

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

ОСОБЕННОСТИ КОНЦЕВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ МАЛОЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ ТИПА «ЗАЩЕМЛЕННЫХ ПЛАСТИН»

ЧАСТЬ 2. Влияние скорости резания при концевом цилиндрическом фрезеровании маложесткой детали на формирование значений вынуждающей силы (силы отжима маложесткой детали).

В статье представлены результаты экспериментального исследования силы отжима маложесткой детали при концевом цилиндрическом фрезеровании. Раскрыт механизм возникновения колебаний значений максимальной силы отжима при высоких скоростях вращения фрезы.

В статті представлені результати експериментального дослідження сили відтискання маложорсткої деталі при кінцевому циліндричному фрезеруванні. Розкрито механізм виникнення коливань значень максимальної сили відтискання при високих швидкостях обертання фрези.

The article present experimental research results of thrust force of flexible workpiece for cylindrical end milling. The mechanism of occurrence oscillation of thrust force maximums for high speed mill rotation is described.

В части 1 подробно описана методика исследования условий формирования вынуждающей силы (отжимающей маложесткую деталь) при концевом цилиндрическом фрезеровании.

В части 2 приведены результаты экспериментальных исследований влияния скорости вращения однозубой концевой цилиндрической фрезы на формирование вынуждающей силы (силы отжима маложесткой детали – $P_{от}$) с учетом восстанавливающей силы – $P_{восст}$ и силы трения – $P_{тр}$ в упругой системе (УС) маложесткой детали.

Условия проведения экспериментов: Фрезерование проводили на универсально-фрезерном станке мод. FWD-32J, на стенде, моделирующем УС маложесткой детали, подробно описанному в работе авторов [1]. Образец из обрабатываемого материала Ст.3, размерами 50×20×3,4 жестко крепился на упругой пластине, защемленной в стенде, имеющей следующие

размеры: толщина $h = 8$ мм; ширина $b = 60$ мм; вылет $L = 80$ мм. В качестве инструмента использовали концевую цилиндрическую однозубую фрезу $\varnothing 35$ мм с режущим зубом из быстрорежущей стали Р6М5. Выбор обрабатываемого и инструментального материала позволил проводить исследования в широком диапазоне скоростей резания и различных условиях колебаний УС мало жесткой детали. Жесткость концевой фрезы на порядок превосходила жесткость обрабатываемой детали [1].

При подаче на зуб $S_z = 0,05$ мм/зуб, глубине фрезерования $t = 0,5$ мм и ширине фрезерования $B = 3,4$ мм, испытания проводили на разных скоростях вращения фрезы: $n_{фр1} = 224$ об/мин ($v_1 = 25$ м/мин), $n_{фр2} = 560$ об/мин ($v_2 = 62$ м/мин), $n_{фр3} = 1120$ об/мин ($v_3 = 123$ м/мин), $n_{фр4} = 1800$ об/мин ($v_4 = 198$ м/мин). Рассматривали встречное и попутное фрезерование. СОТС не применяли.

При цилиндрическом фрезеровании величина силы отжима $P_{от}$ при снятии припуска одним зубом фрезы переменная, из-за изменения толщины среза на дуге контакта и поворота направления действия силы резания – R (см. часть 1). На рис. 1 показана методика обработки виброграмм для двух случаев, когда УС детали успевает успокоиться до подхода очередного зуба (рис. 1а) и случая когда зуб фрезы врезается в обрабатываемую поверхность, которая продолжает совершать колебания возбужденные резом предыдущего зуба.

На рис. 1 приняты следующие обозначения:

- $\tau_{\text{цикл.фр}}$ – время цикла фрезерования, между двумя точками врезания соседних зубьев фрезы. Для однозубой фрезы это время одного поворота.
- $\tau_{\text{рез}}$ – время срезания припуска одним зубом.
- $\tau_{\text{х.х}}$ – время холостого хода, между двумя резами. В это время на деталь не действует сила резания;
- $\tau_{\text{рез}}^{\text{вх}}$ – часть времени срезания припуска одним зубом в период увеличения силы отжима детали до ее максимального значения – $P_{от}^{\text{max}}$. В это время деталь отжимается от положения ее равновесия (линия ox) силой резания;
- $\tau_{\text{рез}}^{\text{вых}}$ – часть времени срезания припуска одним зубом в период уменьшения силы отжима от максимального ее значения $P_{от}^{\text{max}}$. В этот период снижения силы резания, начинают действовать упругие силы деформации детали, стараясь вернуть ее в положение равновесия.

Если величина времени $\tau_{\text{рез}}^{\text{вых}}$ больше, чем время ее успокоения $\tau_{\text{уyc}}$, то деталь выходит из зацепления с зубом оставаясь в положении равновесия,

которая она занимала до начала врезания зубом фрезы. Это условие соблюдается при низких скоростях вращения фрезы $n_{фр}$.

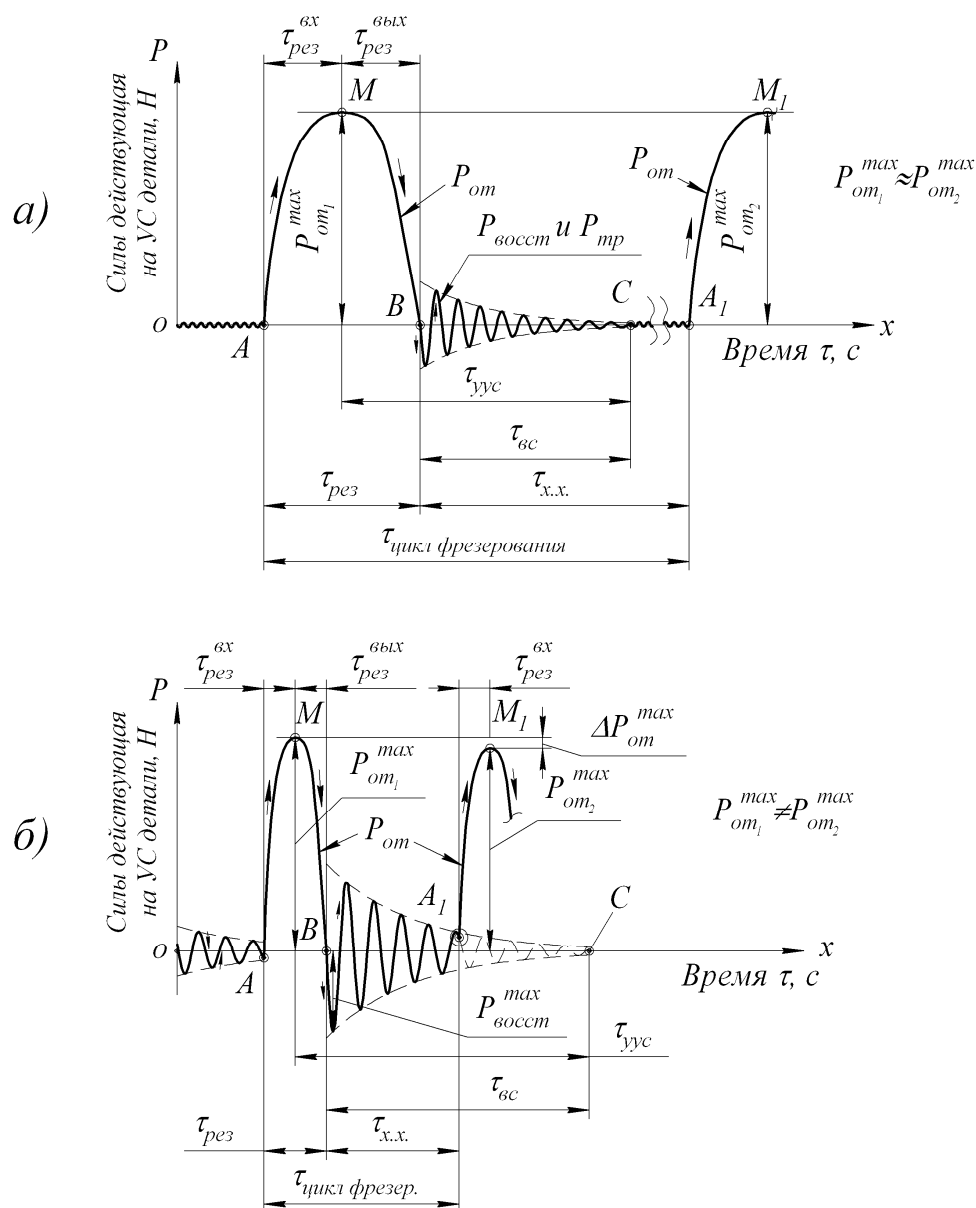


Рисунок 1 – Виброграммы сил, возникающих в УС мало жесткой детали при цилиндрическом концевом фрезеровании: а) $\tau_{уус} < \tau_{х.х.}$; б) $\tau_{уус} > \tau_{х.х.}$.

Если величина времени $\tau_{рез}^{вых}$ меньше, чем время успокоения УС детали – $\tau_{уус}$, то деталь продолжает совершать затухающие колебания относительно положения ее равновесия. Затухание вызывается силами внутреннего и внешнего трения – $P_{тр}$. Время успокоения УС детали после выхода ее из зацепления с зубом $\tau_{вс}$ зависит от величины упругой энергии, оставшейся в ней после совместного контакта с зубом фрезы на участке $\tau_{рез}^{вых}$. Величину оставшейся упругой энергии можно оценить величиной $P_{восст}^{max}$ на

первой волне колебания УС детали в сторону, обратную от направления ее отжима при врезании.

Сравнение виброграмм а и б на рис. 1 показывает, что во втором случае оставшаяся энергия больше, чем для первого. Стрелками показано направление колебаний УС детали относительно положения ее равновесия (линии ox).

В табл. 1 приведены результаты изучения по виброграммам средних значений максимальных величин силы отжима детали $\bar{P}_{от}^{max}$ большого количества последовательных врезаний зуба фрезы, при различных скоростях вращения фрезы и направлениях подачи. На рис. 2 эти результаты представлены графически. Приведенные результаты показывают, что при всех скоростях вращения фрезы средние значения максимальных сил отжима детали $\bar{P}_{от}^{max}$ при попутном фрезеровании больше чем при встречном. С увеличением скорости вращения фрезы увеличивается величина отклонения максимальных значений силы отжима $P_{от}^{max}$ от их среднего значения $\bar{P}_{от}^{max}$. Причем, при скорости вращения $n_{фр} = 1800$ об/мин величина колебаний максимальных значений сил отжима $P_{от}^{max}$ становится столь большой, что в этот диапазон укладываются средние значения максимальных сил отжима для всех других (более низких) скоростей вращения фрезы.

Таблица 1 – Условия и результаты исследования влияния скорости фрезерования на силы отжима маложесткой детали

№ опыта	Вид фрезерования	Условия фрезерования						$\bar{P}_{от}^{max}$, Н	$\sigma_{P_{от}}$, Н	ν	Δ , мкм
		$n_{фр}$, об/мин	ν , м/мин	$S_{мин}$, мм/мин	S_z , мм/зуб	t , мм	B , мм				
1	Встречное	224	25	11,2	0,05	0,5	3,4	179	4,21	0,023	86,90
2		560	62	28	0,05	0,5	3,4	218	11,94	0,05	91,54
3		1120	123	56	0,05	0,5	3,4	234	45,94	0,20	94,33
4		1800	198	90	0,05	0,5	3,4	176	78,34	0,45	77,55
5	Попутное	224	25	11,2	0,05	0,5	3,4	246	4,93	0,02	117,83
6		560	62	28	0,05	0,5	3,4	267	11,99	0,04	121,83
7		1120	123	56	0,05	0,5	3,4	291	32,83	0,11	136,95
8		1800	198	90	0,05	0,5	3,4	304	58,34	0,19	139,49

Примечание: Δ – Среднее максимального отклонения УС детали

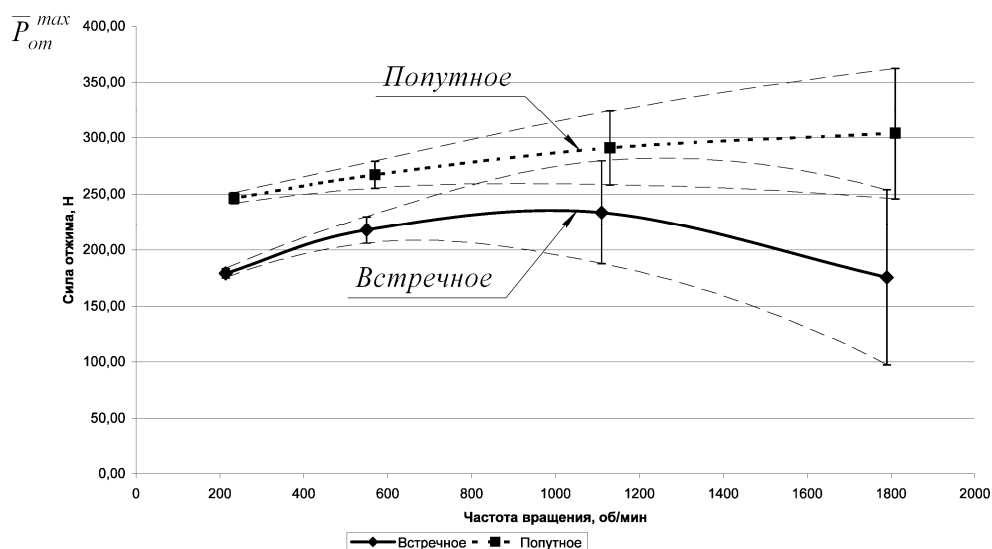


Рисунок 2 – Влияние скорости вращения и направления подачи на средние значения максимальных сил отжима $\bar{P}_{от}^{max}$

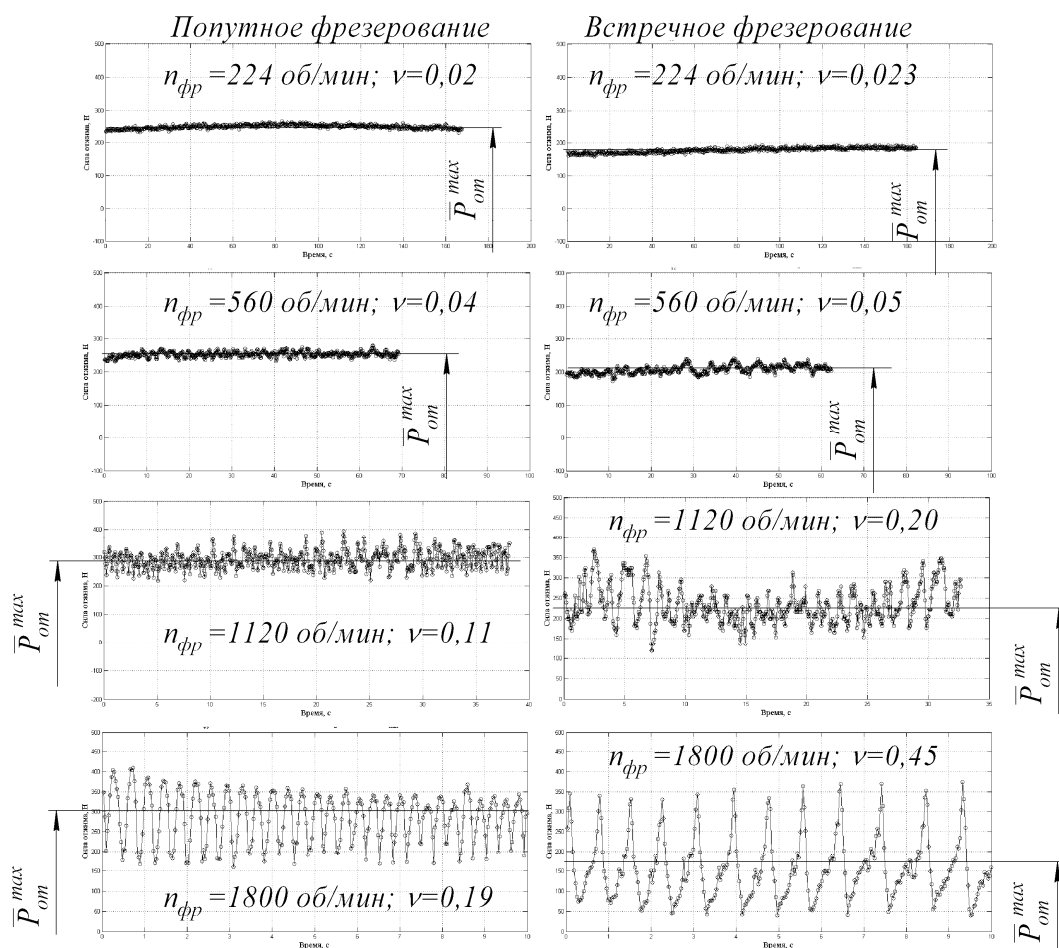


Рисунок 3 – Максимальные значения силы отжима $P_{от}^{max}$ мало жесткой детали при изменении скорости вращения фрезы $n_{фр}$ и направления подачи

Поэтому, говорить о существенном влиянии скорости вращения фрезы на средние значения сил отталкивания не имеет смысла. Значительнее важнее разобраться в причинах увеличения диапазона колебаний значений максимальных сил отжима детали с повышением скорости.

На рис. 3 приведены значения максимальных сил отжима для всех исследованных условий фрезерования. Каждая очередная точка показывает значение $P_{от}^{max}$ при срезании припуска следующим зубом фрезы. Коэффициент вариации ν , показывающий отношение среднеквадратичного отклонения колебаний $P_{от}^{max}$ к его среднему значению $\bar{P}_{от}^{max}$, позволяет судить об уровне колебательного процесса. Очевидно, что с увеличением скорости вращения фрезы $n_{фр}$ уровень колебаний УС детали увеличивается, причем при встречном фрезеровании это увеличение значительнее.

Рассмотрим подробнее графики изменения $P_{от}^{max}$ для встречного и попутного фрезерования при $n_{фр} = 1800$ об/мин. На рис. 4 приведены совместные по времени графики расположения точки врезания зуба фрезы в обрабатываемую поверхность – A , A_1 и т.д. (см. рис. 1б), которая совершает колебания относительно положения равновесия (линия ox) и значений максимальной силы отжима детали $P_{от}^{max}$ в момент резания очередным зубом фрезы. Точка касания A и точка максимальной силы отжима детали M (или A_1 и M_1) смещены относительно друг от друга на время $\tau_{рез}^{ex}$. Совмещение по времени графиков точки касания и максимальных сил отжима показывает их полную синхронность как для попутного, так и для встречного фрезерования. В связи с этим можно сделать вывод, что причиной появления колебания максимальной силы отжима детали, является изменение расположения точки касания зуба фрезы с обрабатываемой поверхностью, которая совершает колебания относительно положения ее равновесия. Причем, при контакте в точке максимального отклонения обрабатываемой поверхности к фрезе возникает наибольшее значение максимальной силы отжима и, наоборот, при максимальном отклонении обрабатываемой поверхности от фрезы, сила отжима имеет наименьшее значение.

Период колебаний силы отжима и количество точек врезания зуба фрезы за один период для встречного и попутного фрезерования различны. В табл. 2 приведены средние значения большого количества измерений числа точек врезания на нисходящей ветви колебания обрабатываемой поверхности (т.е. приближение к фрезе) и восходящей ветви (т.е. отдаления от фрезы) для встречного и попутного фрезерования.

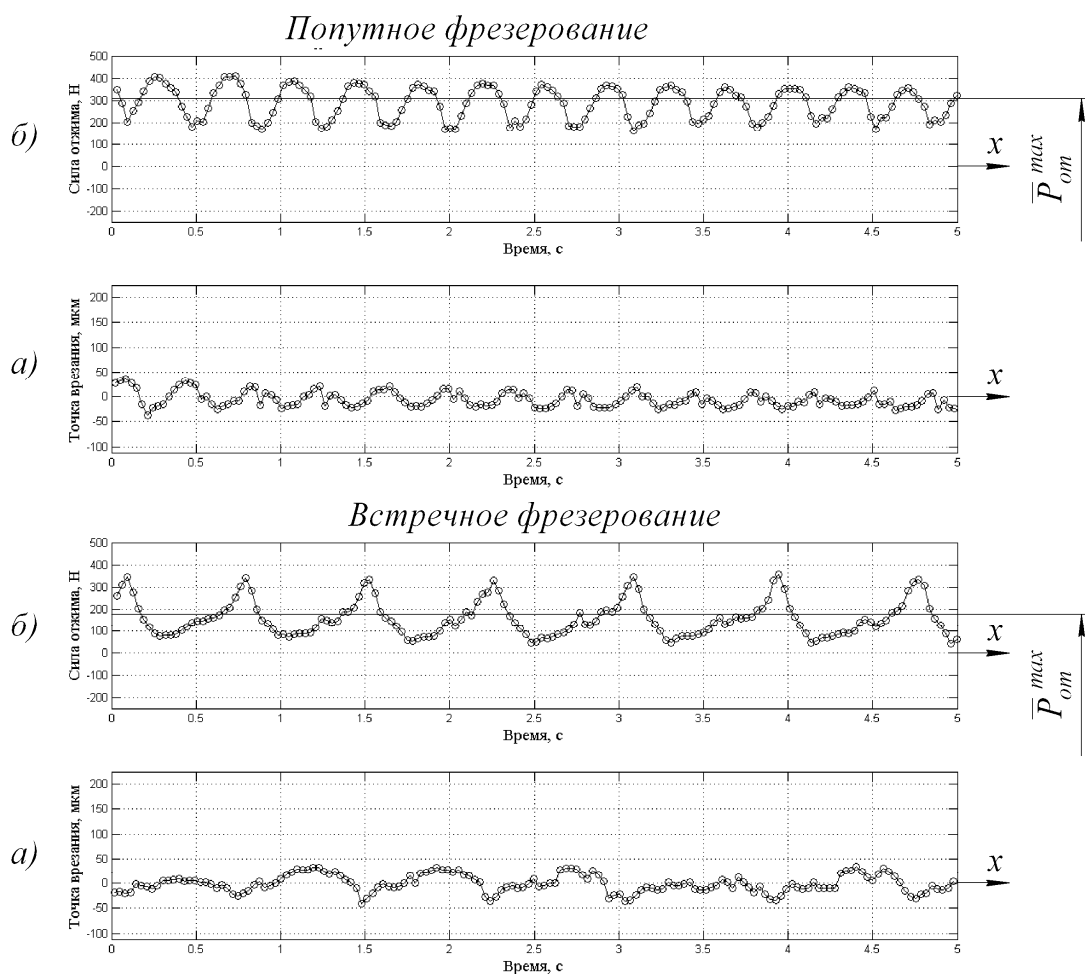


Рисунок 4 – Совмещенные по времени графики

- а) точка врезания зуба фрезы в обрабатываемую поверхность, которая совершает колебания относительно положения равновесия (ox); б) максимальная сила отжима детали $P_{от}^{max}$ в момент резания соседним зубом фрезы;
 ○ – одно врезание зуба фрезы.

Таблица 2

Направление фрезерования	Среднее число врезаний зуба фрезы за один период			Период колебаний, с	Время одного цикла фрезерования, $\tau_{ц.фр}$, с
	Нисходящая ветвь	Восходящая ветвь	Всего за один период		
Встречное	6,64	19,73	26,37	0,839	0,0318
Попутное	4,79	5,89	10,68	0,341	0,0319
Отношение	1,39	3,35	2,47	2,46	Разница 0,0001 с

Результаты измерений показывают, что количество врезаний зуба фрезы за один период колебаний силы отжима при встречном фрезерова-

нии почти в 2,5 раза больше, чем для попутного, причем для встречного фрезерования число точек касания фрезы на пути отдаления обрабатываемой поверхности от фрезы в 3,35 раза выше, чем для попутного.

Если период колебаний разделить на количество точек врезания за этот период, то получим время одного цикла фрезерования – $\tau_{ц.фр}$. Для встречного фрезерования $\tau_{ц.фр}^{встр} = 0,0318$ с, а для попутного $\tau_{ц.фр}^{поп} = 0,0319$ с. Разница во времени одного цикла фрезерования составляет $\Delta\tau_{ц.фр} = 0,1$ мс, что подтверждает высокую точность измерения, т.к. $\tau_{ц.фр} = \tau_{рез} + \tau_{х.х}$ и при одинаковых скоростях вращения фрезы – $n_{фр}$ не зависит от направления подачи.

В табл. 3 приведены результаты измерения по виброграммам всех составляющих времени в пределах одного цикла фрезерования. Видно, что время одного цикла не зависит от направления подачи (встречное или попутное фрезерование), и уменьшается с увеличением скорости вращения фрезы. Однако, при низких скоростях вращения фрезы ($n_{фр} = 224$ об/мин) соотношение времени повышения силы отжима до максимального значения $\tau_{рез}^{вх}$ и времени ее снижения до выхода зуба фрезы $\tau_{рез}^{вых}$ связано с направлением подачи. Если принять время резания $\tau_{рез}$ за 100%, то при встречном фрезеровании $\tau_{рез}^{вх}$ составляет 74,8 %, а $\tau_{рез}^{вых}$ – 25,2%. При попутном фрезеровании $\tau_{рез}^{вх}$ составляет 37,9 %, а $\tau_{рез}^{вых}$ – 62,1%. Таким образом при попутном фрезеровании время $\tau_{рез}^{вых}$ в 2,5 раза выше чем при встречном.

Таблица 3

Направление фрезерования	$n_{фр}$, об/мин	Время, мс					Время % $\tau_{рез}$		Время % $\tau_{ц.фр}$		$P_{восст}^{max}$, Н	$A_{восст}^{max}$, МКМ
		$\tau_{рез}$	$\tau_{рез}^{вх}$	$\tau_{рез}^{вых}$	$\tau_{х.х}$	$\tau_{ц.фр}$	$\tau_{рез}^{вх}$	$\tau_{рез}^{вых}$	$\tau_{рез}$	$\tau_{х.х}$		
Встречное	224	14,095	10,541	3,554	236,4	250,5	74,8	25,2	5,6	94,4	3,8	1,7
	1800	0,784	0,396	0,388	31,1	31,9	50,5	49,5	2,5	97,5	158,4	70,7
Попутное	224	14,328	5,432	8,896	236,2	250,5	37,9	62,1	5,7	94,3	6,5	2,9
	1800	0,732	0,434	0,348	31,0	31,8	55,5	44,5	2,5	97,5	230,9	103,1

Так как успокоение УС детали начинается после прохождения точки M , (т.е. после достижения силой отжима $P_{от}$ максимального значения), то увеличение времени $\tau_{рез}^{вых}$ приводит к сокращению времени успокоения $\tau_{вс}$ после выхода зуба из зацепления. Поэтому несмотря на то, что значение сил отжима $P_{от}^{max}$ при попутном фрезеровании выше, более благоприятные

условия выхода зуба фрезы из зацепления делают этот процесс достаточно виброустойчивым.

При увеличении скорости вращения до $n_{\phi p} = 1800$ об/мин направление подачи мало влияет на соотношение времен $\tau_{рез}^{6x}$ и $\tau_{рез}^{6yx}$. Они становятся примерно равными. Здесь важно отметить, что если время успокоения УС детали $\tau_{УС}$ меньше времени $\tau_{рез}^{6yx} + \tau_{x.x}$, то следующий зуб будет контактировать с поверхностью находящейся в равновесном положении, т.е. колебания отсутствуют. При скорости вращения $n_{\phi p} = 224$ об/мин для встречного фрезерования $\tau_{рез}^{6yx} + \tau_{x.x} = 239,95$ мс, а для попутного – $\tau_{рез}^{6yx} + \tau_{x.x} = 245,1$ мс. Видно этого времени хватает для успокоения УС детали и колебания силы $P_{от}^{max}$ незначительны (рис. 3). При $n_{\phi p} = 1800$ об/мин для встречного фрезерования мс, а для попутного $\tau_{рез}^{6yx} + \tau_{x.x} = 31,35$ мс, т.е. почти в 8 раз меньше, чем при $n_{\phi p} = 224$ об/мин. В этих случаях наблюдаются значительные колебания силы $P_{от}^{max}$. В табл. 3 приведены значения максимальной восстанавливающей силы $P_{восст}^{max}$, измеренной на первой волне колебания УС детали после выхода ее из зацепления с зубом фрезы. Видно, что при попутном фрезеровании не только максимальные силы отжима $P_{от}^{max}$ больше, но и силы упругости после выхода УС детали из зацепления также выше. При $n_{\phi p} = 1800$ об/мин они составляют соответственно для попутного фрезерования $P_{восст}^{max} = 230,9$ Н, а для встречного $P_{восст}^{max} = 158,4$ Н. Амплитуда первой волны свободных колебаний УС детали после входа ее из зацепления с деталью при попутном фрезеровании равна $A_{восст}^{max} = 103,1$ мкм, а при встречном $A_{восст}^{max} = 70,7$ мкм. Но если амплитуды первой волны отличаются в 1,46 раза, то при одинаковых характеристиках жесткости и демпфирования УС детали, место контакта следующего зуба с обрабатываемой поверхностью, совершающей свободные колебания, для попутного и встречного фрезерования будут отличаться, что, по видимому, и является причиной различной периодичности изменения $P_{от}^{max}$, приведенных на рис. 4.

Выводы:

1. При попутном цилиндрическом концевом фрезеровании уровень сил отжимающих маложесткую деталь от фрезы больше, чем при встречном, во всем диапазоне рассмотренных скоростей вращения фрезы.

2. С повышением скорости вращения фрезы средний уровень сил отжима изменяется не существенно, однако размах их колебаний увеличивается, причем для встречного фрезерования значительно больше, чем для попутного.

3. Впервые установлено, что причиной появления периодических колебаний силы отжима детали, является периодическое изменение расположения точки врезания зуба фрезы в обрабатываемую поверхность, которая совершает свободные колебания относительно положения ее равновесия, во время холостого хода зуба фрезы. Причем при контакте в точке максимального отклонения обрабатываемой поверхности к фрезе, возникает наибольшее значение максимальной силы отжима и, наоборот, при максимальном отклонении обрабатываемой поверхности от фрезы сила отжима имеет наименьшее значение.

4. Период колебаний силы отжима и количество точек врезания зуба фрезы за один период для встречного и попутного фрезерования значительно отличается. Для встречного фрезерования период колебаний и количество врезаний в 2,5 раза больше, чем для попутного, причем число точек врезания на пути отхода обрабатываемой поверхности от фрезы в 3,5 раза больше, чем для попутного.

5. Экспериментально установлено, что при высоких скоростях вращения фрезы ($n_{фр} = 1800$ об/мин) амплитуда первой волны свободных колебаний УС детали для попутного фрезерования почти в 1,5 раза выше, чем для встречного, поэтому при одинаковых характеристиках жесткости и демпфирования УС детали, расположение точки врезания с обрабатываемой поверхностью будут также различными.

6. Установлено, что колебания значений максимальной силы отжима $P_{от}^{max}$ возникают при условии, когда время успокоения упругой системы детали $\tau_{УС}$ больше, чем сумма времени выхода зуба фрезы из зацепления $\tau_{рез}^{вых}$ и времени холостого хода $\tau_{х.х}$. Таким образом, условие возникновения колебаний имеет вид $\tau_{УС} > \tau_{рез}^{вых} + \tau_{х.х}$.

Список использованных источников: 1. Внуков, Ю.Н. Стенд для изучения механических колебаний при фрезеровании мало жестких 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.