

ВЛИЯНИЕ ФАЗОВОГО СДВИГА МЕЖДУ СИЛОЙ РЕЗАНИЯ И ТОЛЩИНОЙ СРЕЗАЕМОГО СЛОЯ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАЗВИТИЕ КОЛЕБАНИЙ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Бурмистров Е.В., Волков А.Н., Самыкин В.Н.
Самарский Государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Процесс резания при обработке деталей двигателей летательных аппаратов (ДЛА), как правило, сопровождается интенсивными вибрациями, которые являются одним из главных препятствий для повышения технико-экономических показателей обработки, достижения требуемой точности и улучшения качества обработанной поверхности. Это прежде всего связано с высокой динамической напряженностью процесса резания, характерной для обработки нержавеющей и жаропрочных сталей, жаропрочных и титановых сплавов, 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 удается обеспечить достаточную жесткость и виброустойчивость обрабатываемой заготовки и режущего инструмента, что приводит к их интенсивным вибрациям. Возникновение и развитие колебаний в технологических системах в процессе механической обработки определяются главным образом изменением толщины среза, а следовательно и силы резания, при относительных виброперемещениях заготовки и инструмента, а также при обработке «по следу». При этом влияние следа на изменение толщины среза будет иметь место только в том случае, если вибрационные следы оставляемые на поверхности резания в моменты времени «t» и «t-T» будут сдвинуты по фазе, то есть при условии, что период вращения заготовки не будет кратным периоду колебаний ($T \neq n \cdot T_k$, где n - целое число; T_k - период колебаний).

Для того, чтобы переменная сила резания совершала работу, способствующую возбуждению колебаний или их демпфированию, необходимо, чтобы между этой силой и виброперемещением имел место определенный сдвиг фаз. Как известно из теории колебаний, при синусоидальном характере изменения виброперемещений и силы резания, работа этой силы за один период будет равна.

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

где P_0 - амплитуда колебаний силы резания;
 Y_0 - амплитуда виброперемещений $y(t)$;
 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 станет отрицательной и сила из возбуждающей превратится в демпфирующую. Сказанное можно изобразить графически. На рис. 1 представлены зависимости силы резания, например, радиальной составляющей P_r , и виброперемещения y в направлении действия этой составляющей 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_r . 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. 1а). При $\varepsilon > 0$ получаем положительную работу и обход кривой по часовой стрелке (рис. 1б). В этом случае работа силы резания идет на возбуждение колебаний. Как видно из формулы (1) и рис. 1в, эта работа будет иметь наибольшее значение при сдвиге фаз, соответствующем одной четверти от периода колебаний $\varepsilon = \pi/2$. Если сдвиг фаз $\varepsilon < 0$ (рис. 1г), то работа становится отрицательной (обход кривой против часовой стрелки). В этом случае сила резания оказывает демпфирующее воздействие на колебания.

В качестве временной характеристики, определяющей величину фазового сдвига ε , большинством исследователей [1-5] принимается отставание силы резания от изменения толщины среза τ . Физическая природа τ объясняется инерционностью процесса пластической деформации 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 своем 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 режущим инструментом в момент времени « $t-\tau$ ».

$$P(f) = f \left[a(t - \tau), [a_0 + y(t - \tau)] \right], \quad (1)$$

где a_0 - номинальное значение толщины среза;

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

Для теоретического анализа и моделирования автоколебаний, возникающих в процессе резания, сотрудниками КуАИ (позже СГАУ) была разработана теория на базе использования дифференциально-

разностных уравнений. Основу этой теории составили работы профессоров И.Г.Жаркова и Е.М.Маркушина [4,6].

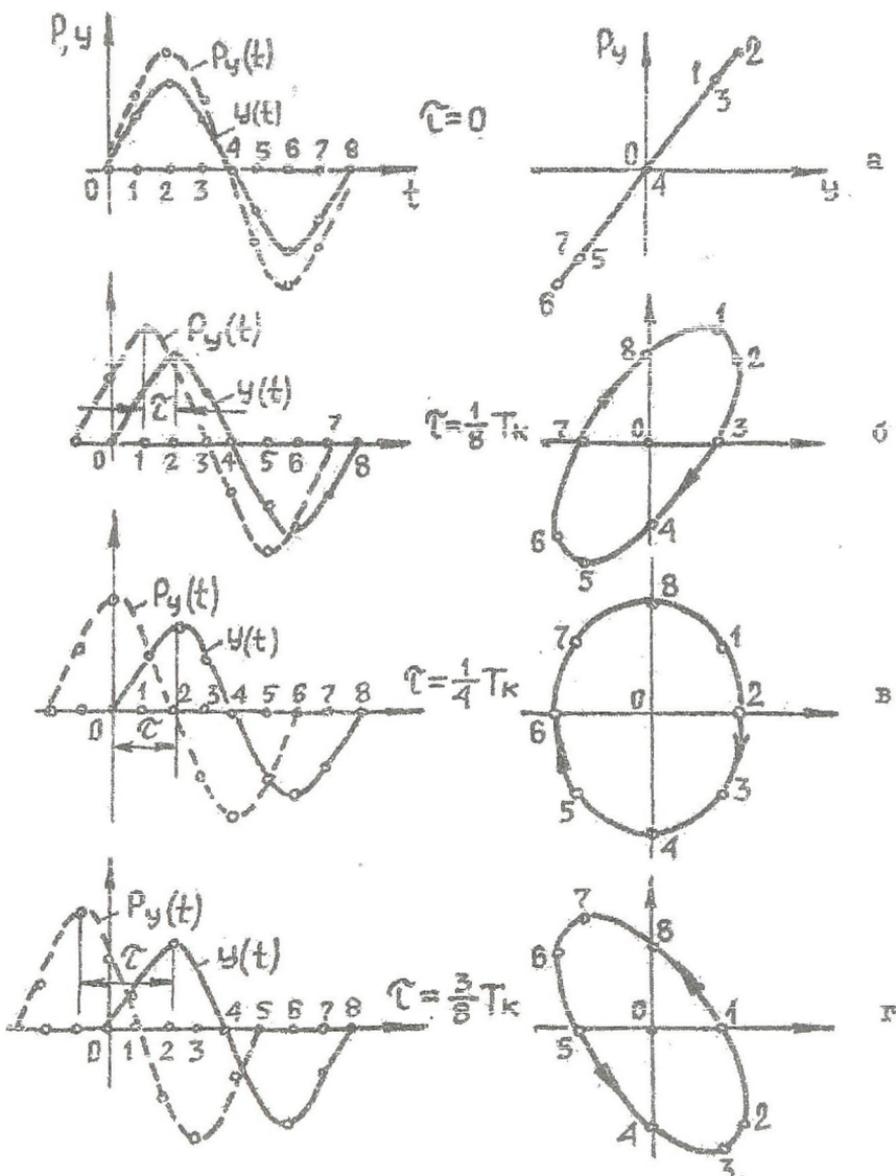


Рисунок 1 - Диаграмма работы силы резания с изменением ее фазовой характеристики.

На основе этой теории были разработаны математические модели, описывающие возникновение и развитие автоколебаний практически при всех видах механической обработки: точении, растачивании, сверлении, зенкеровании, развертывании, фрезеровании.

Как показали расчеты, наибольшая величина амплитуды колебаний имеет место при величине τ , равной одной четверти от периода колебаний T_k . Это подтверждается графиками, приведенными на рис.2. и хорошо согласуется с диаграммами работы силы резания на рис.1. Именно при $\tau = 1/4 T_k$, величина сдвига $\varepsilon = \pi/2$ и работа сила резания становится максимальной.

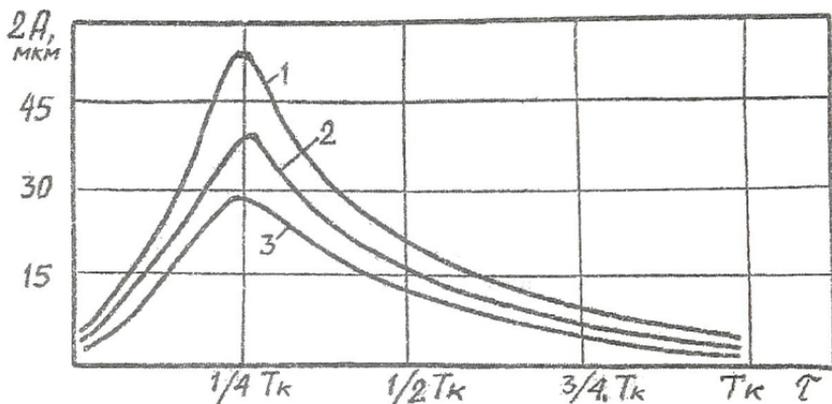
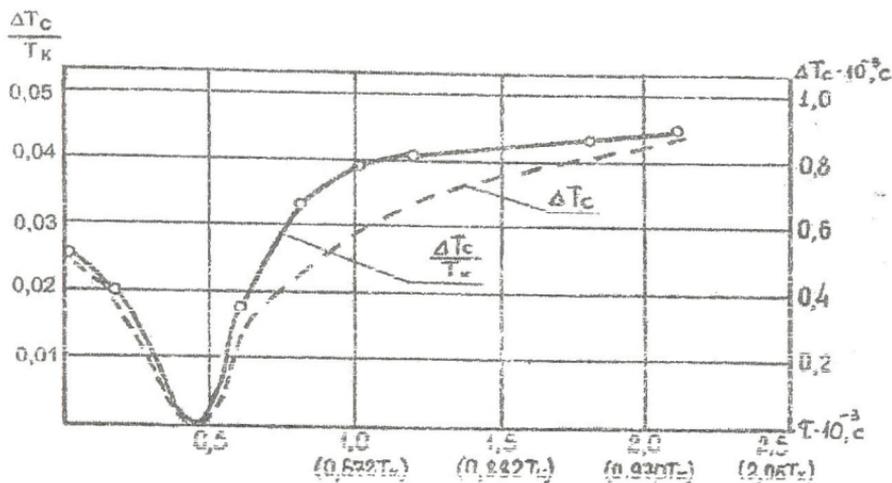


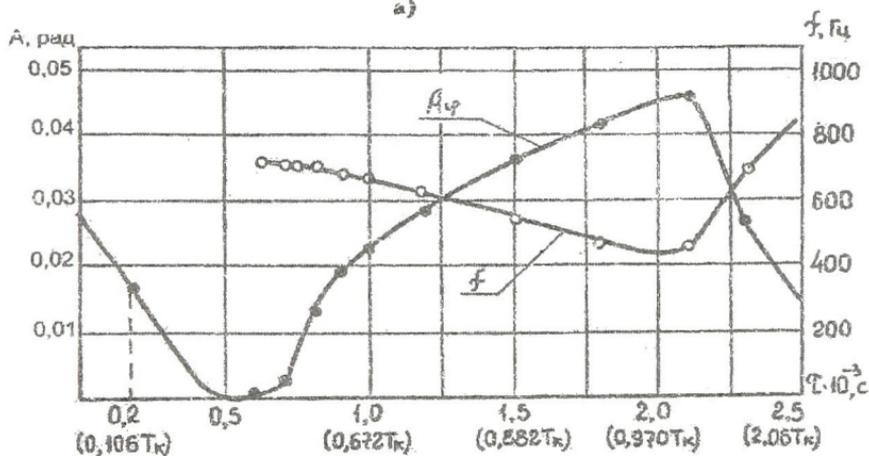
Рисунок 2 - Зависимость амплитуды автоколебаний детали от фазовой характеристики силы резания (отставание τ) при точении.
1- X15H5Д2Т; 2-12Х18Н10Т; 3-ВТ9.

Моделирование процесса возникновения и развития автоколебаний с использованием ЭВМ, а также экспериментальные исследования, выполненные с помощью специально созданной малоинерционной виброизмерительной и динамометрической аппаратуры, позволили установить влияние τ на величину сдвига вибрационных следов, оставляемых инструментом на поверхности резания, а следовательно, на характер изменения толщины среза и амплитуду колебаний.

На рис.3. приведены расчетные данные, характеризующие влияние τ на величину сдвига следов ΔT_c , амплитуду и частоту крутильных колебаний сверл. Нетрудно видеть, что при определенной величине τ , равной величине сдвига следов, зафиксированной при расчете, когда $\tau = 0$, сдвиг следов исчезает, толщина среза становится постоянной и колебания затухают.



а)

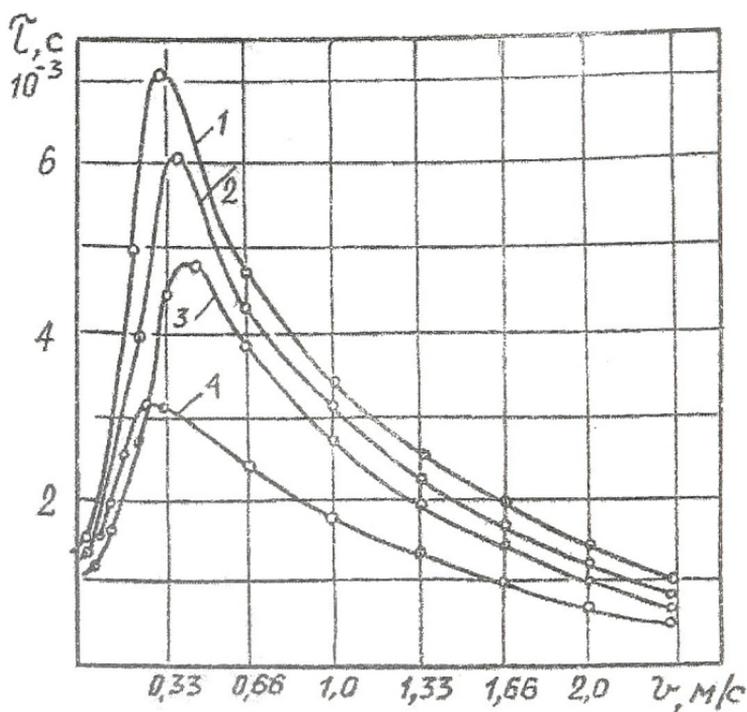


б)

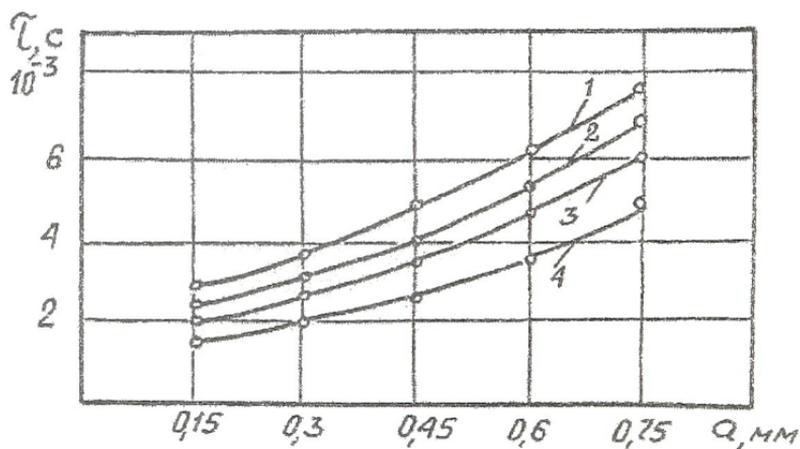
Рисунок 3 - Влияние величины отставания τ на: а) сдвиг следов; б) амплитуду и частоту колебаний сверла.

Кроме того, на основе теоретических и экспериментальных исследований были найдены зависимости величины τ от свойств обрабатываемого материала, усадки стружки, скорости резания, толщины и ширины среза, геометрии инструмента и других факторов. Некоторые из этих зависимостей приведены на рис.4. На основе этих данных была получена эмпирическая зависимость

$$\tau = C_{\tau} \frac{a_0^{\mu}}{v^{\lambda}}, \quad (2)$$



а)



б)

Рисунок 4 - Зависимость фазовой характеристики силы резания от скорости обработки а) и толщины среза б). 1- X15H5Д2Т; 2- X18H9Т; 3 - СТ45; 4 - ВТ9. Режим резания: $v=0.66\text{м/с}$, $b=4\text{мм}$. Геометрия инструмента: $\gamma=0$, $\alpha=12^\circ$.

где C_t - коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала и геометрии инструмента;

a_0 - номинальная толщина среза, определяемая величиной подачи за один оборот заготовки;

v - скорость резания.

Например, для случая обработки точением жаропрочной стали Х15Н5Д2Т резцами с пластическими из твердого сплава ВК8 и геометрией режущей части: $\gamma=0$; $\alpha=12^\circ$; при ширине среза $b=4$ мм, формула (2) имеет следующий вид:

$$\tau = 1,33 \frac{a^{0,58}}{v^{0,83}} \quad (3)$$

Из этой формулы видно, что изменяя толщину среза (подачу) и скорость резания, можно воздействовать на величину τ , и тем самым избежать условия $\tau = 1/4 T_k$, при котором сила резания играет роль возбуждающей силы, и амплитуды колебаний имеют наибольшие значения.

Таким образом, полученные теоретические и экспериментальные данные о величине фазового сдвига и его зависимости от различных факторов открывают пути для снижения интенсивности колебаний, что позволят повысить производительность обработки, стойкость и надежность режущих инструментов, а также точность и качество поверхностей деталей летательных аппаратов и их двигателей.

Список литературы

1. Ташлицкий Н.И. Первичный источник энергии возбуждения автоколебаний прирезании металлов.- Вестник машиностроения, 1960, №2, с.45-50.
2. Кучма Л.К. Учет сил сопротивления в автоколебательной системе «станок-деталь -инструмент».- В кн.:Исследование колебаний металлорежущих станков при резании металлов. - М.:Машгиз,1958.
3. Кудинов В.А. Динамика станков. - М.:Машиностроение, 1967, 359с.
4. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. - Л.:Машиностроение, 1986, 180с.
5. Авдонин Г.Т., Бурмистров Е.В., Жарков И.Г., Маркушин Е.М. Исследование величины отставания изменения силы резания от изменения толщины среза.- В.кн.:Обработка высокопрочных сталей и сплавов инструментами из сверхтвердых синтетических материалов. Куйбышев, 1980, С.80-86.
6. Маркушин Е.М. Оптимальные системы автоматического регулирования с запаздыванием по времени.- Саратов, 1971, 90с.