Науменко*

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТЕХНОЛОГИИ  
ГРАВИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ  
НА МАТЕРИАЛАХ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО  
МИКРО-ФРЕЗЕРОВАНИЯ**

Семинар № 18

**Ф**ормирование лунки при постоянной скорости осевой подачи  $-V_z = const$ .

Задачей динамического микро-фрезерования является создание на поверхности материала последовательности пробельных элементов в форме лунок, оптические плотности которых соответствуют оптическим плотностям внутренних слоев материала. Возникающие при нанесении изображения на поверхность пластичного материала посредством ударного воздействия инструмента (метод чеканки) «выплывы» приводят к искажению оптической плотности. При обработке хрупких материалов ударным воздействием образуется «дополнительный скол», который так же искажает оптическую плотность изображения. Предлагаемая технология исключает эти недостатки и, тем самым, обеспечивает повышение качества художественных изображений.

Рассмотрим процесс образования пробельного элемента при воздействии на металлическую поверхность движущегося поступательно вращающегося инструмента. Сверло имеет угловую скорость  $\omega$  и движется поступательно вдоль оси  $z$  со скоростью подачи  $V_z$ , преодолевает технологический зазор  $\Delta n$  и внедряется в толщу пластичного материала на глубину  $\Delta h_0$  (рис. 1).

Если принять, что за время внедрения на величину  $\Delta h_0$  скорость подачи и вращения постоянны ( $\omega = const$  и  $V_z = const$ ), то в результате сложения обоих движений траектория крайней точки  $M$  режущей кромки, сопрягающаяся с поверхностью заготовки имеет вид архимедовой спирали, лежащей в плоскости перпендикулярной оси  $Z$ , и описываемая полярным уравнением [3]:

$$\rho = k \cdot \varphi \quad (1)$$

где  $\rho$  – радиус спирали;  $k$  – смещение точки  $M$  по прямой  $UV$  при повороте последней на угол в один радиан, т.е.  $k = a/2\pi$ , где отрезок  $OM' = a$  – шаг спирали (рис. 2, а).

Полярный радиус - вектор  $\rho$  определяет форму образующей пробельного элемента на поверхности заготовки. По мере внедрения сверла в пластичный материал,  $\rho$  архимедовой спирали увеличивается и пропорционально ему увеличивается скорость резания. Вектор скорости результирующего движения (для крайней точки режущей кромки) -  $V_{рез}$  и его составляющие  $V_z$  и  $V_{вращ}$  в произвольной т.  $M$  приведены на рис. 2, б (при построении вектора  $V_z$  и  $V_{рез}$  развернуты и лежат в плоскости  $XOZ$ ). Угол между векторами  $V_z$  и  $V_{вращ}$  является углом  $\eta$  скорости резания, с учетом которого определяются геометрические параметры угла затылочки инструмента –  $\gamma$  (рис. 3) [1]. Таким образом,  $V_{рез}$ , который в значительной степени определяет режим работы режущей кромки зависит от скорости смещения рабочей точки  $M$  относительно начала координат (в плоскости  $XU$ ), скорости вращения и геометрии инструмента.

Оптическая плотность изображения  $D_в$  формируется из последовательности пробельных элементов  $\Delta h_0 = f(U_{видео})$ , где  $\Delta h_0$  – глубина погружения зависит от уровня видеосигнала -  $U_{видео}$ . При чем, величина относительной площади пробельного элемента  $s$  при общей площади растрового элемента  $S_0$  должна быть такой, чтобы обеспечить равенство оптической плотности оригинала  $D_ор$  и интегральной (визуальной) оптической плотности  $D_в$ , воспринимаемую потребителем (рис. 4). Этот этап декодирования аналитически описывается уравнением Шеберстова – Муррея – Девиса [2]:

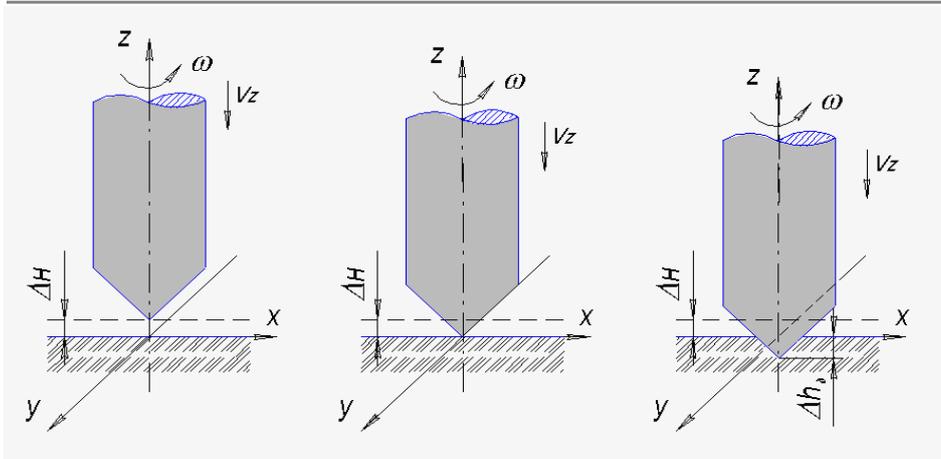


Рис. 1. Ввод инструмента на заданную глубину -  $\Delta h_0$

$$D_{\phi} = -\lg[s \cdot 10^{-D_n} + (1-s) \cdot 10^{-D_0}] \quad (2)$$

где  $D_n$  - оптическая плотность поверхности заготовки;  $D_0$  - оптическая плотность следа инструмента, величина относительной площади пробельного элемента определяется как:

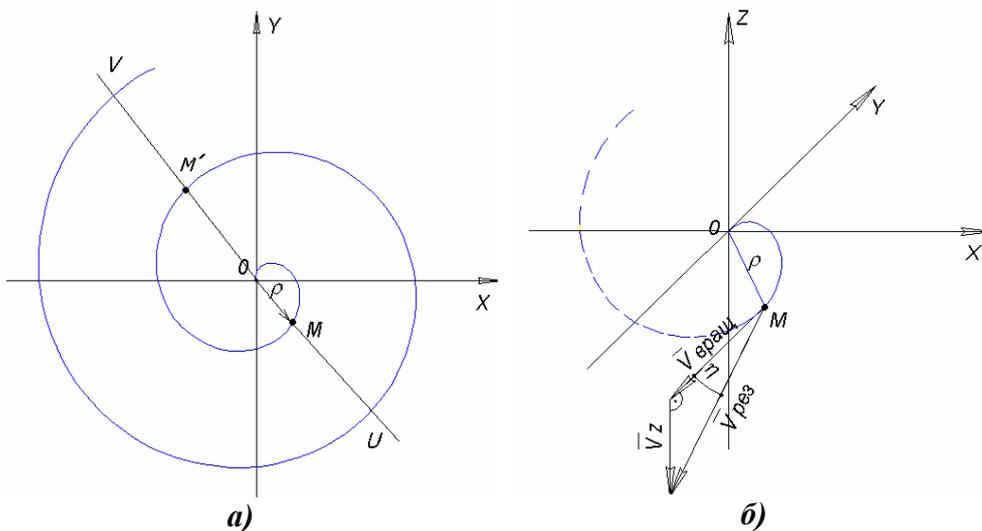
$$s = \frac{(S_0 - S_{np})}{S_0}, \quad (3)$$

окончательно:

$$D_{\phi} = -\lg \left[ \frac{S_0 - S_{np}}{S_0} \cdot 10^{-D_n} + \left( 1 - \frac{S_0 - S_{np}}{S_0} \right) \cdot 10^{-D_0} \right]. \quad (4)$$

Необходимо учитывать, что выбор инструмента с определенным двойным углом заточки конуса ( $\alpha = 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ ) определяет конфигурацию пробельного элемента (соотношение диаметра и глубины лунки). Рассмотрим случай, когда радиус вектор  $\rho$  совпадает с осью X. Из рис. 5 видно, что величина перемещения рабочей крайней точки M режущей кромки -  $\Delta x = \rho$ , тогда диаметр пробельного пятна определится как:

Рис. 2. Формообразование пробельного элемента



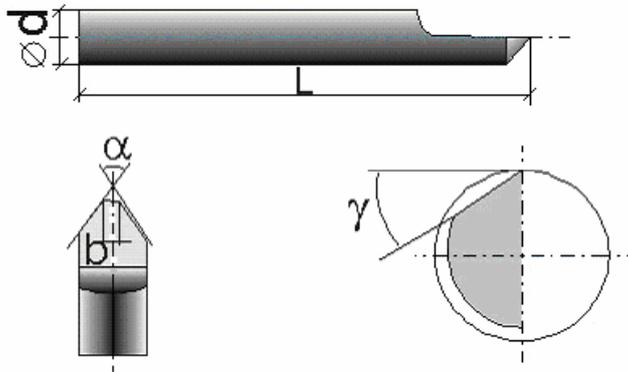


Рис. 3. Геометрические параметры режущего инструмента – конического гравера:

$d$  - диаметр хвостовика;  $L$  - длина гравера;  $\alpha$  - двойной угол конуса;  $\gamma$  - угол заточки;  $b$  - ширина режущей кромки;  $R$  - радиус режущей кромки

$$\Delta h_o = \frac{d}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \cdot \sqrt{\frac{S_{np}}{\pi}}$$

(7)

$$d = 2 \cdot \Delta x = 2 \cdot \Delta h_o \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}, \quad (5)$$

следовательно, площадь пробельного элемента запишется как:

$$S_{np} = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 = \frac{\pi}{4} \cdot (2 \cdot \Delta h_o \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2})^2, \quad (6)$$

тогда необходимая глубина внедрения инструмента равна:

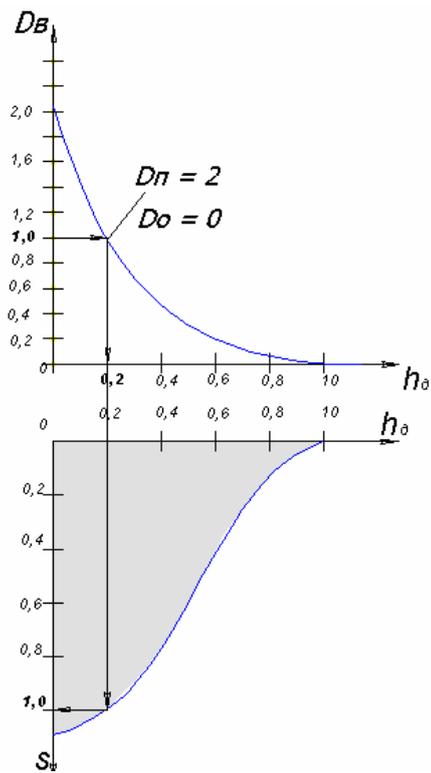


Рис. 4

Таким образом, основными параметрами, влияющими на геометрию формообразования поверхности лунки во времени является соотношение скоростей вращения инструмента  $\omega$  (или числа оборотов -  $n$ ) и осевой скоростью подачи  $V_z$  (или подачей на оборот  $S_z$ ) при выбранном угле заточки инструмента. Учитывая то, что регулирование скорости вращения инструмента в процессе образования воронки требует использования привода с датчиком обратной связи по скорости и весьма затруднительно, то их соотношение целесообразно регулировать заданием скорости подачи  $V_z$ .

Практически принцип постоянной подачи можно осуществить на основе кинематической пары винт-гайка, которая, имея постоянное передаточное число, обеспечивает постоянную скорость перемещения и при постоянном числе оборотов ходового винта.

Рассмотрим механизм образования лунки при работе инструмента с 1-й и с 2-мя режущими кромками при угле заточки  $\alpha = 90^\circ$  (рис. 6), при этом будем оперировать с оборотной подачей по оси  $Z$  -  $S_z$ , которая связывает скорость осевой подачи  $V_z$  и угловую скорость инструмента  $\omega$ . Из выражения (1) следует:  $S_z = a = 2\kappa l$ .

Рассмотрим случай, когда проекция линии рабочей кромки сверла при соприкосновении с заготовкой совпала с осью  $X$ . Тогда при заданной величине подачи  $S_z$  (мкм/об), точка  $M_1$  на уровне поверхности заготовки от рабочей кромки 1 будет описывать кривую 1 (и точка  $M_2$  кромки - кривую 2). При повороте на  $180^\circ$  точка  $M_1$  1-й кромки совместится с т. 1', причем расстояние  $0 - 1'$  будет равно  $S_z/2$ ; при повороте на  $360^\circ$  точка  $M_1$  1-ой кромки совместится с т. 1'' и расстояние  $0 - 1'' = S_z$ . Анало-

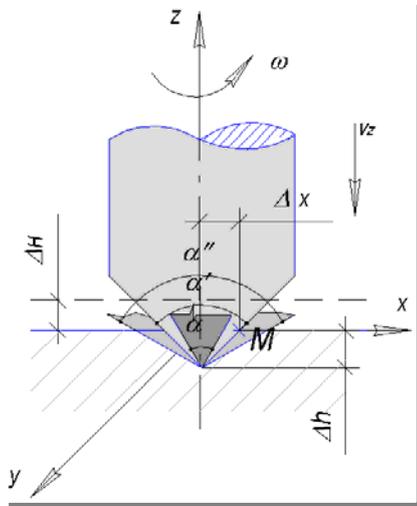
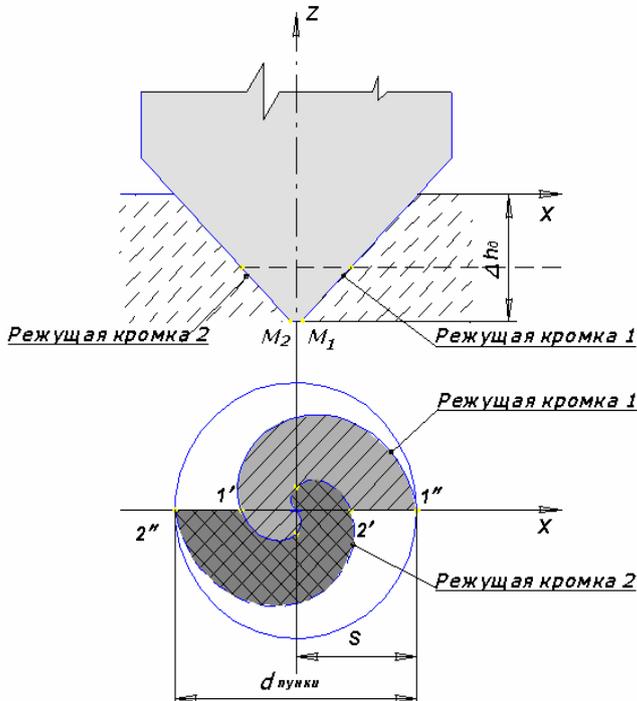


Рис. 5

гичное движение совершит рабочая точка  $M_2$  2-й кромки.

Таким образом, при повороте инструмента на  $360^\circ$  из зоны будущей лунки будет «выбрана» только закрашенная часть.

Для образования полнопрофильной лунки (конусной) необходим дополнительный поворот на  $180^\circ$  при двух режущих кромках или на  $360^\circ$



при 1-й режущей кромки, при этом подача по оси Z должна быть приостановленной в момент доворота, чтобы остановить образование спирали и получить кругообразный контур лунки.

Таким образом, для образования кольцевой формы поверхности лунки инструменту необходимо совершить поворот на  $360^\circ + 180^\circ$  (полтора оборота) для двух - лезвийного сверла одноперового сверла и  $360^\circ + 360^\circ$  (2 оборота) для конического гравера.

Следовательно, формирование лунки будет проходить в 2 этапа:

1. выборка основной лунки не менее 1-го оборота.
2. выравнивание края (доворот на  $180^\circ$  или  $360^\circ$  в зависимости от выбранного инструмента).

Тогда количество оборотов необходимое для получения полнопрофильной лунки с учетом угла заточки инструмента  $\alpha = 90^\circ$  определится как:

$$N = \frac{d}{2S_z} + \frac{1}{2} \text{ или } N = \frac{d}{2S_z} + 1 \quad (8)$$

где d – расчетный диаметр лунки из выражения (7).

Очевидно, что если угол заточки  $\alpha \neq 90^\circ$ , то количество оборотов определится как:

$$N = \frac{r}{S_z} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \frac{1}{b} \text{ или } N = \frac{\Delta h_0}{S_z} + \frac{1}{b} \quad (9)$$

где b – количество лезвий инструмента.

*Формирование лунки при переменной скорости осевой подачи  $-V_z \rightarrow var$ .*

На процесс формообразования пробельного элемента в значительной степени оказывает влияние изменение скорости подачи -  $V_z$ , которая в свою очередь зависит от многих факторов:

- усилия продольной подачи по оси Z, т.е. величина управляющего импульса на подающем магните;
- массы рабочих частей

Рис. 6. Механизм формообразования пробельной воронки

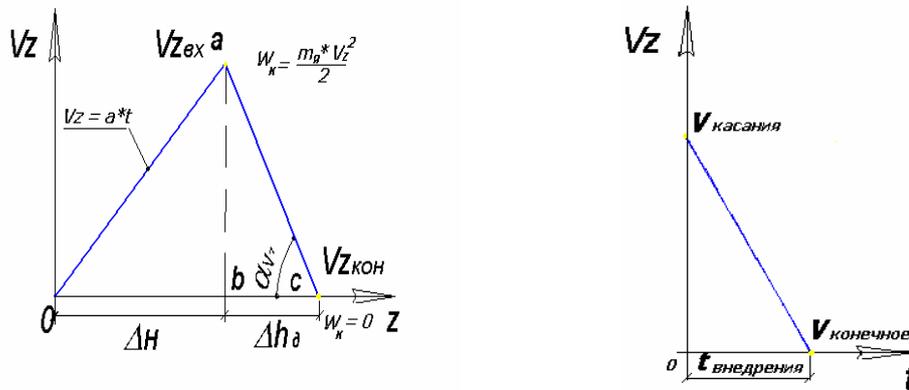


Рис. 7

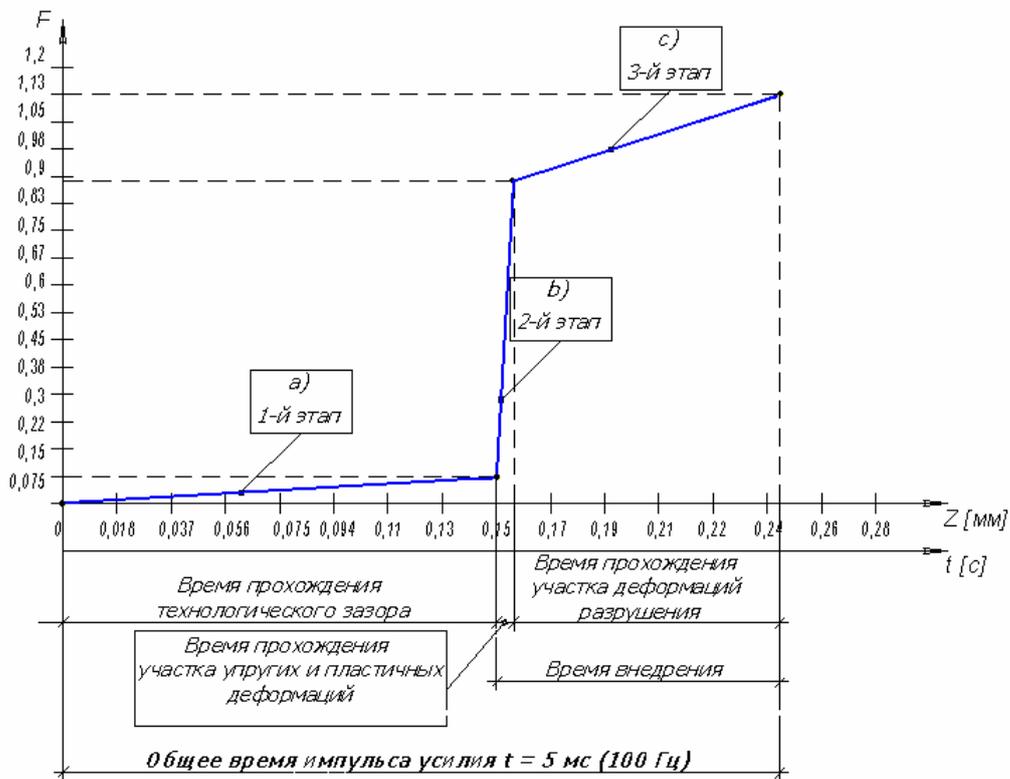


Рис. 8

привода подачи инструмента;

- прочностных характеристик материалов.

В случае замены кинематической пары винт – гайка на электромеханический преобразователь (ЭМП),  $V_z = var$  и рассчитывается из энергетических передаточных характеристик - зависи-

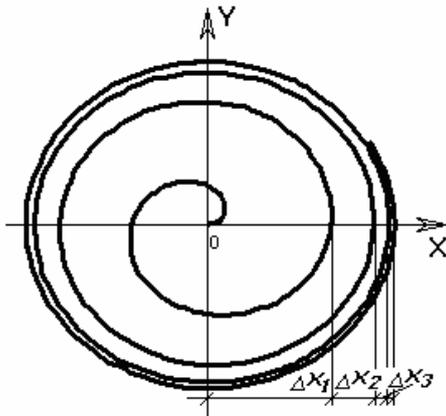


Рис. 9

мости требуемого усилия или энергии инструмента от глубины его внедрения:  $F = f(\Delta h_0)$ . Начальное значение  $V_z$  равно скорости касания и определяется с использованием передаточных характеристик по глубине внедрения  $\Delta h_0$ , причем эта скорость обеспечивает получение необходимой кинетической энергии  $W_k$ .

Конечное значение  $V_{z\text{ кон}} = 0$  при  $\Delta z = \Delta h_0$ . График изменения скорости  $V_z$  при изменении глубины внедрения и времени показан на рис. 7, при этом, в общем случае это нелинейная зависимость. Это изменение связано со следующим. В момент касания формируемая сила  $F_{\text{касания}}$  определяется импульсом удара  $I_F$ , величина которого, в свою очередь, определяется из передаточных характеристик по требуемой  $\Delta h_0$ . Импульс удара, при неизменяемой массе якоря, регулируется скоростью  $V_z = V_{z\text{ касания}}$  (которая формируется посредством электромагнитного усилия). Таким образом, для данного типа материала и заданной глубины внедрения величина  $V_{\text{касания}}$  должна быть совершенно определенной. Зависимость изменения силы разрушения при ударном воздействии для хрупкого материала рассмотрена в [2], а ее график показан на рис. 8.

Длина участка 2-го этапа мала и кратковременна и поэтому она оказывает слабое влияние на линейность зависимости  $V_z$  ( $V_{z\text{ касания}} - V_{z\text{ конечное}}$  по рис. 7). В случае пластичных материалов, при ударном воздействии деформации остаются только на участке «б» передаточной характеристики и, учитывая переход от упругих (длина которых, в этом случае мала) к пластичным, также слабо влияют

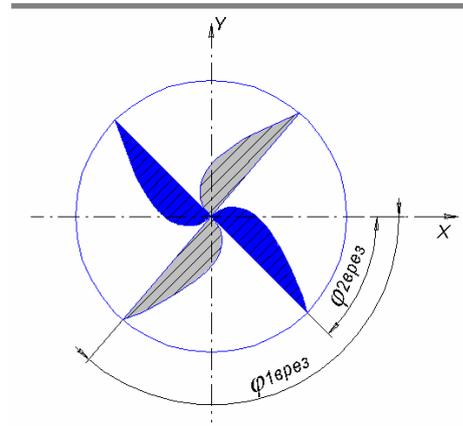


Рис. 10

на линейность зависимости  $V_z$  ( $V_{z\text{ касания}} - V_{z\text{ конечное}}$  по рис. 7). Таким образом, этот участок принимается линейным.

Таким образом, процесс формирования воронки разрушения состоит из двух фаз: 1-я фаза инструмент разгоняется под действием силы  $F_{\text{эмz}}$  и проходит участок от 0 до  $\Delta h$  и касается материала, при этом изменение скорости происходит линейно –  $V_{z0-z_{\text{вх}}} = a \cdot t$ ; во 2-й фазе на участке  $\Delta h$  до  $\Delta h_0$  происходит дальнейшее внедрение вращающегося инструмента в толщу материала, при этом изменение скорости подачи от  $V_{z\text{ вх}}$  до  $V_{z\text{ кон}}$  будет происходить по нелинейной закономерности в силу влияния перечисленных выше факторов (рис. 7).

Следовательно, интенсивность замедления скорости подачи, характеризуется углом наклона прямой АВ, тогда:

$$\text{tg} \alpha_{V_z} = \frac{ab}{bc}$$

Очевидно, что изменение скорости вертикальной подачи от  $V_{z\text{ вх}}$  до  $V_{z\text{ кон}}$  с замедлением приведет к формированию срезаемого слоя в виде утончающейся спирали (Архимедова спираль с переменным шагом от центра к периферии) (рис. 9).

Скорость достижения нужного радиуса воронки (в том числе производительность станка) зависит от скорости подачи  $V_z$ . При быстрых скоростях подачи (близких к удару) процесс смещения рабочей точки и достижения ей нужного радиуса воронки может происходить быстрее, чем за один оборот (рис. 10), поэтому в выражение (9) количество оборотов  $N$  целесообразнее заменить углом

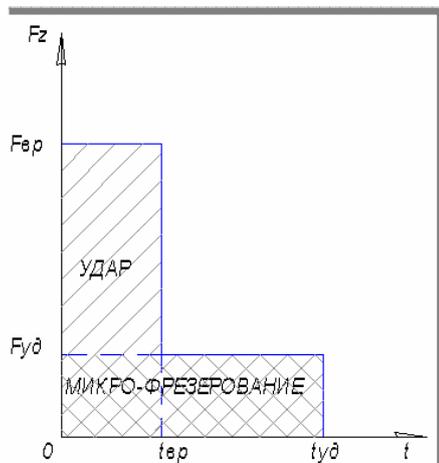


Рис. 9

поворота инструмента  $\varphi$ , тогда оно запишется как:

$$\varphi = 2\pi \frac{\Delta h_0}{S_z} + \frac{2\pi}{b} \cdot \quad (10)$$

Из формулы (10) видно, что угол образования воронки  $\varphi$  состоит из двух слагаемых:

1. первое – угол врезания  $\varphi_{вр}$ , при прохождении которого инструмент врезается на глубину  $\Delta h$ , который зависит от скорости осевой подачи  $V_z$  (т.е. т.е. при больших скоростях подачи);
2. второе – угол дорезания  $\varphi_{дор}$ , который зависит от количества лезвий.

Таким образом, чтобы управлять процессом динамического микро - фрезерования необходимо усилия и зазор обеспечивающие энергию по оси  $Z$ , которая в свою очередь обеспечивает внедрение инструмента на величину  $\Delta h_0$ , а затем удержание его на этапе дорезки воронки без дальнейшего внедрения. Это позволяет рассмотреть процесс в 2 этапа:

1 этап – внедрение фрезы на глубину  $\Delta h_0$  (рассматривается как удар т.е. при быстрых подачах)

2 этап – удержание инструмента на той же глубине для дорезания воронки (рассматривается как микро - фрезерование) (рис. 11).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов: Учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов. – М.: Высш. Шк., 1985. – 304 с.
2. Миков И.Н. Развитие теории, разработка технологии растрового динамического копирования изображений и создание гравировальных станков с ЧПУ. Диссертация на соискание ученой степени д.т.н., ОАО «ЭНИМС», 2004. – 376 с.
3. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. – М.: «Наука», 1975. – 872 с.

#### Коротко об авторах

Миков И.Н. – доктор технических наук, ст. научный сотрудник, зав. лабораторией,  
 Науменко И.А. – аспирантка,  
 кафедра «Технология художественной обработки материалов», Московский государственный горный университет.

