

УДК 621.9.01

## ПОВЫШЕНИЕ ВИБРОУСТОЙЧИВОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© 2009 Д. Л. Скуратов, Е. В. Бурмистров, В. Н. Самыкин

Самарский государственный аэрокосмический университет

Рассмотрены причины развития автоколебаний при обработке резанием. Предложена математическая модель автоколебательного процесса при глубоком растачивании, которая позволила исследовать влияние различных факторов на устойчивость системы. Данные теоретических исследований позволили создать устойчивый к вибрациям инструмент. Экспериментальные исследования его применения подтвердили адекватность математической модели процесса растачивания и наметили пути повышения устойчивости, качества и производительности обработки.

*Автоколебания, математическая модель вибраций, станок, инструмент, деталь, обработка резанием расточные инструменты*

Процесс резания при обработке деталей двигателей летательных аппаратов (ДЛА) довольно часто сопровождается интенсивными вибрациями. Это связано, прежде всего, с высокой динамической напряженностью процесса резания, характерной для обработки нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов, титановых сплавов и других труднообрабатываемых материалов, которые широко используются в производстве ДЛА.

Кроме того, детали ДЛА, с целью снижения их веса, зачастую выполняются сложными по форме и ажурными. Наглядным примером могут служить валы роторов и диски турбин ГТД. Валы роторов турбин представляют собой полую тонкостенную равнопрочную конструкцию, имеют сложный контур наружных и внутренних поверхностей, характеризуются высокими требованиями к точности их размеров, формы и расположения, а также низкими параметрами шероховатости. Диски турбин также являются сложнофасонными деталями с множеством различных труднодоступных для обработки поверхностей – карманов, канавок, уступов, выточек лабиринтных уплотнений.

В результате при механической обработке не всегда удаётся обеспечить достаточную жёсткость и виброустойчивость обрабатываемой заготовки и режущих инструментов. Это приводит к их интенсивным вибрациям и, как следствие, к снижению

стойкости и надёжности инструментов, ухудшению качества обработанных поверхностей и прочностных характеристик деталей.

Основными причинами, определяющими возникновение и развитие автоколебаний в технологических системах при обработке резанием, по мнению большинства исследователей, являются:

- нелинейная зависимость силы резания от толщины и ширины среза, изменения которых вызваны относительными виброперемещениями заготовки и инструмента при возбуждении колебаний;
- регенерация автоколебаний вследствие обработки «по следу», оставляемому на поверхности резания режущей кромкой инструмента;
- наличие фазового сдвига между изменяющимися силой резания и толщиной среза (фазовая характеристика силы резания);
- «падающая» характеристика силы резания (уменьшение силы с увеличением скорости резания);
- периодические изменения переднего и заднего углов инструмента при возникновении колебаний.

Одной из трудоёмких операций при обработке деталей ДЛА, в частности вала турбины, является растачивание глубоких отверстий, которое обладает рядом специфических особенностей, а применяемые рас-

точные инструменты, в силу их недостаточной жёсткости и виброустойчивости, не обеспечивают требуемых параметров качества и производительности.

Для теоретического анализа автоколебаний при растачивании глубоких отверстий была разработана механико-математическая модель на основе использования аппарата дифференциально-разностных уравнений. Принципиальная схема колебательной системы и схема сил, действующих на резец, представлены на рис.1.

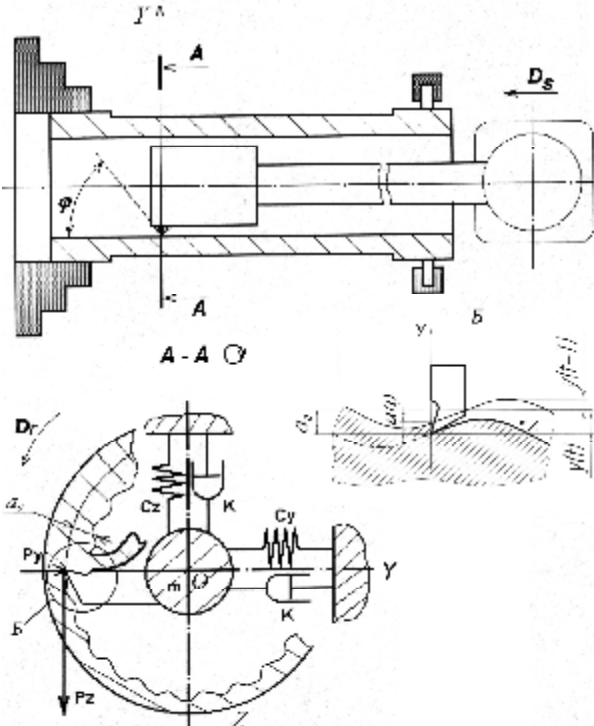


Рис.1. Расчётная схема глубокого растачивания

Приняты следующие допущения:

- в качестве доминирующей колебательной системы рассматривается консольно закреплённая оправка с расточной головкой;
- исследуются колебания только в плоскости YOZ, перпендикулярной оси заготовки;
- масса колебательной системы приведена к вершине резца, приведение осуществлялось в соответствии с [1].

Как видно из рис.1, заготовке сообщается главное вращательное движение  $D_r$ , а расточному инструменту – поступательное движение подачи  $D_s$ .

Математическая модель представлена в виде системы уравнений:

$$\begin{aligned} m\ddot{y} + K \dot{y} + C_y y &= P_y(t), \\ m\ddot{z} + K \dot{z} + C_z z &= P_z(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $m$  – эквивалентная сосредоточенная масса колебательной системы;  $K$  – обобщённый коэффициент сопротивления (демпфирования);  $C_y, C_z$  – коэффициенты обобщённой жёсткости системы.

Для описания составляющих силы резания: радиальной  $P_y$  и касательной  $P_z$  - использовались степенные зависимости, приведенные в нормативах по режимам резания. Следует, однако, учесть, что при возбуждении колебаний в технологической системе фактические значения параметров сечения среза: толщины  $a$  и ширины  $b$  - начнут изменяться, что вызовет изменение составляющих силы резания  $P_y$  и  $P_z$ . Эти изменения становятся ещё более значительными начиная со второго оборота заготовки, когда обработка осуществляется «по следу» (рис.1).

Таким образом, составляющие  $P_y$  и  $P_z$ , с учётом указанных изменений параметров сечения среза, а также фазовой характеристики силы резания  $\tau$ , в качестве которой чаще всего принимается отставание силы резания от изменения толщины среза [2,3,4], могут быть представлены в виде

$$\begin{aligned} P_y &= C_{Py} \cdot \{b(t-\tau)\}^{X_{py}} \cdot \{a(t-\tau)\}^{Y_{py}} \{v(t)\}^{Z_{py}}, \\ P_z &= C_{Pz} \cdot \{b(t-\tau)\}^{X_{pz}} \cdot \{a(t-\tau)\}^{Y_{pz}} \{v(t)\}^{Z_{pz}}, \end{aligned}$$

где действительные значения толщины и ширины среза будут равны:

$$a(t-\tau) = s_0 \frac{t}{T} \sin \varphi - y(t-\tau) \cos \varphi \quad (2)$$

в течение первого оборота заготовки;

$$a(t-\tau) = s_0 \sin \varphi + [(y(t-T-\tau) - y(t-\tau))] \cos \varphi \quad (3)$$

при последующих оборотах заготовки, когда  $t > T$ ;

$$b(t-\tau) = \frac{t_0 - y(t-\tau)}{\sin \varphi}. \quad (4)$$

При этом, как видно из рис.1,  $y(t-\tau)$  - виброперемещение расточного резца в рассматриваемый момент времени  $t$  с учётом отставания  $\tau$ ; а  $y(t-T-\tau)$  - виброперемещение, которое имело место в течение предыдущего оборота заготовки, то есть в момент времени  $t-T$ , где  $T$  - время одного оборота заготовки. Эти виброперемещения как раз и определяют изменения толщины среза, вызванные возникшими колебаниями,

а также влиянием волнообразного следа, оставаемого на поверхности резания режущей кромкой инструмента. Кроме того, в выражениях (2-4):  $s_0$ -номинальное значение подачи за один оборот заготовки,  $t_0$ -номинальное значение глубины резания,  $\varphi$  - главный угол в плане расточного резца.

Виброперемещения резца в направлении оси  $Z$  вызывают изменение фактической скорости резания, величину которой с учётом скорости вибрационного движения вдоль оси  $Z$  можно представить в виде  $v(t) = v_0 + \dot{z}$ ,

где  $v_0$  - номинальное значение скорости.

При исследовании представленной модели на ПЭВМ необходимо учесть ряд ограничений: скорость виброперемещений в направлении оси  $Z$  не должна превышать номинальное значение скорости резания, а фактические значения толщины и ширины среза не должны быть меньше или равны нулю. В противном случае вследствие отрыва резца от заготовки процесс резания прекращается, и операторы составляющих силы резания  $P_y$  и  $P_z$  становятся равными нулю.

Решение системы уравнений (1) осуществлялось с использованием численного метода Рунге-Кутты четвёртого порядка точности в соответствии с разработанными алгоритмом и программой расчёта на ПЭВМ.

На рис.2. показано развитие автоколебаний в период с 3-го по 7-й оборот заготовки. При этом величина сдвига следов  $\Delta_c$  составила примерно 0,5 от периода колебаний  $T_k$ , что соответствует наибольшему изменению толщины среза и сил резания. Как видно из приведенных данных, наибольшее влияние на интенсивность колебаний, в частности на величину амплитуды, оказывают изменения толщины среза, вызванные регенеративным влиянием обработки «по следу». Уже на 7-м обороте заготовки с момента начала резания амплитуда радиальных колебаний  $A_y$  выросла в 5 раз по сравнению с 3-м оборотом и составила 8мкм.

Для подтверждения адекватности разработанной модели и результатов расчётов были проведены экспериментальные исследования колебаний при растачивании гидроцилиндров из конструкционной легированной стали 30ХГСА ( $\sigma_B=800$ МПа). При этом

использовалась стальная расточная оправка с поперечной жёсткостью  $C_z=3 \cdot 10^6$  и  $C_y=2,1 \cdot 10^6$  Н/м, на переднем конце которой с помощью ленточной резьбы закреплялись расточные головки различных конструкций, оснащённые резцами из твёрдого сплава Т15К6.

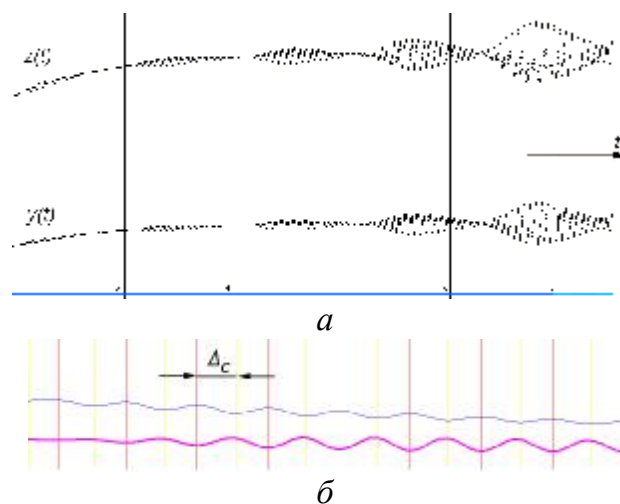


Рис.2. Развитие автоколебаний в процессе резания: а - расчётные виброграммы в период с 3-го по 7-й оборот заготовки; б - сдвиг вибрационных следов, образовавшихся в период 3 и 4-го оборотов ( $2A_y=16$ мкм,  $2A_z=12$ мкм,  $f=92,6$ Гц,  $T_k=11$ мс,  $\Delta c=0,463T_k$ )

Амплитуда и частота колебаний измерялись с помощью токовихревых датчиков, специально разработанной виброизмерительной аппаратуры [4] и цифрового осциллографа *LECROY Wave Surfer 424*. Результаты измерений регистрировались на экране осциллографа и передавались в ПК для дальнейшей обработки и анализа.

На рис.3 приведены виброграммы, полученные экспериментальным и расчётным путём. Как видно из этого рисунка, установленные колебания носят явно регенеративный характер и представляют собой дуперiodические колебания с основной частотой, близкой к собственной частоте системы  $\omega_0$ , и частотой биений, соответствующей частоте вращения заготовки. При этом значения амплитуд и частот колебаний, найденных по экспериментальным и расчётным виброграммам, неплохо согласуются друг с другом.

Для оценки устойчивости технологической системы при растачивании глубоких отверстий было также проведено качествен-

ное исследование разработанной модели.

После линеаризации правой части уравнения движения вдоль оси Y, проводя усреднение по периоду быстрых осцилляций

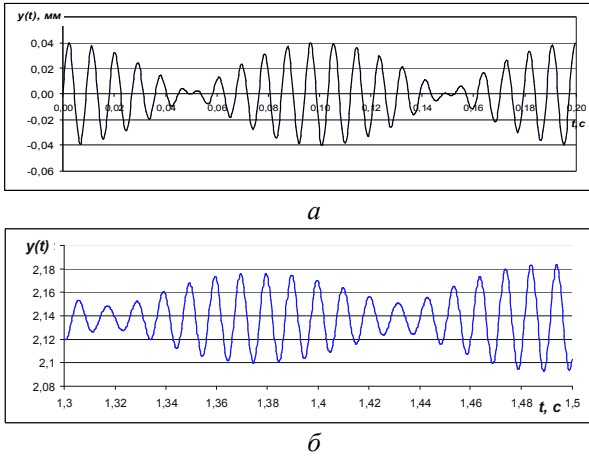


Рис.3. Автоколебания при растачивании глубоких отверстий: а- копия экспериментальной осциллограммы ( $A_y=40\text{мкм}$ ;  $T_K=10\text{мс}$ ); б - расчётная виброграмма ( $A_y=38\text{мкм}$ ;  $T_K=9,5\text{мс}$ ). Значения параметров:  $m=6\text{кг}$ ,  $K=4000\text{кз/с}$ ,  $C_y=2,1\cdot 10^6\text{ Н/м}$ ,  $t=1,5\text{мм}$ ,  $s_0=0,3\text{мм/об}$

$2\pi / \omega_0$ , получаем условие самовозбуждения автоколебаний:

$$\frac{2Y_{py}}{\omega_0} C_{py} b^{X_{py}} v^{Z_{py}} a_0^{Y_{py}-1} \sin \frac{\omega_0 T}{2} \times \cos \left[ \omega_0 \left( \tau + \frac{T}{2} \right) \right] > K, \quad (5)$$

или  $K_c > K$ , где  $K_c$  - коэффициент самовозбуждения колебаний;  $K$  - коэффициент демпфирования;  $\omega_0$  - круговая частота собственных колебаний системы,  $a_0 = s_0 \sin \varphi$  - номинальное значение толщины среза.

Анализ условия (5) позволяет построить границу устойчивости системы в координатах  $K_c - \omega_0$  (рис.4). Из рисунка видно, что для рассматриваемой технологической системы характерно чередование зон устойчивой и неустойчивой обработки в зависимости от собственной частоты колебаний, причём самовозбуждение системы с возрастанием собственной частоты заметно ослабевает.

В связи с тем что ширина зон устойчивости мала по сравнению с  $\omega_0$ , а колебания величины самовозбуждения системы слишком велики, вызывает сомнение возможность влиять на устойчивость системы путём тонкого изменения частоты собственных коле-

баний. Здесь имеется в виду способность колебательной системы отбирать моды с максимальным инкрементом (так называемый принцип подчинения).

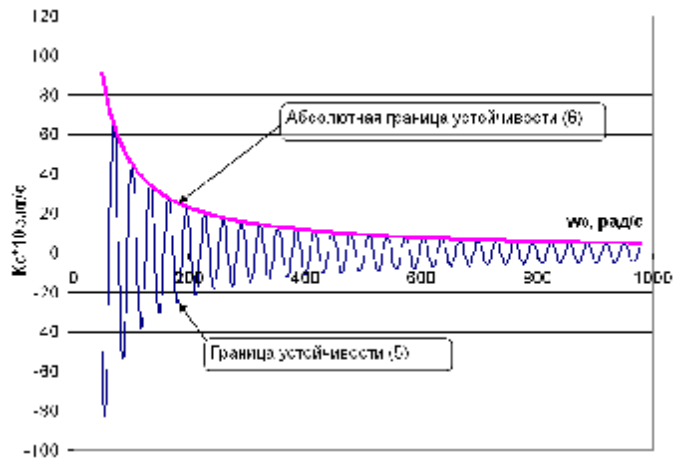


Рис.4. Границы устойчивости процесса резания. Исходные данные: сталь 30ХГСА ( $\sigma_B=800\text{МПа}$ ) – тв.сплав Т15К6;  $S_{py}=3200$ ,  $X_{py}=0,9$ ,  $Y_{py}=0,6$ ,  $Z_{py}=-0,15$ ;  $b_0=5\text{мм}$ ,  $a_0=0,3\text{мм}$ ,  $v=50\text{м/мин}$ ,  $\tau=0,001\text{с}$

Как показали численные исследования, граница предельного демпфирования совпадает с огибающей границы устойчивости (рис.4). При коэффициенте демпфирования  $K$  большем, чем значение, соответствующее огибающей, колебания затухают; при меньшем - возрастают.

Аналитическое описание границы предельного демпфирования, необходимого для устойчивого резания, можно получить, рассмотрев функцию

$$f(\omega_0) = \sin \frac{\omega_0 T}{2} \cos \left[ \omega_0 \left( \tau + \frac{T}{2} \right) \right] = \frac{1}{2} [\sin(\omega_0 (T + \tau)) - \sin(\omega_0 \tau)]$$

Проведем анализ функции  $f(\omega_0)$  на экстремумы, поскольку максимумам границы устойчивости соответствуют минимумы функции  $f(\omega_0)$  в выражении (5). В результате получаем

$$f_{\min}(\omega_0) = \frac{1}{2} \sin \left\{ \frac{3\pi}{2} + 2\pi n \right\} = -\frac{1}{2}.$$

Из этого следует, что условие самовозбуждения (5) можно заменить выражением, определяющим абсолютную границу устойчивости:

$$\frac{Y_{py}}{\omega_0} C_{py} \frac{b^{X_{py}}}{a_0^{1-Y_{py}}} v^{Z_{py}} = K \quad (6)$$

Тогда, как видно из (6), наибольшее влияние на возбуждение колебаний оказывает ширина среза  $b$ , увеличение же толщины среза  $a$  повышает устойчивость системы. Переходя к глубине резания  $t$  и подаче  $s_0$ , получим границу устойчивости для данных элементов режима резания (рис.5).

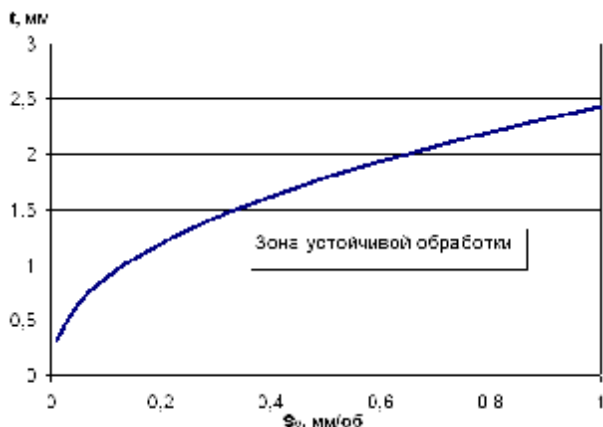


Рис.5. Граница устойчивых режимов резания при растачивании глубоких отверстий

Влияние скорости резания менее значительно и количественно соответствует влиянию на оператор силы резания.

Полученные данные подтверждаются результатами исследований влияния глубины резания и подачи на амплитуду колебаний (рис.6,7). Как видно из этих рисунков, расчётные и экспериментальные кривые хорошо согласуются друг с другом.

Кроме того, на рис.7 можно отметить области устойчивой и неустойчивой обработки при изменении величины продольной подачи. Так, при изменении подачи от 0,1 до 0,3 мм/об амплитуда автоколебаний практически не изменяется.

При увеличении подачи до 0,4 мм/об происходит скачкообразное (почти на порядок) снижение амплитуды. Следовательно, область устойчивой обработки будет ограничена диапазоном подач свыше 0,4 мм/об. При уменьшении глубины резания этот диапазон можно расширить до 0,3 мм/об. Таким образом, устойчивость чернового растачивания можно повысить, увеличив подачу и уменьшив величину снимаемого пропуща. Однако тонкое и чистовое растачивания,

осуществляемые с малыми подачами 0,1...0,2 мм/об, требуют использования специальных виброзащитных мер.

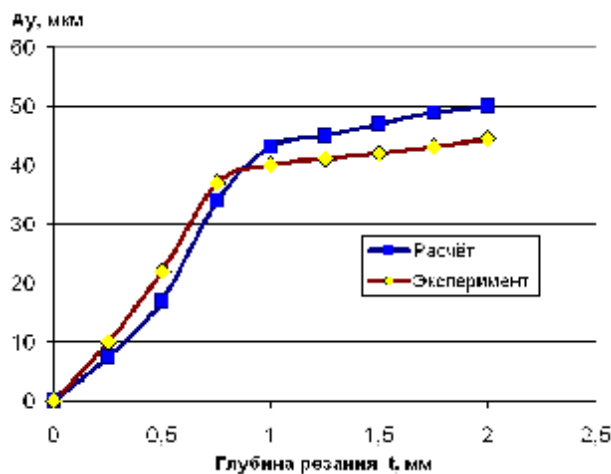


Рис.6. Зависимость амплитуды колебаний  $A_y$  от глубины резания ( $s_0=0,38$ мм/об)

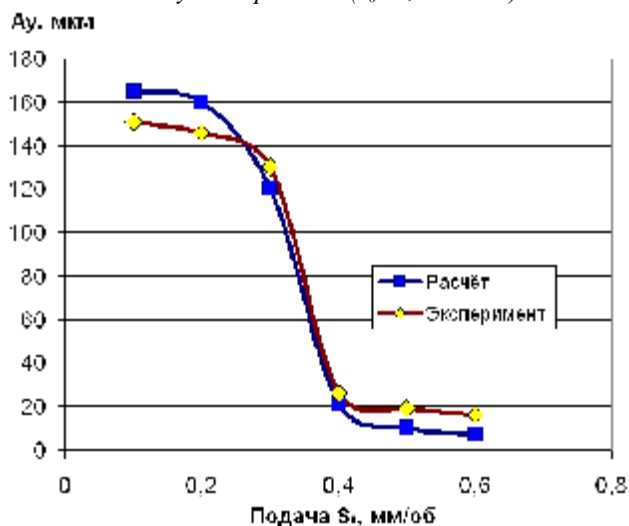


Рис.7. Зависимость амплитуды колебаний  $A_y$  от подачи ( $t=1$ мм)

Теоретические исследования, выполненные с использованием рассмотренной выше математической модели, позволили раскрыть механизм возникновения и развития колебаний при обработке резанием, определить условия, обеспечивающие повышение виброустойчивости технологических систем при глубоком растачивании, и предложить меры по усовершенствованию конструкции и геометрии применяемых расточных инструментов. В частности, на основе результатов, полученных при исследовании регенеративного влияния обработки «по следу» на интенсивность колебаний, была разработана виброустойчивая конструкция двухрезцовой расточной головки (патент РФ №2104827),



схема и общий вид которой приведены на рис.8, 9.

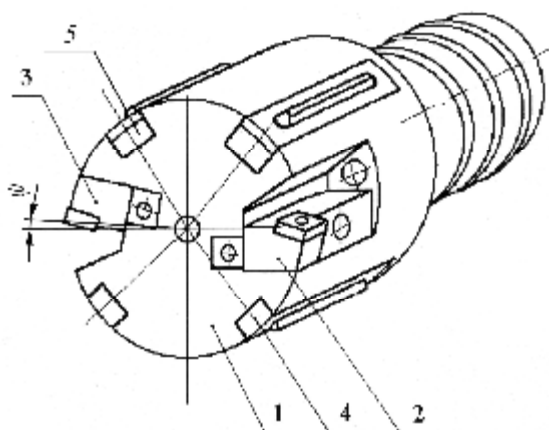


Рис.8. Виброустойчивая конструкция двухрезцовой расточной головки с угловым смещением резцовых блоков

Как видно из рис.8, в продольных пазах корпуса 1 установлены резцовые блоки 2, 3, положение которых может регулироваться в осевом и радиальном направлениях. Кроме того, предусмотрена возможность изменения углового расположения блока 3, что позволяет обеспечить наиболее эффективное взаимодействие следов от обработки двумя резцовыми блоками, когда суммарный регенеративный эффект минимизируется. Оптимальное расположение резцовых блоков для условий конкретной операции растачивания определялось путём расчётов на ПЭВМ.

В корпусе 1 установлены также две неподвижные твёрдосплавные направляющие 4 и два упруго-демпфирующих направляющих элемента 5, что обеспечивает надёжное базирование расточной головки и эффективное виброгашение. В качестве демпфирующего материала использовались прокладки из металлорезины МР, обладающей большим внутренним рассеянием энергии.

Предложенная конструкция расточной головки прошла лабораторные и производственные испытания при растачивании отверстий в гидроцилиндрах, изготовленных из стали 30ХГСА (диаметр отверстий 110мм, длина 1200мм), а также отверстий вала ротора турбины ГТД из жаростойкой стали 5Х12Н2МФАБ-Ш (диаметр отверстий 96мм, длина 1016мм).

При этом продольная подача изменялась в пределах 0,3...0,6 мм/об, глубина резания – от 1,0 до 2,5 мм, скорость резания –

от 40 до 110 м/мин.

Как показали проведенные испытания, применение расточных головок предложенной конструкции позволило снизить амплитуду колебаний в 2 раза по сравнению с расточными головками, применяемыми на производстве. Это дало возможность повысить режимы обработки в 1,25...2 раза и улучшить качество обработанных отверстий.



Рис.9. Общий вид двухрезцовой расточной головки

Отличительной особенностью разработанной математической модели является её универсальность. Это заключается в том, что она позволяет исследовать не только динамику процесса растачивания отверстий, в том числе и многолезвийными инструментами, но также колебательное движение технологической системы при обработке различного вида канавок, уступов, элементов лабиринтных уплотнений. Кроме того, эта модель может быть адаптирована также применительно к обработке точением наружных поверхностей как с продольной, так и с поперечной подачами инструмента.

#### Библиографический список

1. Тимошенко, С.П. Колебания в инженерном деле / С.П. Тимошенко.–М.: Физматиздат, 1967. - 342с.
2. Кудинов, В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 360с.
3. Жарков, И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И.Г. Жарков. - Л.: Машиностроение, 1986. -184с.

4. Авдонин, Г.Т. Исследование технологических особенностей чистового точения при наличии автоколебаний / Г.Т. Авдонин // Дисс. канд. техн. наук. – Куйбышев, 1983. – 219с.

#### References

1. Timoshenko S.P. Fluctuation in engineering. – М.: Fizmatizdat, 1967. – 342pp.

2. Kudinov V.A. Dynamics of machine tools. – М.: Mechanical engineering, 1967. – 360pp.

3. Jarkov I.G. Vibration at processing by cutting. – L: Mechanical engineering, 1986. – 184pp.

4. Avdonin G. T. Research of technological features fair by cutting in the presence of self-oscillations//Diss. Cand.Tech.Sci. – Kuibyshev, 1983. – 219pp.

## INCREASE OF STABILITY OF TECHNOLOGICAL SYSTEMS AT PROCESSING OF DETAILS AIRCRAFTS ENGINES

© 2009 D. L. Skuratov, E. V. Burmistrov, V. N. Samykin

Samara State Aerospace University

The reasons of occurrence and development of self-oscillations are considered at processing by cutting. The mathematical model of self-oscillatory process is offered at processing of deep apertures which has allowed investigating influence of various factors on intensity of vibrations and stability of system. Taking into account results of theoretical researches designs of boring tools with the raised stability to vibrations have been developed. Experimental researches have confirmed adequacy of mathematical model and have allowed planning ways of increase of stability, quality and productivity of processing.

*Self-oscillations, mathematical model, machine, tool, detail, processing by cutting, boring tools*

#### Информация об авторах

**Скуратов Дмитрий Леонидович**, доктор технических наук, профессор кафедры механической обработки материалов Самарского государственного аэрокосмического университета. E-mail: [fdla@ssau.ru](mailto:fdla@ssau.ru) Область научных интересов: структурно-параметрическая оптимизация технологических процессов механической обработки, процессы абразивной обработки.

**Бурмистров Евгений Васильевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры механической обработки материалов Самарского государственного аэрокосмического университета. E-mail: [fdla@ssau.ru](mailto:fdla@ssau.ru). Область научных интересов: исследование виброустойчивости технологических систем при механической обработке.

**Самыкин Виктор Николаевич**, инженер кафедры механической обработки материалов Самарского государственного аэрокосмического университета. E-mail: [fdla@ssau.ru](mailto:fdla@ssau.ru). Область научных интересов: исследование вибраций, возникающих при растачивании глубоких отверстий.

**Skuratov Dmitriy Leonidovich**, Doctor of technical science, professor of Materials mechanical operation department, Samara state aerospace university. E-mail: [fdla@ssau.ru](mailto:fdla@ssau.ru). Area of research: technological processes of mechanical operation structure-parameter optimization and materials, abrasive operation.

**Burmistrov Evgeniy Vasilievich**, Candidate of technical science, Associate professor of Materials mechanical operation department, Samara state aerospace university. E-mail: [fdla@ssau.ru](mailto:fdla@ssau.ru). Area of research: researching of technological system vibration stability at aircraft engine details machining.

**Samykin Victor Nikolayevich**, engineer of Materials mechanical operation department, Samara state aerospace university. E-mail: [fdla@ssau.ru](mailto:fdla@ssau.ru). Area of research: researching of technological system vibration stability at deep holes boring.