

УДК 621.9.01

ФАЗОВАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СИЛЫ РЕЗАНИЯ И ЕЁ РОЛЬ В ВОЗНИКНОВЕНИИ И РАЗВИТИИ АВТОКОЛЕБАНИЙ ПРИ ТОЧЕНИИ НЕЖЁСТКИХ ДЕТАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© 2008 Е. В. Бурмистров, М. Н. Басыров, Р. Р. Гиниятуллин

Самарский государственный аэрокосмический университет

Рассмотрена физическая природа фазовой характеристики силы резания. Показано, что в процессе резания при возникновении вибраций фазовая характеристика силы резания может представлять собой как отставание, так и опережение силы резания по отношению к изменяющейся толщине среза. Приведены данные о влиянии величины отставания на амплитуду автоколебаний.

Фаза, сдвиг, резание, след, автоколебания, точение, детали двигателей летательных аппаратов

Процесс резания при обработке деталей двигателей летательных аппаратов (ДЛА) довольно часто сопровождается интенсивными вибрациями, которые являются одним из главных препятствий для повышения технико-экономических показателей обработки, достижения требуемой точности и высокого качества обработанных поверхностей. 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 довольно сложными по форме и ажурными. В результате при их 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 элементов технологических систем при обработке резанием, по мнению большинства исследователей, являются:

- нелинейная зависимость силы резания,

от толщины среза, изменения которой вызваны относительными виброперемещениями заготовки и инструмента при возбуждении колебаний, а также влиянием волнообразного следа, оставляемого на поверхности резания режущей кромкой инструмента;

- наличие фазового сдвига между изменяющимися силой резания и толщиной среза (фазовая характеристика силы резания).

Как показано в работах [1,2], колебания, которые могут возникнуть в технологических системах первоначально под действием каких-либо случайных факторов (неравномерность снимаемого припуска, неоднородность обрабатываемого материала и др.), приводят к относительным виброперемещениям режущего инструмента и заготовки. В результате толщина среза, снимаемая режущим лезвием инструмента, претерпевает изменения, а на поверхности резания заготовки образуется волнообразный след (рис. 1,а). Этот след при последующем обороте заготовки, спустя время T , соответствующее периоду её вращения, вызовет ещё более значительные изменения толщины среза (рис. 1,б), а следовательно, и составляющих силы резания: радиальной P_y и касательной P_z .

При этом влияние «следа» на изменение толщины среза будет иметь место только в том случае, если вибрационные следы, оставляемые на поверхности резания в мо-

менты времени t и $t - T$, будут сдвинуты относительно друг друга, то есть при условии, что период вращения заготовки не будет кратным периоду колебаний.

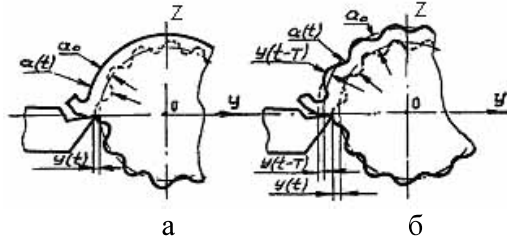


Рис. 1. Изменения толщины среза, вызванные автоколебаниями технологической системы

С учётом сказанного толщина среза, снимаемая резцом в какой-либо момент времени t , может быть представлена в виде

$$a(t) = a_0 + y(t) - y(t - T),$$

где a_0 - номинальное значение толщины среза, определяемое величиной подачи за один оборот заготовки S_0 ;

$y(t)$ - изменения толщины среза, вызванные относительными виброперемещениями резца и заготовки в данный момент времени;

$y(t - T)$ - изменения толщины среза, вызванные влиянием «следа», образовавшегося на поверхности резания за счёт виброперемещений, имевших место в момент предыдущего оборота заготовки.

Другим важным фактором, определяющим возникновение и развитие автоколебаний при обработке резанием, является фазовая характеристика силы резания, а именно: наличие фазового сдвига между изменяющимися силой резания и толщиной среза.

В самом деле, для того чтобы переменная сила резания совершала работу, способствующую возбуждению колебаний или их демпфированию, необходимо, чтобы между этой силой и виброперемещением, приводящим к изменению толщины среза, имел место определенный сдвиг фаз. При синусоидальном характере изменения виброперемещения и силы резания работа этой силы за один период колебаний будет равна

$$A = \int_0^{2\pi} P(t) dy = \pi P_0 Y_0 \sin \varepsilon, \quad (1)$$

где P_0 - амплитуда колебаний силы резания;

Y_0 - амплитуда виброперемещений;

ε - сдвиг фаз.

Из формулы (1) видно, что при сдвиге фаз, равном нулю, работа силы резания также равна нулю. При положительном сдвиге фаз сила резания будет играть роль возбуждающей силы. Если же сдвиг фаз будет иметь знак минус, то работа силы резания станет отрицательной и сила из возбуждающей превратится в демпфирующую.

Сказанное можно пояснить графически. На рис. 2 представлены зависимости силы резания, например, радиальной составляющей P_y , и виброперемещения $y(t)$ в направлении действия этой силы от времени t . Если на основе этих зависимостей построить зависимость силы от перемещения, то получим либо прямую линию, либо замкнутую кривую, площадь внутри которой будет пропорциональна работе, произведенной силой P_y . При этом знак работы определяется направлением обхода кривой.

Если колебания силы резания и виброперемещения синфазны ($\varepsilon = 0$), то график зависимости между ними представляет собой прямую линию и работа возбуждения (демпфирования) колебаний будет равна нулю (рис. 2,а). При $\varepsilon > 0$ получаем положительную работу и обход кривой по часовой стрелке (рис. 2,б). В этом случае работа силы резания идёт на возбуждение колебаний. При этом, как видно из формулы (1) и рис. 2,в, эта работа будет иметь наибольшее значение при сдвиге фаз $\varepsilon = \pi/2$, соответствующем величине отставания силы τ , равной одной четверти от периода колебаний.

Таким образом, работа силы резания при её отставании от виброперемещения, а следовательно, и от изменения толщины среза как бы сообщает дополнительные импульсы при каждом цикле колебаний. Это приводит к нарастанию интенсивности автоколебаний до тех пор, пока работа силы резания не компенсируется работой сил сопротивления. В результате устанавливаются стабильные автоколебания с постоянной амплитудой и частотой, определяемой упруго-жесткостными характеристиками самой колебательной системы.

Если сдвиг фаз ε становится отрицательным (рис. 2,г), то работа силы резания также становится отрицательной (обход

кривой против часовой стрелки). В этом случае сила резания оказывает демпфирующее воздействие на колебания. При величине $\varepsilon = \pi$, когда отставание $\tau = 1/2T_k$, эл-

липс обращается в прямую линию (рис. 2,д) и работа силы резания вновь становится равной нулю.

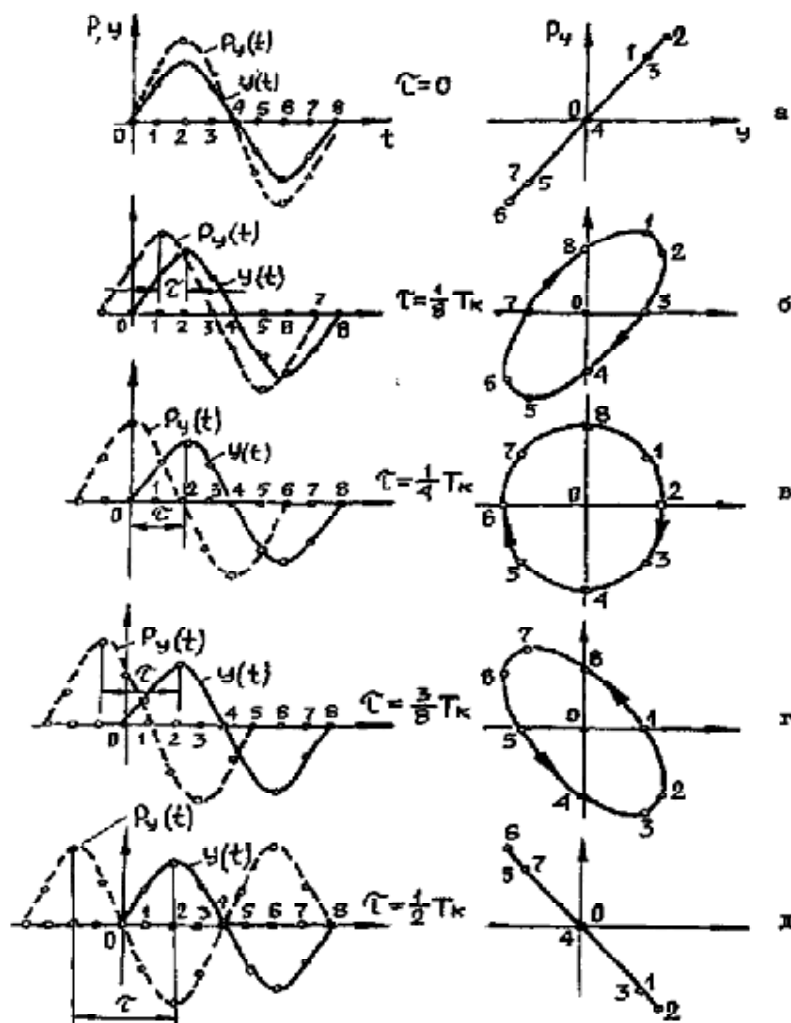


Рис. 2. Зависимости радиальной составляющей P_y и виброперемещений $y(t)$ от времени и диаграммы работы этой силы при изменении её фазовой характеристики

В качестве временной характеристики, определяющей величину фазового сдвига ε , большинством исследователей [2,3,4] принимается отставание силы резания от изменяющейся толщины среза τ . При этом физическую природу отставания объясняют инерционностью процесса пластической деформации обрабатываемого материала при резании, а также процессов, протекающих в зонах контакта стружки и обрабатываемой заготовки соответственно с передней и задней поверхностями режущего инструмента.

В результате сила резания в своём изменении «не успевает» за изменением толщины среза, то есть величина силы резания в любой момент времени t должна рассматриваться как функция от толщины среза, которая снималась инструментом несколько раньше в момент времени $t - \tau$:

$$P(t) = f[a(t - \tau)] = f[a_0 + y(t - \tau)],$$

где a_0 - номинальное значение толщины среза;

$y(t - \tau)$ - виброперемещение, имевшее место в момент времени $t - \tau$.

Сказанное подтверждается схемой резания, представленной на рис. 3,а и относящейся к обработке «по чистому», то есть ко-

гда вибрационный след на поверхности резания отсутствует.

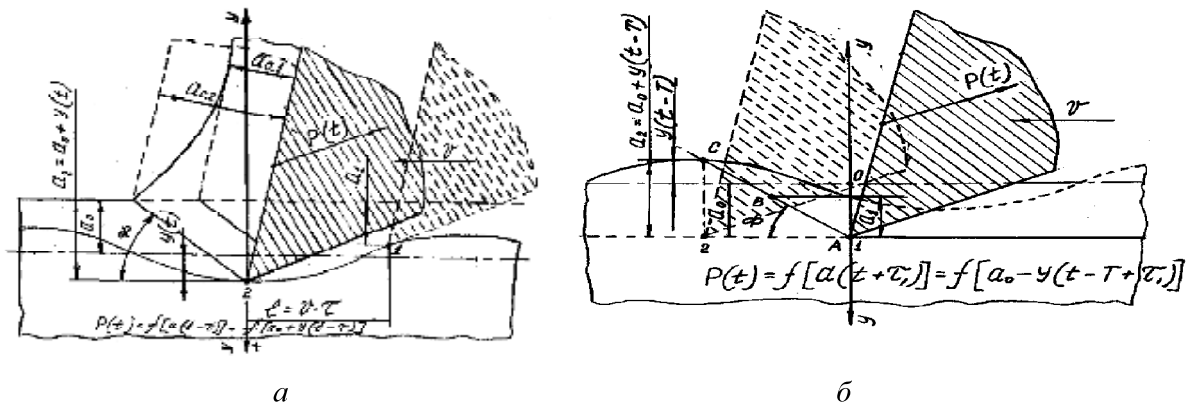


Рис. 3. Отставание (а) и опережение (б) силы резания относительно изменения толщины среза

В ряде работ расчёты силы резания основываются на предположении, что процесс образования стружки при резании определяется главным образом процессом пластического сжатия срезаемого слоя. В связи с этим на основе политропического закона сжатия силу резания можно представить в виде

$$P = \sigma_0 b a K_l^m,$$

где σ_0 - условный предел текучести обрабатываемого материала;

b и a - соответственно ширина и толщина среза;

K_l - коэффициент продольной усадки стружки, характеризующий степень ее пластической деформации и определяемый как отношение длины пути резания к длине стружки, $K_l = L_p / L_{сгр}$;

m - показатель политропы сжатия.

При свободном резании, когда деформации стружки в направлении вдоль режущей кромки резца отсутствуют, коэффициент продольной усадки можно заменить коэффициентом поперечной усадки K_a , представляющим собой отношение толщины стружки a_c к толщине среза a . Тогда выражение для силы резания примет вид

$$P = \sigma_0 b a K_a^m. \quad (2)$$

Как видно из рис. 3,а, в процессе резания при наличии колебаний коэффициент усадки стружки K_a будет отставать от изменения толщины среза. В самом деле, толщина среза, снимаемая резцом в положении

2, принимает максимальное значение $a_2 = a_0 + y(t)_{\max}$, а в контакте с передней поверхностью резца ещё находится стружка, образовавшаяся при меньшей толщине среза a_1 , когда резец находился в положении 1. Ясно, что коэффициент усадки стружки не будет соответствовать толщине среза, снимаемой резцом в данный момент времени в положении 2.

Указанное отставание коэффициента усадки стружки от изменения толщины среза в соответствии с формулой (2) повлечёт за собой соответствующее отставание силы резания.

Наряду с рассмотренными выше представлениями о процессе образования стружки как процессе пластического сжатия получила развитие и другая гипотеза, рассматривающая процесс резания как процесс простого сдвига. Сторонники этой гипотезы предлагают рассчитывать силу резания как силу сопротивления сдвигу отдельных элементов стружки:

$$P = \tau_{сдв} F_{ск} K = \tau_{сдв} \frac{b a}{\sin(\Phi)} K, \quad (3)$$

где $\tau_{сдв}$ - сопротивление обрабатываемого материала деформации сдвига;

$F_{ск}$ - площадь поверхности скалывания, которую, в первом приближении, считают плоскостью и определяют по формуле

$$F_{ск} = \frac{b a}{\sin(\Phi)};$$

b и a – соответственно ширина и толщина среза;

Φ – угол скалывания, представляющий собой угол между плоскостью скалывания и вектором скорости резания v ;

K – коэффициент, учитывающий влияние геометрии инструмента, коэффициентов внешнего и внутреннего трения и других факторов.

Как видно из схемы, представленной на рис. 3,а, при резании «по чистому» как при отсутствии колебаний, так и при их возникновении имеет место соответствие между размерами плоскости скалывания, от чего, как видно из формулы (5), зависит сила резания, и толщиной среза (предполагается, что величина угла скалывания Φ остаётся постоянной).

Как только начинается обработка «по следу», образовавшемуся на поверхности резания вследствие колебаний, имевших место во время предшествующего оборота заготовки (рис. 3,б), размеры плоскости скалывания будут опережать изменение толщины среза. А именно: находясь в положении 1, резец при отсутствии колебаний снимает толщину среза $a_1 = a_0 - y(t - T)$, которой соответствует площадь поверхности скалывания, определяемая размером АВ. Однако фактическая площадь поверхности скалывания, определяемая размером АС, оказывается больше и соответствует толщине среза a_2 , которую резец будет снимать несколько позже, когда он переместится в положение 2, то есть спустя некоторое время τ_1 .

В результате, как показано в работах [5,6], может наблюдаться опережение силы резания от изменения толщины среза:

$$P(t) = f[a(t + \tau_1)] = f[a_0 + y(t - T + \tau_1)]$$

При этом, если учесть, что и при работе «по следу» будет иметь место инерционность процесса пластической деформации и контактных процессов на передней и задней поверхностях инструмента, то характер зависимости силы резания от быстроменяющейся при наличии колебаний толщины среза становится ещё более сложным.

Наличие опережения силы резания по отношению к изменению толщины среза получило экспериментальное подтверждение в

исследованиях [6]. Исследования проводились при строгании плоских призматических образцов, устанавливаемых на столе фрезерного станка 6Н83Ш.

Строгальный динамометрический резец закреплялся в серье, используемой при фрезеровании в качестве второй опоры оправок.

С помощью этого резца измерялась касательная составляющая силы резания P_z , толщина среза измерялась с помощью специального токовихревого датчика. Сигналы, характеризующие изменение толщины среза и силы резания, с помощью двухлучевого электронного осциллографа и лентопротяжного устройства фиксировались на киноплёнке.

Движение резания сообщалось обрабатываемому образцу за счёт ускоренного перемещения стола фрезерного станка ($v = 2,5$ м/мин). Образцы были изготовлены из различных материалов (сталь 30ХГСА, латунь, титановый сплав ВТ20) и позволяли имитировать различный характер изменения толщины среза: ступенчатый, линейный и синусоидальный. Последнее достигалось путём сообщения обрабатываемому образцу вынужденных колебаний с частотой 100 Гц от специального вибратора.

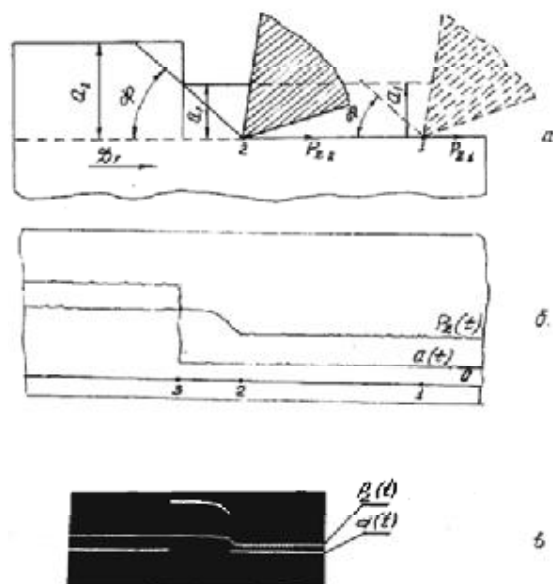


Рис. 4. Схема строгания плоского ступенчатого образца (а) и осциллограммы изменения силы резания и толщины среза (б – предполагаемая, в – экспериментальная)

На рис. 4 представлена схема строгания ступенчатого образца и осциллограммы,

характеризующие изменение силы резания и толщины среза.

Как видно из осциллограмм, сила резания P_z начинает возрастать раньше, чем происходит увеличение толщины среза. Это связано с тем, что в положении 2, занимаемом резцом в момент времени, когда наблюдалось увеличение силы резания, при толщине среза, равной её начальному значению a_1 , размеры плоскости скалывания увеличиваются и приобретают значение, соответствующее большей толщине среза a_2 .

Опережение силы резания по отношению к изменению толщины среза наблюдалось также при линейном и синусоидальном характере изменения толщины среза. Величина опережения, как показали исследования, колеблется в пределах от $1,1 \cdot 10^{-3}$ до $4,8 \cdot 10^{-3}$ с и зависит от скорости резания и свойств обрабатываемого материала.

Выполненные с помощью ЭВМ расчёты показали, что фазовый сдвиг между силой резания и толщиной среза, особенно отставание τ , оказывает существенное влияние на интенсивность автоколебаний.

Как видно из рис. 5, наибольшие значения амплитуды колебаний наблюдались при величине отставания, равной одной четвёртой от периода колебаний ($\tau = 1/4 T_k$), что хорошо согласуется с диаграммами работы силы резания (рис. 2).

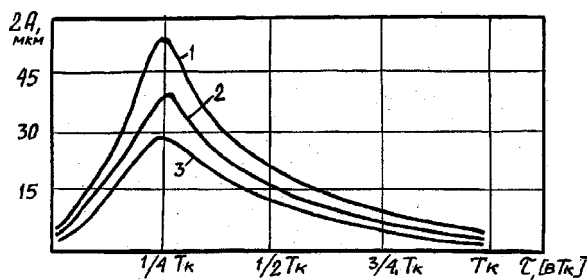


Рис. 5. Зависимости амплитуды автоколебаний от фазовой характеристики силы резания (1 — X15H5D2T; 2 — 12X18H10T; 3 — BT9)

Уменьшение τ до нуля приводит к резкому снижению амплитуды автоколебаний (примерно в 5...6 раз). При увеличении τ амплитуда колебаний также уменьшается, но более плавно.

Из графиков также видно, что, чем выше пластические и прочностные характе-

ристики обрабатываемого материала, тем выше уровень амплитуд вибраций. Это вытекает из сравнения кривых: 1 (для жаропрочной стали X15H5D2T) и 3 (для титанового сплава BT9).

Таким образом, результаты расчётов подтвердили тот факт, что фазовая характеристика силы резания и, в первую очередь, её отставание от изменения толщины среза является важным фактором, определяющим возбуждение и развитие автоколебаний в технологических системах при механической обработке.

Для практической реализации указанного способа управления интенсивностью автоколебаний за счёт изменения величины отставания τ были проведены экспериментальные исследования зависимости τ от скорости резания и подачи, от толщины и ширины среза, от свойств обрабатываемых материалов и геометрии инструментов. При этом использовалась высокочувствительная малоинерционная виброизмерительная и динамометрическая аппаратура [1].

В качестве чувствительных элементов применялись бесконтактные вихретоковые преобразователи перемещений, сигналы от которых регистрировались электронным осциллографом и записывались на киноплёнку с помощью специального лентопротяжного устройства. Примеры полученных осциллограмм приведены на рис. 6.

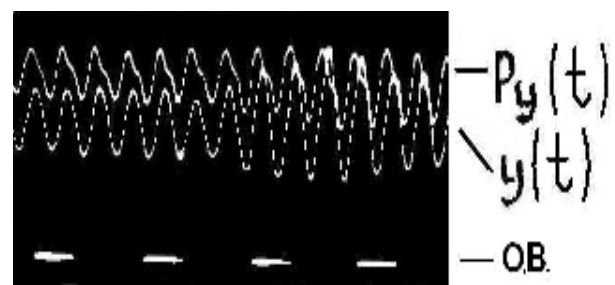


Рис. 6. Осциллограммы радиальной составляющей силы резания P_y и виброперемещений $y(t)$

Величина отставания силы резания от виброперемещений (от толщины среза) находилась путём измерений с помощью инструментального микроскопа БМИ. Обработка полученных данных показала, что указанные зависимости могут быть аппроксимированы функцией

$$\tau = C_{\tau} \cdot \frac{a^{\mu} \cdot b^{\delta}}{v^{\lambda}},$$

где C_{τ} - коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала и геометрии инструментов;

v - скорость резания, м/с;

a и b - соответственно толщина и ширина среза, мм.

Например, при обработке нержавеющей стали 12X18H10T резцами с пластинками из твёрдого сплава ВК8 и геометрией заточки: передний угол $\gamma = 0$, задний угол $\alpha = 12^{\circ}$, - формула для расчёта τ имеет вид

$$\tau = 2,44 \cdot 10^{-3} \frac{a^{0,58} \cdot b^{0,45}}{v^{0,83}}, c.$$

Таким образом, используя эту формулу и воздействуя на величину τ путём изменения подачи (толщины среза), скорости резания, геометрии инструмента и других факторов, можно избежать условия, когда $\tau = 1/4T_k$, при котором сила резания играет роль возбуждающей силы, а величина её работы, а следовательно, и амплитуды колебаний имеют наибольшие значения.

Библиографический список

1. Авдонин Г.Т. Исследование технологических особенностей чистового точения при наличии автоколебаний. Дисс. канд. техн. наук.- Куйбышев, 1983.-219с.
2. Авдонин Г. Т., Бурмистров Е. В., Жарков И. Г., Маркушин Е. М. Влияние фазовой характеристики силы резания (отставание от изменения толщины среза) на интенсивность автоколебаний//В кн.: Высокоэффективные методы механической обработки жаропрочных и титановых сплавов.- Куйбышев, 1981. - С. 123-129.
3. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. - Л.: Машиностроение. 1986. - 184с.

4. Кудинов В. А. Динамика станков. -М.: Машиностроение. 1974. – 360с.

5. Ота К., Коно Н. О самовозбуждающихся вибрациях станка или обрабатываемой детали, вызванных регенеративным влиянием следа и запаздыванием//В кн.: Конструирование и технология машиностроения. - М.: Мир. 1974.- №4.- С. 246-257.

6. Воронов Е. Н. Повышение производительности и качества обработки деталей из высокопрочных, коррозионностойких сталей и титановых сплавов за счёт улучшения характеристик виброустойчивости и надёжности свёрл малых диаметров. Дисс. канд. техн. наук.- Куйбышев, 1986.-216с.

References

1. Avdonin G.T. Technological Features Research of the Finish Turning under autooscillations. Thesis for Candidate of Engineering Science. Kuybyshev, 1983.-219pp.
2. Avdonin G.T., Burmistrov E.V., Zharkov I.G. and Markushin E.M. "Cutting Force Phase Response Influence on the Autooscillations Intensity" from High-prefomance Methods of Titanium and Heat-resistant Alloys Machine Working.-Kuybyshev, 1981.– pp.123-129.
3. Zharkov I.G. Vibrations in Edge Tool Treatment. Leningrad: "Mashinostroenie", 1986.-184pp.
4. Kudinov V.A. Machine Tools Dynamics. Moscow, "Mashinostroenie", 1974, -360pp.
5. Ota K and Kono N. "Of machine or work piece self-excited vibrations caused by regenerative influence of mark and lagging" from Design and Technology of Machinery Construction. Moscow: "Mir", 1974.- pp.246-257.
6. Voronov E.N. Productivity and finish improvement of high-tensile and corrosion-resistant steel and titanium alloy details by enhancing the vibration resistance parameters and small-gaged drills reliability. Thesis for Candidate of Engineering Science. Kuybyshev, 1986.-216pp.

THE PHASE CHARACTERISTIC OF FORCE CUTTING AND ITS ROLE IN OCCURRENCE AND DEVELOPMENT OF SELF-OSCILLATIONS AT SHARPENING NOT RIGID DETAILS OF AVIATION ENGINES

© 2008 E. V. Burmistrov, M. N. Basyrov, R. R. Giniyatullin

Samara State Aerospace University

Considered the physical nature of the phase characteristic of force cutting. It is proved, that during the process of cutting with occurrence of vibrations, the phase characteristic of force cutting can represent both backlog, and an advance of force cutting in relation to changing thickness of a shear. The data brought influence of value backlog on amplitude of self-oscillations.

Phase, shift, cutting, mark, autooscillations, turning, aircraft engine components

Информация об авторах

Бурмистров Евгений Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры механической обработки материалов Самарского государственного аэрокосмического университета. E-mail: fdla@ssau.ru. Область научных интересов: исследование вибраций, возникающих при растачивании глубоких отверстий.

Басыров Марат Наелевич, студент Самарского государственного аэрокосмического университета. E-mail: fdla@ssau.ru. Область научных интересов: исследование вибраций, возникающих при растачивании глубоких отверстий.

Гиниятуллин Ренат Рашидович, студент Самарского государственного аэрокосмического университета. E-mail: fdla@ssau.ru. Область научных интересов: исследование вибраций, возникающих при растачивании глубоких отверстий.

Burmistrov Evgenij Vasiljevich, Candidate of Engineering Science – associate professor of Samara State Aerospace University “Mechanical Material Working” department. E-mail: fdla@ssau.ru. Area of research: vibrations in deep boring processes.

Basyrov Marat Naelevich, student of Samara State Aerospace University. E-mail: fdla@ssau.ru. Area of research: vibrations in deep boring processes.

Giniyatulin Renat Rachidovich, student of Samara State Aerospace University. E-mail: fdla@ssau.ru. Area of research: vibrations in deep boring processes.