

Ю.Н. ВНУКОВ, д-р техн. наук, **В. А. ЛОГОМИНОВ**,
П. А. КАМОРКИН, канд. техн. наук,
Э. В. КОНДРАТЮК, канд. техн. наук,
В. А. КРИШТАЛЬ, Запорожье, Украина

ОСОБЕННОСТИ КОНЦЕВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ МАЛОЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ ТИПА «ЗАЩЕМЛЕННЫХ ПЛАСТИН»

ЧАСТЬ 1. Анализ особенностей процесса резания при концевом цилиндрическом фрезеровании и методика исследования условий формирования вынуждающей силы, отжимающей маложе-сткую деталь.

Описана методика изучения трех видов сил, действующих при обработке на маложе-сткую деталь: вынуждающей силы, восстанавливающей силы и силы трения. Иссле-дование сил производится по осциллограмме колебаний упругой системы маложе-сткой де-тали. Рассмотрены особенности формирования силы отжима маложе-сткой детали при концевом цилиндрическом фрезеровании.

Ключевые слова: маложе-сткая деталь, концевое фрезерование, сила отжима

Описана методика вивчення трьох видів сил, що діють при обробці на маложорстку де-таль: сили, що змушує коливання, відновної сили і сили тертя. Дослідження сил прово-диться за осцилограмою коливань пружної системи маложорсткої деталі. Розглянуто особливості формування сили відтискання маложорсткої деталі при кінцевому цилін-дричному фрезеруванні.

Ключеві слова: маложорстка деталь, кінцеве фрезерування, сила відтискання.

The article describe a research technique of three types of forces acting on workpiece: driving force, restoring force and frictional force. Analysis of the forces produced by the oscillogram of mechanical oscillation of an elastic system flexible workpiece. The features of formation of thrust force the flexible workpiece by cylindrical end milling.

Keywords: flexible workpiece, end milling, thrust force

Формулировка проблемы: Некоторые обрабатываемые детали (моно-колеса газотурбинных двигателей (ГТД)) представляют собой конструк-ции, состоящие из «защемленных пластин сложной формы», имеющих ма-лую жесткость и склонность к появлению вибраций при их окончательной обработке концевым фрезерованием (рис.1). К обработанным поверхно-стям предъявляются высокие требования по точности и шероховатости.

Обработку таких деталей производят на многокоординатных станках с CNC управлением на высоких скоростях резания. Моноколесо авиационного ГТД является чрезвычайно дорогой деталью, поэтому для установления основных закономерностей концевое фрезерование нежестких деталей разработан специальный стенд [1], позволяющий всесторонне исследовать этот вид обработки. Принципиальная схема упругой системы (УС) мало жесткой детали для изучения процесса ее фрезерования представлена на рис.2. Особенностью такого подхода является возможность отдельного изучения влияния условий фрезерования (в зоне резания – 4) на поведение УС детали – 3, состоящей из упругого элемента (пластины) – 2, на которой жестко закреплен образец из обрабатываемого материала – 1.



Рисунок 1 – Лопатки осевого колеса компрессора ГТД
(пример защемленной пластины сложной формы)

Таким образом, изменяя размеры и вылет упругой пластины, а также закрепляя на ней дополнительную массу, можно моделировать УС детали в широком диапазоне изменения ее свойств, не изменяя условий фрезерования. И наоборот, можно в широком диапазоне изменять условия фрезерования при постоянных свойствах УС детали.

Для данной схемы концевое цилиндрическое фрезерование (рис. 2) реализуются условия свободного прямоугольного резания (если угол наклона режущей кромки $\lambda = 0^\circ$).

На рис. 3 приведена схема сечения среза припуска глубиной t , шириной – B , цилиндрической фрезой диаметром – $D_{фр}$, вращающейся со скоростью – $n_{фр}$, при минутной подаче детали – $S_{мин}$. Подача на зуб равна

$$S_z = \frac{S_{мин}}{n \cdot z}, \text{ где } z - \text{число зубьев фрезы.}$$

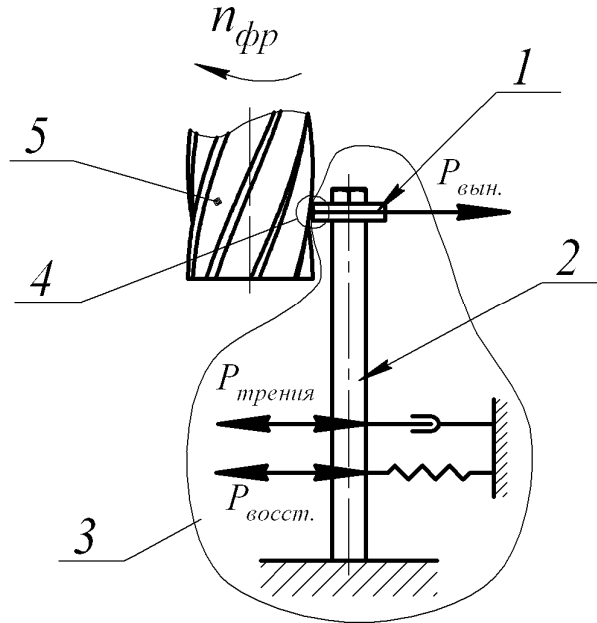


Рисунок 2 – Принципиальная схема упругой системы (УС) мало жесткой детали для изучения процесса ее фрезерования:

- 1 – Обрабатываемый фрезерованием материал (образец); 2 – Упругий элемент (пластина); 3 – Упругая система обрабатываемой детали; 4 – Зона резания; 5 – Концевая цилиндрическая фреза.

Если допустить, что: траекторией зуба фрезы является окружность, деталь и инструмент абсолютно жесткие и лезвие фрезы абсолютно острое (т.е. радиус округления режущей кромки $\rho = 0$ мкм), то время контакта одного зуба с припуском равно

$$\tau = \frac{L_{\cup ADC}}{v} = \frac{60 \cdot \psi}{n_{фр} \cdot 360^\circ}, \quad (1)$$

где $L_{\cup ADC}$ – длина дуги проходимая одним зубом фрезы при снятии припуска; v – скорость резания.

Полный угол контакта одного зуба фрезы с припуском ψ , равен

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 + \psi_3 = \arcsin \frac{s_z}{D_{фр}} + \arccos \left(1 - \frac{2t}{D_{фр}} \right) \quad (2)$$

Толщина срезаемого слоя при цилиндрическом фрезеровании является величиной переменной, зависящей от угла поворота фрезы θ_i от точки А до С. С увеличением угла θ от 0 до $\theta = \psi_1 + \psi_2$ толщина среза увеличивается от 0 до $a_{\max}$, а при дальнейшем увеличении от $\theta = \psi_1 + \psi_2$ до

$\theta = \psi_1 + \psi_2 + \psi_3$ уменьшается до 0. При попутном фрезеровании толщина среза изменяется в обратном порядке.

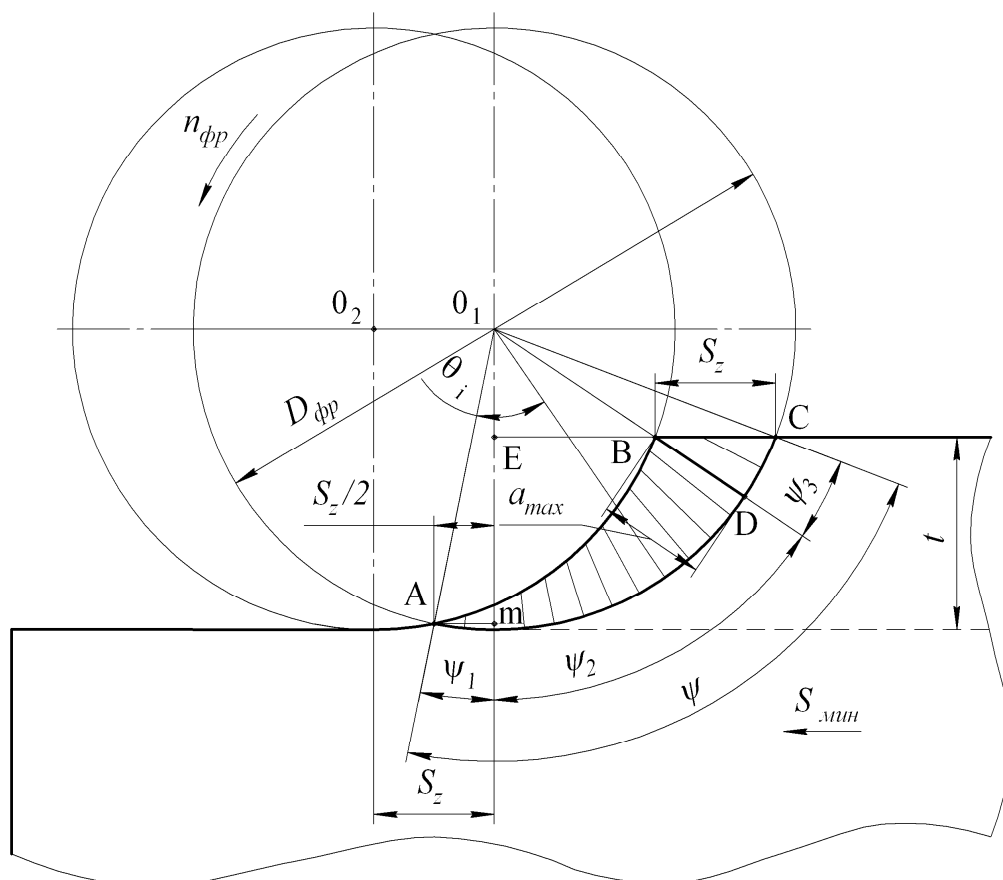


Рисунок 3 – Схема сечения среза одним зубом фрезы при цилиндрическом фрезеровании (встречном)

Для каждого угла поворота фрезы θ_i можно определить значение толщины среза a_i [2]. Для сечения среза S_{ABD} (т.е. $0 < \theta_i < \psi_1 + \psi_2$)

$$a_{zi} = \frac{D_{\phi p}}{2} + S_z \cdot \sin(\theta_i - \psi_i) - \sqrt{\frac{D_{\phi p}^2}{4} - S_z^2 \cdot \cos^2(\theta_i - \psi_1)} \quad (3)$$

Для сечения среза S_{DBC} (т.е. $\psi_1 + \psi_2 \leq \theta_i \leq \psi_1 + \psi_2 + \psi_3$)

$$a_{zi} = \frac{D_{\phi p}}{2} - \frac{\frac{D_{\phi p}}{2} - t}{\cos(\theta - \psi_1)} \quad (4)$$

Значение толщины среза a_{zi} для каждого мгновенного угла поворота зуба фрезы позволяет аналитически рассчитывать силу резания R и ее составляющие в каждый момент времени.

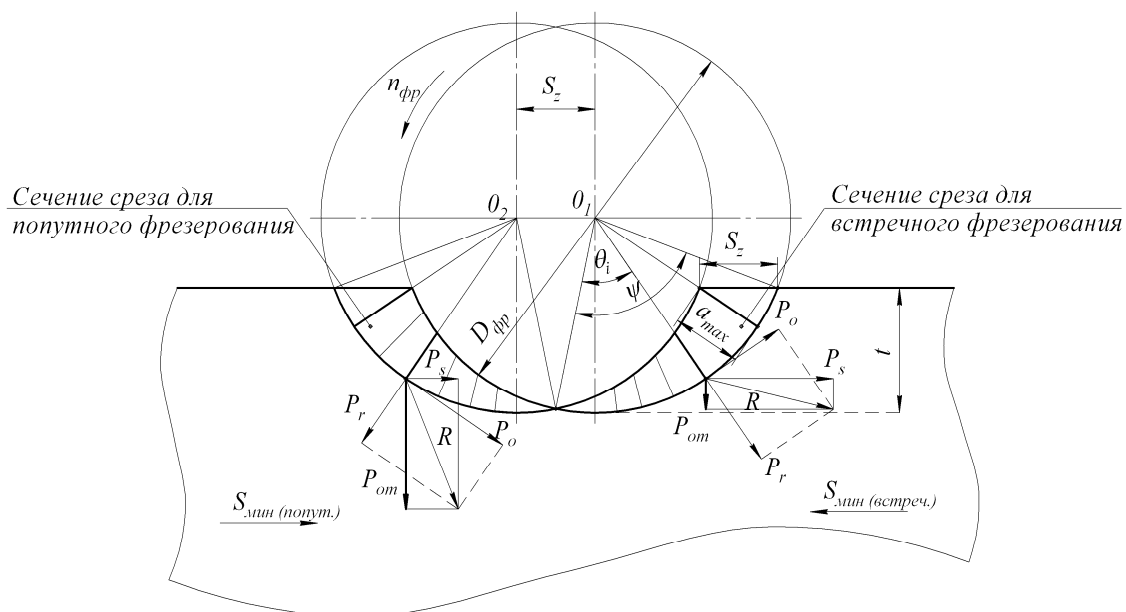


Рисунок 4 – Схема составляющих силы резания – R при встречном и попутном цилиндрическом фрезеровании:

R – сила резания; P_o – окружная сила; P_r – радиальная сила; P_s – сила подачи; $P_{от}$ – сила отжима (отталкивания) нежесткой детали (вынуждающая сила).

При фрезеровании на УС детали воздействуют три силы (рис. 2):

1. **$P_{вын}$ – вынуждающая сила** – это составляющая силы резания R отжимающая (отталкивающая) мало жесткую деталь от инструмента – $P_{от}$ (рис. 4). Величина силы отжима детали (в нашем случае упругой пластины) – $P_{от}$, зависит от угла поворота фрезы θ_i т. е. от времени срезания припуска одним зубом фрезы, условий фрезерования (обрабатываемый материал, геометрия инструмента, режимы резания, применение СОЖ, износ инструмента и др.). При попутном фрезеровании для одинаковых толщин среза сила отжима $P_{от}$ всегда больше, чем при встречном из-за различного направления силы резания – R .

2. **$P_{восст}$ – восстанавливающая сила** – это сила упругости возвращающая деталь в положение равновесия. Величина восстанавливающей силы зависит от силы отжима детали $P_{от}$ и от жесткости УС детали. В нашем случае жесткость определяется толщиной и вылетом зажатой упругой пластины, на которой закреплен обрабатываемый образец.

3. **$P_{тр}$ – сила трения**, гасящая колебания за счет диссипации энергии. В нашем случае гашение колебаний или успокоение упругой системы детали определяется внутренним трением упругой пластины, на которой закреплен обрабатываемый образец.

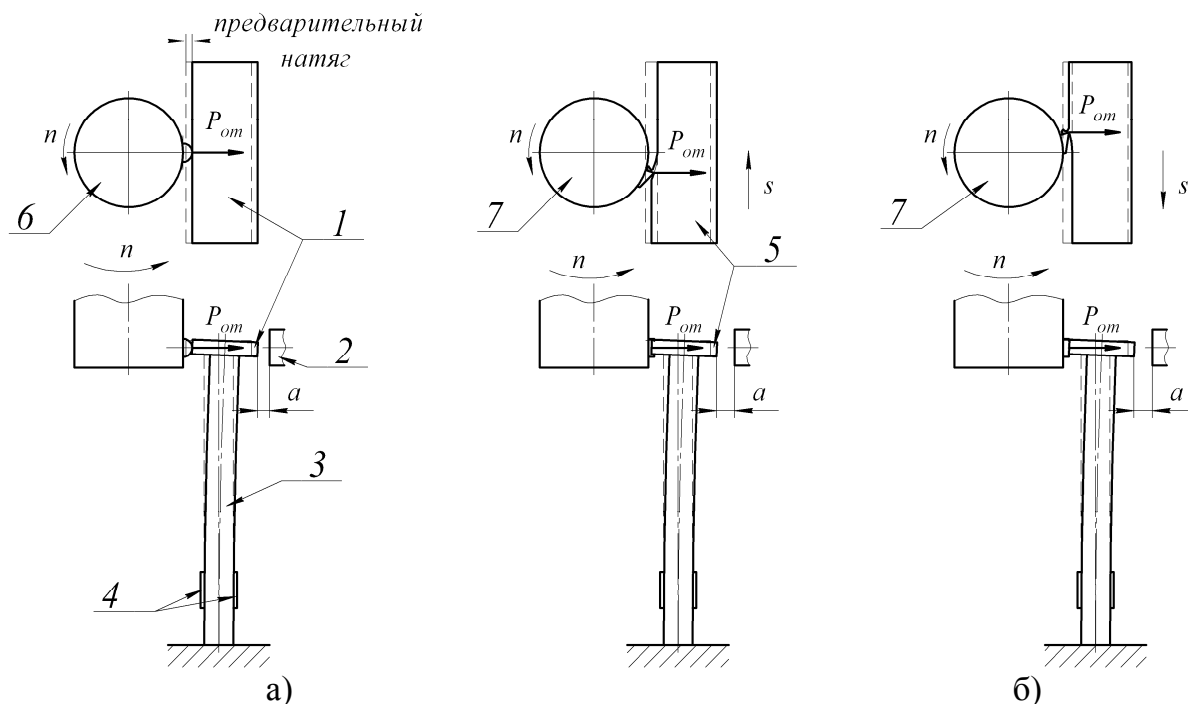


Рисунок 5 – Методика исследования сил, возникающих в УС малоэластичной детали, при различных условиях ее возбуждения

а) Удар кулачком; б) Резание зубом фрезы.

1 – Образец из закаленной стали; 2 – Индуктивный датчик; 3 – Упругая пластина; 4 – Тензодатчики; 5 – Образец из обрабатываемого материала; 6 – Кулачок; 7 – Концевая цилиндрическая фреза.

Методика исследования всех трех сил, действующих на УС детали, показана на рис. 5. Возбуждение УС детали производили двумя способами: ударом кулачка с шаровой поверхностью (рис. 5а) и резанием зубом фрезы при попутном и встречном фрезеровании (рис. 5б). Силы, действующие на УС детали (в нашем случае упругую пластину) вызывают ее деформацию, которую измеряли двумя одновременно работающими датчиками: тензодатчиками 4, наклеенными на упругую пластину, и индуктивным датчиком 2, отстоящем на некотором расстоянии от обратной стороны обрабатываемых образцов 1 и 5. Одновременное использование двух независимых датчиков для оценки деформации УС детали во времени, позволяет проводить исследования с высокой точностью. Подробно методика измерений изложена в работе авторов [1].

На рис. 6 показаны измерительные возможности методики исследования, где в координатах силы (действующие на УС детали) – время, можно изучать динамику поведения упругой системы при концевом фрезеровании малоэластичной детали.

Циклом фрезерования $\tau_{ц.фр}$ считаем время между началом фрезерования соседних зубьев. Для однозубой фрезы (принятой для исследования)

это время одного оборота. Цикл фрезерования состоит из времени резания $\tau_{рез}$ – когда зуб снимает припуск с переменной толщиной среза и времени холостого хода $\tau_{х.х}$ – между точкой выхода из зоны резания предыдущего зуба и точкой входа в зону резания последующего зуба. Во время резания $\tau_{рез}$ на УС детали действует переменная (вынуждающая) сила отжима – $P_{от}$.

Точка *A* (рис. 6) на графике изменения силы $P_{от}$, обозначает момент касания (входа) зуба фрезы в обрабатываемую деталь. Точка *M* показывает максимальное значение силы отжима $P_{от}^{max}$, а точка *B* показывает момент, в который зуб фрезы выходит из зацепления с обрабатываемой деталью.

Таким образом, точка *M* разделяет время резания на две части. На участке *AM* увеличения силы $P_{от}$ время входа в снимаемый припуск равно $\tau_{рез}^{вх}$, на участке *MB* время выхода соответственно – $\tau_{рез}^{вых}$.

При вхождении зуба фрезы в деталь на участке *AM* с увеличением силы отжима $P_{от}$ увеличивается и противостоящая ей сила упругости $P_{восст}$, возникающая в УС детали. После прохождения зубом фрезы точки *M* на участке *MB* сила отжима снижается из-за уменьшения толщины площади среза и из-за уменьшения величины проекции силы резания R на направление отжима в результате поворота фрезы. Одновременно с уменьшением силы отжима $P_{от}$, начинает работать восстанавливающая (упругая) сила – $P_{восст}$ УС детали, которая пытается вернуть ее в положение равновесия. Если бы зуб фрезы вышел из зацепления в точке *M*, то в УС детали возникли бы колебания относительно положения ее равновесия. Из-за сил трения (*внутреннего*, в материале пластины, на которой крепится образец, и *внешнего* – в окружающей пластину среде) колебания затухают. Время затухания колебаний пластины является временем успокоения упругой системы детали – $\tau_{УУС}$.

$$\text{а) } \tau_{УУС} \leq \tau_{рез}^{вых}; \text{ б) } \tau_{УУС} < \tau_{рез}^{вых} + \tau_{х.х}; \text{ в) } \tau_{УУС} > \tau_{рез}^{вых} + \tau_{х.х}$$

При цилиндрическом фрезеровании маложестких деталей возможны три варианта:

Вариант 1 (рис. 6а). Фрезерование происходит в условиях, когда время успокоения механической системы детали меньше или равно времени, при котором сила отжима $P_{от}$ снижается от уровня своего максимального значения $P_{от}^{max}$ до момента выхода зуба фрезы из зацепления. Другими словами соблюдается соотношение $\tau_{УУС} \leq \tau_{рез}^{вых}$.

В данном случае динамические условия фрезерования маложесткой детали не отличаются от условий фрезерования жестких деталей. Единственное различие может иметь место в уменьшении величины снимаемого припуска из-за упругого отклонения маложесткой детали. Такой случай

имеет место при низких скоростях резания, где время выхода $\tau_{рез}^{вых}$ значительное по сравнению с временем успокоения $\tau_{уyc}$. Необходимо отметить, что во время выхода $\tau_{рез}^{вых}$ зуб фрезы находится в зацеплении со снимаемым припуском, что оказывает дополнительное демпфирующее воздействие на УС детали.

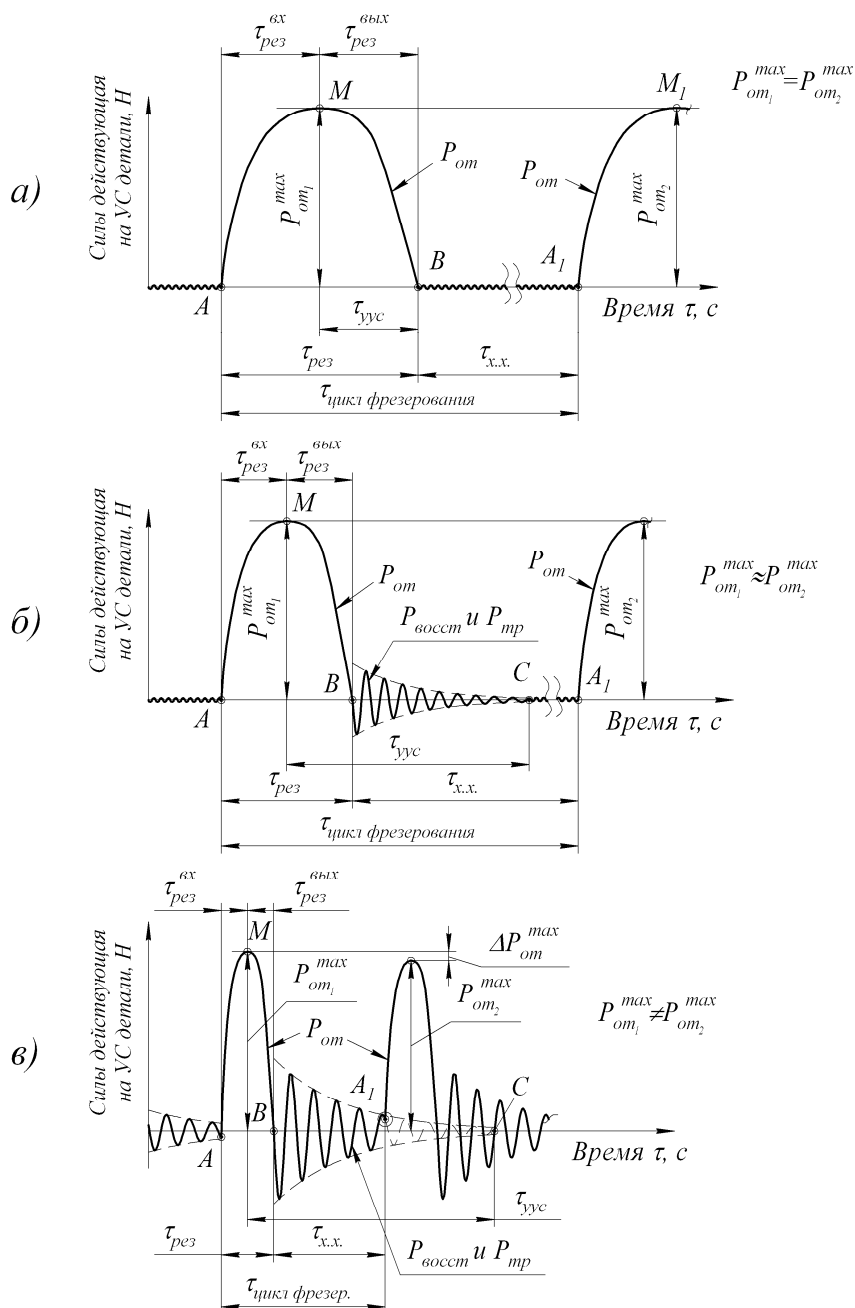


Рисунок 6 – Силы возникающие в упругой системе мало жесткой детали при цилиндрическом фрезеровании

Вариант 2 (рис. 6б). Фрезерование проходит в условиях, когда при выходе зуба фрезы из зацепления, УС детали не успела восстановиться в состояние равновесия и ей необходимо некоторое время для успокоения.

Однако, при подходе следующего зуба, УС детали уже уравновешена, т.е. наблюдается соотношение $\tau_{УС} < \tau_{рез}^{бых} + \tau_{х.х}$.

Такой случай может иметь место при более высоких скоростях резания, когда время контакта зуба фрезы со снимаемым припуском сокращается, а время холостого хода $\tau_{х.х}$ еще достаточно большое, чтобы дать УС детали успокоиться и восстановить равновесие. В данном случае динамические условия фрезерования маложестких деталей **не существенно отличаются** от фрезерования жестких деталей.

Вариант 3 (рис. 6в). Фрезерование проходит в условиях, когда УС детали не успевает успокоиться и еще находится в колебательном процессе, а очередной зуб фрезы начинает резание, т.е. наблюдается соотношение $\tau_{УС} > \tau_{рез}^{бых} + \tau_{х.х}$.

В этом случае точка A_1 касания следующим зубом фрезы обрабатываемой детали может быть в любом месте в пределах размаха свободных колебаний обрабатываемой поверхности с учетом их затухания. Расположение точек касания зуба фрезы с колеблющейся обрабатываемой поверхностью A , A_1 и т.д. имеет строгую закономерность и влияет на величину силы отжима $P_{от}^{max}$. На рис. 6в показано, что повышение точки касания A_1 с волной свободных колебаний детали во время холостого хода по сравнению с точкой A предыдущего касания приводит к снижению силы отжима на величину $\Delta P_{от}^{max}$. Таким образом, если зуб фрезы врежется в обрабатываемую поверхность нежесткой детали, совершающую колебательный процесс, то в каждом случае сила отжима отличается на величину $\Delta P_{от}^{max}$ и появляется причина возникновения дополнительного колебательного процесса.

Подробно эти исследования описаны авторами в статье «Особенности концевоего фрезерования маложестких деталей типа «защемленных пластин», часть 2 – «Влияние скорости резания при концевом цилиндрическом фрезеровании маложесткой детали на формирование вынуждающей силы (силы отжима детали)»

Список использованных источников: 1. Внуков, Ю.Н. Стенд для изучения механических колебаний при фрезеровании маложестких деталей при концевом фрезеровании / Ю.Н. Внуков, В.А. Логоминов, П.А. Каморкин // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн. техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2011. – Вып. 80. – С. 32-37. 2. Логоминов, В.О. Визначення товщини зрізу та часу контакту для прямозубої циліндричної фрези / В.О. Логоминов, А.А. Мінакова, Ю.М. Внуков // Процеси механічної обробки в машинобудуванні: Зб. наук. праць, Житомир: ЖДТУ, 2011. – вип. 11. – С. 174-179.