

Описанный математический аппарат хорошо интегрируется с методологией интерактивного проектирования, согласно которому конструкция приспособления декомпозируется на функциональные блоки:

1. относительность сил и движений;
2. правильная установка заготовки в радиальном и осевом направлениях;
3. правильное расположение инструмента по отношению к заготовке;
4. силы зажима;
5. зажимные системы приспособления;
6. способ закрепления приспособления на шпинделе станка;
7. способ закрепления заготовки в приспособлении;
8. форма корпуса.

Каждому функциональному блоку соответствует свой объем данных, обладающий соответствующей степенью детализации. Конкретизация вышестоящего блока и, как результат, выбранный вариант реализации служит основой для последующего блока. Алгоритм реализации такого подхода показан на рисунке ниже.

Данный алгоритм достаточно просто реализуется в САПР (например, в T-Flex) в виде взаимодействия библиотечных элементов (деталей). Применение данного подхода позволяет совместить противоречивые временные требования.

#### Литература

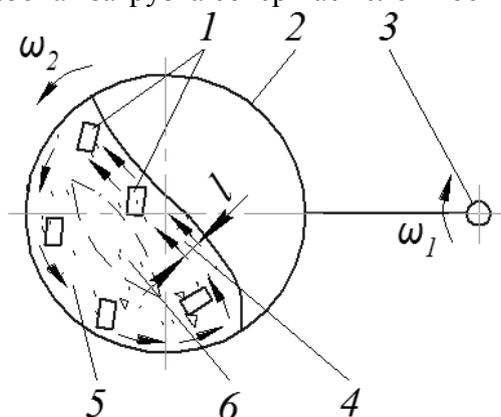
1. Норенков И.П., Кузьмик П.К. Информационная поддержка наукоемких изделий (CALS-технологии). — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
2. Колчин А.Ф., Овсянников М.В., Стрекалов А.Ф., Сумароков С.В. Управление жизненным циклом продукции. - М.: Анахарсис, 2002.
3. Ансеров М.А. Приспособления для металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1975.
4. Базров Б. М. Совершенствование производства деталей на основе модульной технологии. - М.:Информприбор, 1989.
5. Соломенцев Ю.М., Митрофанов В.Г., Павлов В.В., Рыбаков А.В. Информационно-вычислительные системы в машиностроении CALS-технологии. - М.: Наука, 2003.

#### **Новый способ объемной центробежно-планетарной обработки деталей**

д.т.н. проф. Зверовщиков В.З., Зотов Е.В.

*Пензенский государственный университет*

Для повышения качественных характеристик поверхности, удаления заусенцев и скругления острых кромок эффективной является обработка в контейнерах с планетарным вращением [1], в которых рабочая загрузка совершает сложное пространственное движение.



**Рис. 1. Схема центробежной обработки деталей в контейнерах с планетарным вращением**

При центробежной обработке в контейнерах с планетарным вращением (рис. 1) обраба-

Обрабатываемые детали 1 загружают в цилиндрические контейнеры 2, которым сообщают вращение с угловой скоростью  $\omega_1$  с водилом вокруг центральной оси 3 и с угловой скоростью  $\omega_2$  вокруг собственных. При этом в объеме контейнера под действием инерционных сил формируется скользящий слой 4 глубиной  $l$ , твердотельная зона 5, перемещающаяся со стенкой контейнера, и зона относительного покоя 6 вблизи центра масс уплотненной загрузки.

Недостатком этой технологии является отсутствие стабильности показателей качества поверхности на труднодоступных участках, таких как пазы, углубления, внутренние полости.

Поэтому важно создать новый способ объемной обработки, который позволит повысить стабильность и качество поверхности объемной центробежной обработки в барабанах с планетарным вращением.

Для устранения отмеченных недостатков предлагается новый способ, при котором рабочую загрузку циклически уплотняют путем сообщения контейнерам вращения вокруг собственных осей с переменной скоростью, а также загрузке сообщают радиальные импульсные перемещения для повышения эффективности обработки труднодоступных участков профиля.

Сущность нового способа заключается в следующем (рис. 2). Рабочую загрузку помещают в цилиндрические барабаны 1, которым сообщают переносное вращение с водилом с угловой скоростью  $\omega_6$  вокруг центральной оси и с переменной угловой скоростью  $\omega_6$  вокруг собственных осей. При ускорении вращения барабанов рабочая загрузка под действием возросших инерционных сил  $F_u^{\omega_6} = m\omega_6^2 \cdot 0,5D$ , действующих на любую частицу загрузки (например, абразивную гранулу в точке А, ( $m$  – масса гранулы,  $D$  – внутренний размер барабана), растекается по внутренней поверхности барабанов, стремясь замкнуться в кольцо, и дополнительно уплотняется. При этом происходит взаимное проскальзывание слоев рабочей загрузки, находящихся на различном расстоянии от оси вращения водила (точки В и D) под действием центробежной силы инерции  $F_u^{\omega_6} = m\omega_6^2 \cdot R_i$  ( $R_i$  – расстояние от оси водила до рассматриваемой частицы рабочей загрузки массой  $m$ ) и кориолисовой силы инерции  $F_u^k = m\omega_6\omega_6 \cdot D$  с образованием на поверхности уплотненной загрузки скользящего слоя абразивных гранул и обрабатываемых деталей.

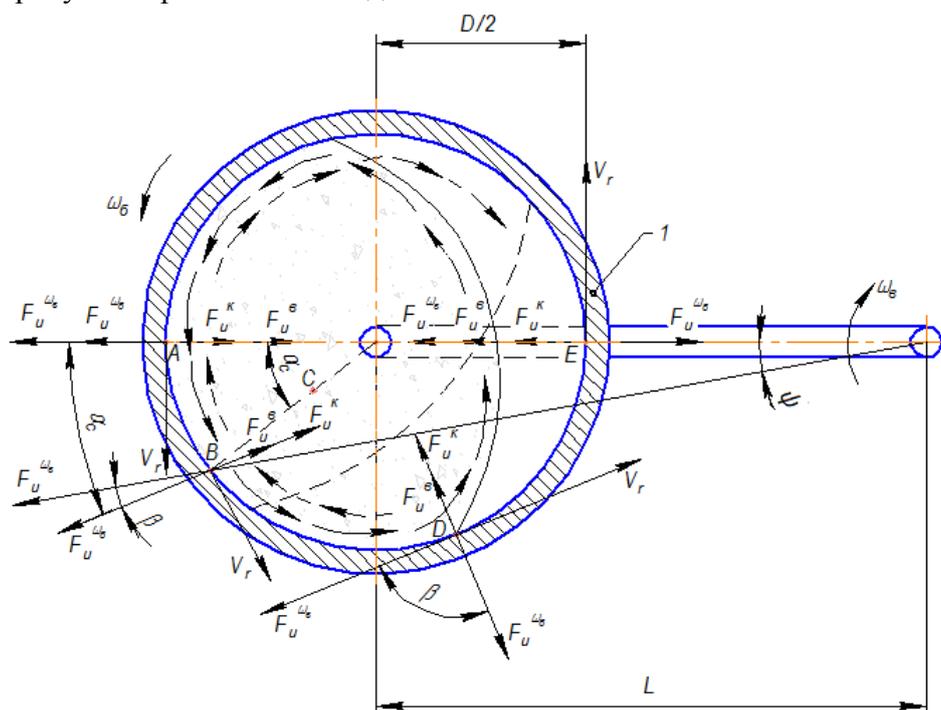


Рис. 2. Схема нового способа обработки

В момент замедления вращения барабанов масса рабочей загрузки тормозится и стремится занять положение в зоне, наиболее удаленной от оси водила (точка  $A$ ), переходит зону устойчивого равновесия и занимает смещенное угловое положение, показанное пунктирными линиями на рис.2. Если учесть, что угловая скорость  $\omega_b$  будет изменяться за каждый оборот барабана вокруг собственной оси, то вся масса уплотненной загрузки будет совершать циклические угловые колебания вокруг зоны устойчивого равновесия с частотой, определяемой угловой скоростью  $\omega_b$ . Застойная зона (зона относительного покоя, которая формируется вблизи центра масс уплотненной загрузки (точка  $C$  на рис. 2) при установившемся движении пересыпающихся слоев рабочей загрузки внутри барабана) разрушается при вращении барабана с переменной скоростью  $\omega_b$ . Величина углового смещения  $\alpha_c$  центра масс уплотненной загрузки при стационарном (установившемся) движении зависит от коэффициента трения  $f$  между гранулами шлифовального материала и стенкой, а также конструктивных параметров и угловых скоростей барабана и водила. Она может быть определена по выражению:

$$\alpha_c = \arccos \frac{-Af^2 + \sqrt{f^2(1-A^2)+1}}{1+f^2}$$

где  $A$  – конструктивно технологический параметр  $A = \frac{0,5D}{L} \cdot \left( \frac{\omega_b}{\omega_g} - 1 \right)^2$ .

Максимальная величина скорости вращения барабана  $\omega_b$  вокруг собственной оси ограничена условием, при котором центробежные силы инерции от вращения барабана превысят величину центробежных сил инерции от вращения водила. Для определения этого условия составим уравнение равновесия произвольной частицы массой  $m$  в точке  $E$ :

$$F_u^{\omega_b} + F_u^{\kappa} = F_u^{\omega_g} \quad \text{или}$$

$$m \cdot \omega_g^2 (L - 0,5D) + m \omega_g \omega_b D = m \omega_b^2 \cdot 0,5D$$

Отсюда найдем:

$$\omega_b \leq \omega_g \left( 1 + \frac{\sqrt{2DL}}{D} \right) \quad (1)$$

Знак «плюс» принимают при противоположном вращении барабана и водила, а знак «минус» при одностороннем.

При несоблюдении полученного условия рабочая загрузка распределяется по внутренней поверхности барабана и начинает вращаться синхронно со стенкой барабана. Относительное перемещение деталей и гранул шлифовального материала прекращается, а следовательно, прекращается и обработка.

Минимальную скорость вращения барабана следует ограничивать соотношением:

$$\omega_{b_{\min}} \geq 0,3 \cdot \omega_g.$$

При меньшей скорости барабана уменьшаются глубина скользящего слоя и скорости относительного скольжения деталей и гранул шлифовального материала, что делает обработку неэффективной.

Для выравнивания съема металла на труднодоступных участках профиля деталей (внутренние полости, радиальные пазы и отверстия) уплотненной загрузке сообщают вибрационное ускорение путем радиальных осциллирующих движений барабана. При этом величину вибрационной силы  $F_u^b = m \cdot p^2 A_0$ , действующей на частицы рабочей загрузки, ограничивают для смещенного на угол  $\alpha_c$  положения массы рабочей загрузки (положение равновесия в точке  $B$  на рис. 2) в сторону вращения барабана из условия:

$$0 \leq p^2 A_0 \leq \omega_6^2 (L + 0,5D) \cdot \cos\beta + 0,5\omega_6^2 D - \omega_6 \omega_6 D, \quad (2)$$

причем:

$$\beta = \alpha_c - \psi = \alpha_c - \operatorname{arctg} \frac{0,5 \cdot \sin \alpha_c}{L + 0,5D \cdot \cos \alpha_c},$$

так как из геометрических соотношений на рис.2.2 следует:

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{0,5 \cdot \sin \alpha_c}{L + 0,5D \cdot \cos \alpha_c},$$

где  $\beta$  – угол между направлениями центробежных сил инерции от вращения водила  $F_u^{\omega_6}$  и

вращения барабана  $F_u^{\omega_6}$  в произвольной точке на внутренней поверхности барабана

в зоне контакта рабочей загрузки со стенкой барабана;

$\alpha_c$  – угол смещения центра масс «С» уплотненной рабочей загрузки до устойчивого положения в направлении вращения контейнера;

$D$  – внутренний диаметр барабана;

$L$  – расстояние между осями барабана и водила;

$p$  и  $A_0$  – круговая частота и амплитуда осциллирующих радиальных движений барабана, соответственно.

Сообщение барабанам радиальных осциллирующих движений обеспечивает дополнительное повышение интенсивности обработки и способствует выравниванию съема металла на труднодоступных участках профиля. Однако максимальная величина вибрационной силы

$F_u^{\beta} = m \cdot A_0 \cdot p^2$  не должна превышать совместно с кориолисовыми силами инерции

$F_u^{\kappa} = 2m|\bar{\omega}_6 \wedge \bar{v}_r| = m\omega_6 \omega_6 D$  (где  $v_r = \omega_6 \cdot 0,5D$  – относительная часть движения частицы), ве-

личины центробежных сил инерции от вращения водила  $F_u^{\omega_6} = m\omega_6^2 (L + 0,5D) \cdot \cos\beta$  и враще-

ния барабана  $F_u^{\omega_6} = m\omega_6^2 \cdot 0,5D$  при смещенном на угол  $\alpha_c$  положении массы уплотненной рабочей загрузки.

При несоблюдении этого условия нарушается устойчивое положение всей массы рабочей загрузки в объеме барабана, которое необходимо для образования скользящего слоя на поверхности пересыпающейся загрузки и эффективной центробежной обработки. Следует учитывать, что при малых значениях амплитуды  $A_0$  радиальных колебаний близких к нулю, величина вибрационного ускорения  $p^2 \cdot A_0$ , действующего на частицы рабочей загрузки, будет невелика и такой режим можно рекомендовать лишь для деталей тонкостенных, легкодеформируемых.

При значениях вибрационного ускорения  $p^2 A_0$ , превышающих допустимую величину, нарушается устойчивое пространственное положение массы уплотненной загрузки у стенки барабана, происходит ее разуплотнение и обработка становится неэффективной. При отсутствии труднодоступных участков и малой жесткости деталей обработку можно производить при отсутствии осциллирующих радиальных движений барабана, приняв  $A_0 = 0$ .

Следовательно, при одних параметрах планетарного движения контейнеров эффект от осциллирующих радиальных движений контейнера может быть пренебрежимо малым, а при других – могут быть нарушены условия формирования скользящего слоя на поверхности уплотненной загрузки, что приведет к резкому снижению интенсивности съема металла и ухудшению качественных характеристик обработанных поверхностей.

Поэтому важно регламентировать величину вибрационного ускорения  $p^2 A_0$  для сме-

щенного положения уплотненной массы рабочей загрузки, следуя разработанным соотношениям (1) и (2), так как в противном случае, особенно при больших размерах барабана, назначенные режимы обработки могут быть неэффективными.

Экспериментальные исследования влияния скорости осцилляций на формирование шероховатости поверхности проводились на образцах из стали 45. В качестве рабочих тел применялись полимерные гранулы фирмы «Rosler», размером 20x20 мм.

Для получения математической модели формирования шероховатости поверхности в зависимости не только от влияния скорости осцилляций, но и других основных факторов, был проведен полный факторный эксперимент типа  $2^4$  на опытной установке ЦПУ-1002Э. Варьирование скорости осцилляций достигалось сменными полимерными контейнерами, позволяющими регулировать величину эксцентриситета на нужную величину. Фотография установки показана на рис. 3.

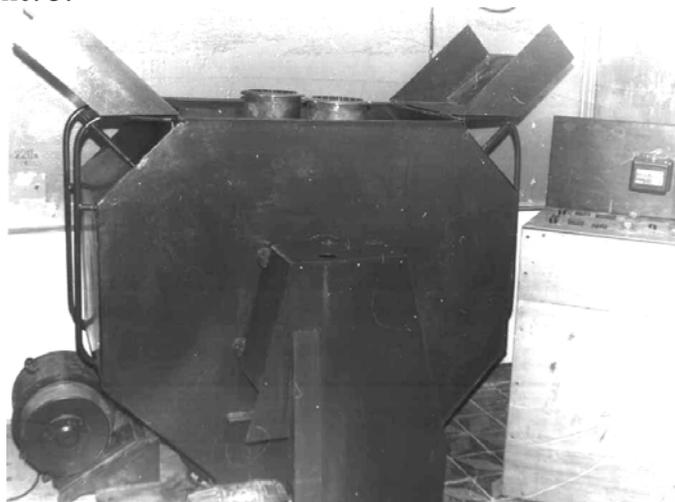


Рис. 3. Общий вид центробежно-планетарной установки

В качестве переменных технологических факторов были приняты частота вращения водила  $n_6$ , время обработки  $t$ , скорость осцилляций  $V_o$  и степень заполнения контейнера  $K_3$ .

По результатам исследований, после математической обработки экспериментальных данных, была получена математическая модель, описывающая формирование шероховатости поверхности в виде:

$$\begin{aligned}
 Ra = & 0,7860812 + 0,0169594 \cdot n_6 + 0,0509677 \cdot t + 0,47444 \cdot V_o + 1,1433692 \cdot K_3 - \\
 & - 0,0002903 \cdot n_6 \cdot t - 0,0009175 \cdot n_6 \cdot V_o - 0,0159498 \cdot n_6 \cdot K_3 - 0,0005328 \cdot t \cdot V_o - \\
 & - 0,0139785 \cdot t \cdot K_3 - 0,77248 \cdot V_o \cdot K_3 - 0,000299 \cdot n_6^2 - 0,0006022 \cdot t^2 - \\
 & - 0,0234627 \cdot V_o^2 + 1,6129032 \cdot K_3^2.
 \end{aligned} \quad (3)$$

Экспериментальные исследования показали, что предлагаемый способ объемной центробежно-планетарной обработки деталей позволяет повысить эффективность и стабильность обработки деталей и позволяет улучшить качественные характеристики поверхностей деталей. Шероховатость поверхности устойчиво снижается с  $Ra = 3,2 \dots 6,3$  до  $Ra = 1,25 \dots 2,0$  мкм. Достигается устойчивое снижение шероховатости в пазах и углублениях профиля деталей.

### Литература

1. Зверовщиков В.З. Динамика центробежной обработки деталей дискретным шлифовальным материалом: Монография. – Пенза: Изд-во Пензенского государственного университета, 2005. – 200 с.
2. Спиридонов А.А., Васильев Н.Г. Планирование эксперимента. Учебное пособие. Свердловск, изд. УПИ им С.М. Кирова, 1975, стр. 152.