

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 3. Влияние скорости вращения кулачка при ударе мало- жесткой детали на формирование значений вынуждающей силы (силы отжима детали).

В статье представлены результаты экспериментального исследования ударного воздействия вращающимся кулачком на мало жесткую деталь. Показаны принципиальные различия ударного воздействия кулачком и зубом фрезы при фрезеровании. Исследовано влияние скорости вращения кулачка на вынужденные колебания мало жесткой детали. Изучено действие вязкоупругой демпфирующей среды на снижение амплитуды вынужденных колебаний мало жесткой детали.

В статті представлені результати експериментального дослідження ударної дії кулачком, що обертається, на маложорстку деталь. Показані принципи відмінності ударної дії кулачком та зубом фрези при фрезеруванні. Досліджено вплив швидкості обертання кулачка на змушені коливання маложорсткої деталі. Вивчена дія в'язко-пружної середовища на зменшення амплітуди змушених коливань маложорсткої деталі.

The article present experimental research results of impact action a rotating cam on flexible workpiece. Fundamental differences of impact action a rotating cam and mill tooth by milling are shown. Influence of rotational velocity of cam on forced oscillations of flexible workpiece is researched. Effect of viscoelastic damper to reduction amplitude of forced oscillation of flexible workpiece is studied.

В части 1 подробно описана методология изучения сил, возникающих при концевом цилиндрическом фрезеровании мало жестких деталей. В упругой системе детали рассматривают три вида сил: вынуждающую (составляющую силу резания R , отжимающую деталь – $P_{от}$), восстанавливающую (силу упругого восстановления детали – $P_{восст}$ в положение равновесия, после снятия действия силы отжима $P_{от}$) и силы трения $P_{тр}$, возникающей при свободных колебаниях детали во время восстановления ее в положение равновесия. Сила трения определяется только свойствами упругой системы (УС) детали и условиями диссипации энергии. Величина

восстанавливающих сил определяется как свойствами УС детали, так и условиями приложения вынуждающих сил.

В части 2 подробно описаны результаты влияния скорости вращения фрезы и направления подачи (встречное и попутное фрезерование) на формирование величины вынуждающей силы (силы отжима детали – $P_{от}$) и величины восстанавливающей силы (силы упругости – $P_{восст}$). Показано, что изменение скорости вращения фрезы и направление подачи принципиальным образом изменяют величину силы отжима. Причиной этого являются особенности врезания зуба фрезы в деталь, совершающей свободные затухающие колебания в период холостого хода между соседними врезаниями зуба фрезы. Величина восстанавливающей силы зависит от условий выхода зуба фрезы из зацепления, после достижения силой отталкивания ее максимального значения $P_{от}^{max}$.

Таким образом, при фрезеровании наблюдается сложное воздействие на обрабатываемую деталь зубом фрезы – удар со срезанием припуска. Принципиально важно рассмотреть условие формирования вынуждающих и восстанавливающих сил, если удар по УС маложесткой детали не будет сопровождаться срезанием припуска. В этом случае появляется возможность установить непосредственно влияние процесса резания на формирование вынуждающей силы. Условие удара без снятия припуска можно создать, если у фрезы вместо режущего зуба будет выступать шаровая поверхность, которая может обеспечить минимальную площадь контакта с обрабатываемой деталью. Другими словами, если режущий зуб заменить выступающей шаровой поверхностью, то фреза становится кулачком. Принципиальная схема методики исследования сил, возникающих при ударе кулачком, приведена на рис. 1. Для обеспечения формирования силы отжима детали – $P_{от}$, между кулачком и образцом создавался предварительный натяг – Δ (70 и 120 мкм, для разных серий экспериментов). Для каждой серии экспериментов, величина натяга была постоянной. Таким образом, направление силы отжима $P_{от}$ всегда было от кулачка. Направление восстанавливающей силы $P_{восст}$ всегда к оси детали, определяющее положение ее равновесия, и зависит от момента времени колебания пластины (т.е. по какую сторону от оси детали она отклонена). Сила трения $P_{тр}$ всегда направлена в противоположную сторону от направления действия восстанавливающей силы $P_{восст}$ в данный момент времени. Для изменения силы трения $P_{тр}$, гасящей колебания УС детали, предусмотрена возможность плотного контакта упругой пластины 3 с вязкоупругой средой (демпфером) 4.

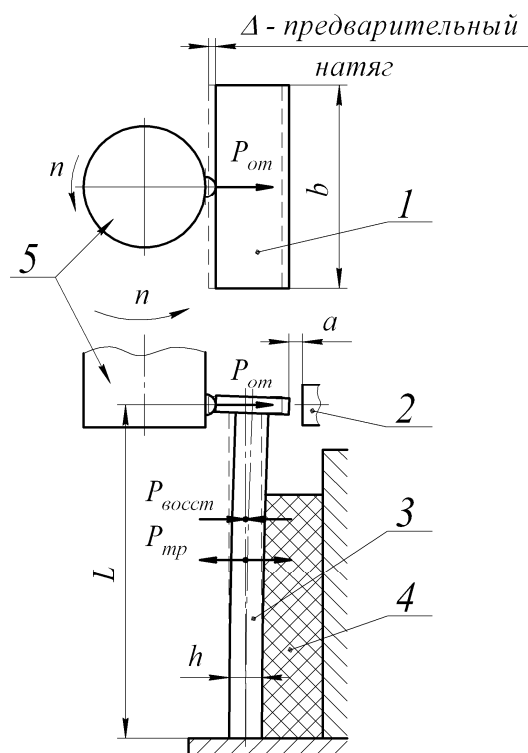


Рисунок 1 – Методика исследования сил, возникающих в УС малогабаритной детали при ударе кулачком

1. Образец из закаленной стали; 2. Индуктивный датчик; 3. Упругая пластина ($h \times b \times L$); 4. Вязкоупругая демпфирующая среда (демпфер); 5. Кулачок с шаровой поверхностью

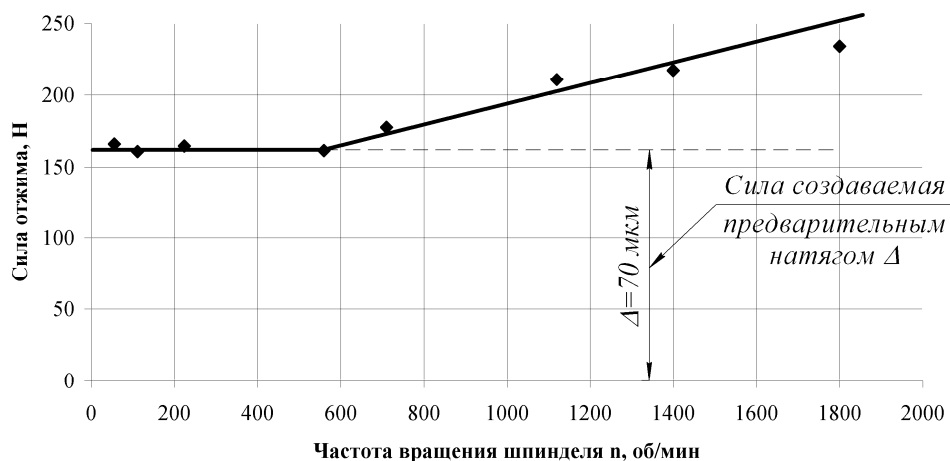


Рисунок 2 – Влияние скорости вращения кулачка на силу отжатия малогабаритной детали ($h = 8$ мм, $b = 60$ мм, $L = 80$ мм, вязкоупругая демпфирующая среда не применялась)

На рис. 2 показано влияние скорости вращения кулачка на величину отжимающей силы $P_{от}$ (демпфер не применялся). Видно, что до определенных скоростей вращения ($n = 560$ об/мин) кулачка, сила отжима мало

отличается от силы, создаваемой предварительным натягом, а при дальнейшем увеличении скорости вращения, сила отжима увеличивается пропорционально скорости. В нашем случае скорость вращения кулачка определяет время контакта кулачка с деталью, когда происходит ее отклонение от положения равновесия и время холостого хода в период между двумя соседними ударами, когда деталь совершает свободные затухающие колебания, стремясь снова занять положение равновесия. Таким образом, для каждой УС детали существуют такие условия ее возбуждения и успокоения, при которых влияние скорости вращения кулачка не будет оказывать существенное влияние на величину отжимающей силы. Если с повышением скорости время успокоения τ_{yvc} УС детали меньше времени холостого хода $\tau_{x.x}$, то наблюдается раскачивание УС, приводящее к увеличению силы ее отжима от положения равновесия. Подробно эти соотношения времен рассмотрены в Части 2 для случаев резания зубом фрезы.

На рис. 3 приведены значения сил отжима УС детали P_{om} (38-ми последовательных контактов) для условий попутного и встречного цилиндрического фрезерования однозубой фрезой (см. Часть 2) и ударом кулачком для одинаковых скоростей вращения ($n=1800$ об/мин) и одинаковых свойств УС детали (упругая пластина $h=8$ мм, $b=60$ мм, $L=80$ мм, вязкоупругая среда не применялась). Из рис. 3 видно, что условие возбуждения УС детали совершенно по-разному влияют на формирование величины силы отжима детали P_{om} . При резании зубом фрезы наблюдается периодичность изменения силы отжима P_{om} , причем количество ударов для одного периода колебаний значительно отличается и зависит от направления подачи (встречное или попутное фрезерование). При ударе кулачком колебаний значений P_{om} не наблюдается, несмотря на то, что УС детали может совершать значительные колебания во время холостого хода (см. рис. 4). Таким образом, приведенные результаты показывают, что формирование отжимающей силы P_{om} при резании зубом фрезы принципиально отличаются от формирования ее в результате удара кулачком. Отличие это заключается в том, что при резании во время контакта зуба фрезы со снимаемым припуском происходит зацепление инструмента с деталью, а при ударе кулачком происходит контакт без зацепления.

Итак, сила отжима формируется во время контакта зуба фрезы и кулачка, а во время холостого хода $\tau_{x.x}$ (т.е. между ударами) УС детали стремится вернуться в положение равновесия. Если упругую пластину поместить в вязкоупругую демпфирующую среду, которая резко сокращает вре-

мя успокоения УС детали, то можно экспериментально установить, как увеличение сил трения $P_{тр}$ влияет на изменение формирования силы отжима $P_{от}$.

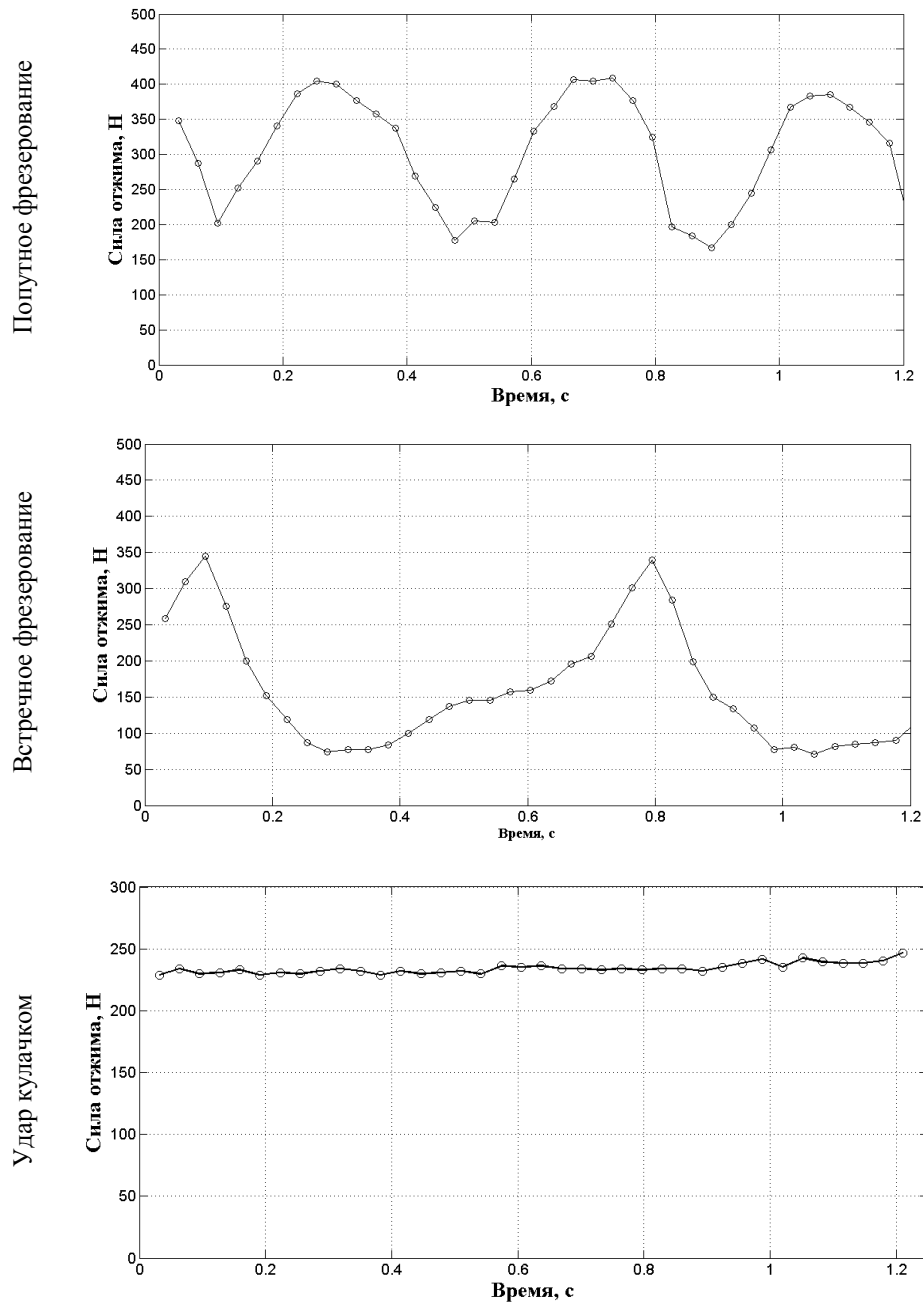


Рисунок 3 – Сила отжима детали $P_{от}$ во время срезания припуска одним зубом фрезы и ударом кулачком; \circ – один рез зубом или удар кулачка.

Условия испытаний: Фрезерование: $n = 1800$ об/мин; $t = 0,5$ мм; $S_z = 0,05$ мм/зуб.

Удар кулачком: $n = 1800$ об/мин; предварительный натяг $\Delta = 70$ мкм.

Выше установлено, что величина силы отжима при фрезеровании не постоянная и носит периодический характер, а при ударе кулачком она постоянная при любых скоростях его вращения. Поэтому, влияние изменения силы трения $P_{тр}$ в УС детали на формирование силы отжима $P_{от}$ изучали при ударе кулачком.

На рис. 4 приведены осциллограммы отклонения УС детали при ударе кулачком с разной скоростью. В первом случае (рис. 4а) рассматривали влияние скорости вращения кулачка на величину силы отжима $P_{от}$ и силы упругости $P_{восст}$ для УС детали (упругая пластина $h = 4$ мм, $b = 60$ мм, $L = 80$ мм, предварительный натяг $\Delta = 80$ мкм), демпфирование колебаний не применялось, а для второго случая (рис. 4б, упругая пластина $h = 4$ мм, $b = 60$ мм, $L = 80$ мм, предварительный натяг $\Delta = 120$ мкм) демпфирование применялось.

На осциллограммах можно видеть отсутствие колебаний величины силы отжима $P_{от}$ при всех значениях скоростей вращения кулачка, как в условиях использования демпфирующей среды, так и без нее. Результаты измерений (рис. 5) показывают, что до определенной скорости вращения кулачка сила отжатия мало отличается от сил, создаваемых предварительным натягом, как в условиях применения демпфера, так и без него. Однако при повышении скорости вращения до $n = 1800$ об/мин наблюдается резкое повышение сил отжима $P_{от}$ для УС детали без вязкоупругой демпфирующей среды и значительно меньшее их повышение при использовании демпфера. Различие в значениях сил отжима достигало более 3-х раз. Полученные результаты однозначно показывают, что введение демпфирующих сред, находящихся в контакте с маложесткой деталью, позволяют многократно снизить уровень сил отжатия детали при высоких скоростях вращения кулачка.

Но так как уровень вынуждающих сил определяет уровень восстанавливающих сил, то логично предположить, что при снижении вынуждающей силы будет снижаться и восстанавливающая сила упругости, вызывающая раскачивание УС детали во время ее успокоения. Таким образом, чем меньше восстанавливающая сила, тем быстрее УС детали займет положение равновесия. На рис. 6 показана величина восстанавливающей силы $P_{восст}$, измеренная по осциллограммам (рис. 4), как амплитуда первой полуволны свободных колебаний УС детали. При скорости вращения ку-

лачка $n = 1800$ об/мин введение демпфера более чем в 3 раза снижает восстанавливающую силу $P_{восст}$.

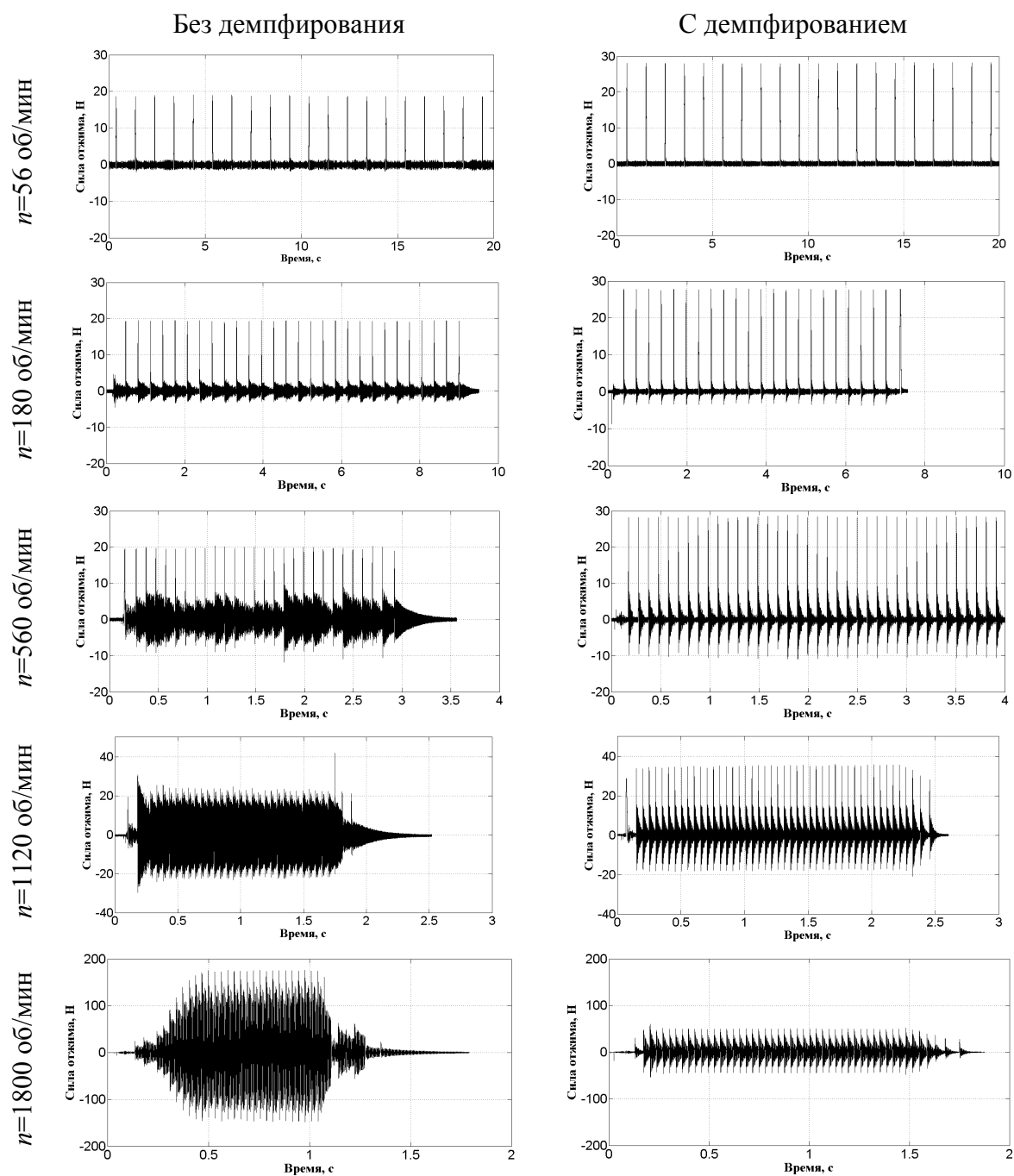


Рисунок 4 – Осциллограммы отклонения УС детали при различных скоростях вращения кулачка и условиях демпфирования

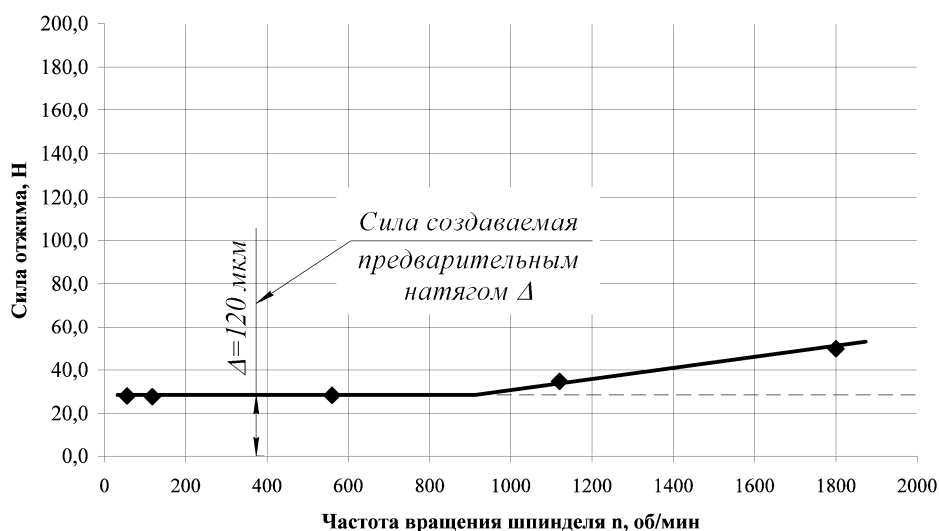
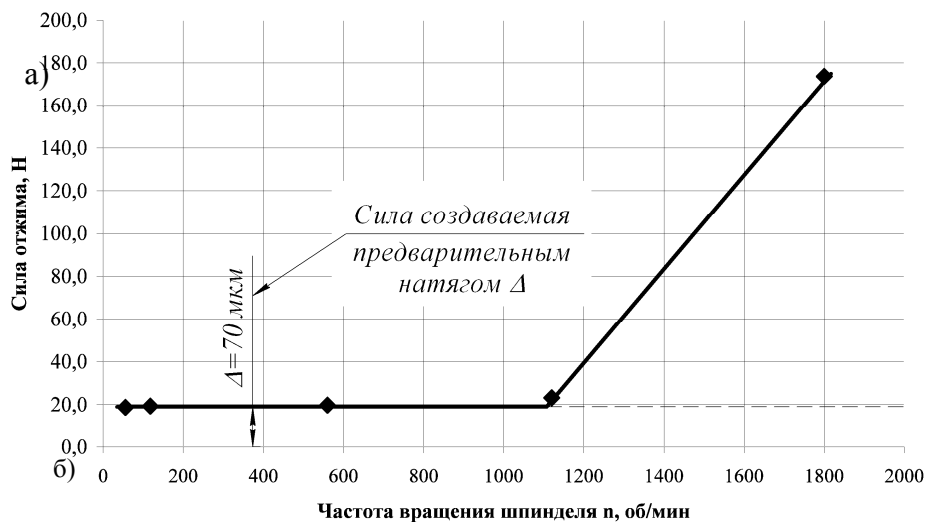


Рисунок 5 – Влияние скорости вращения кулачка на силу отжима малоожесткой детали ($h = 4 \text{ мм}$, $b = 60 \text{ мм}$, $L = 80 \text{ мм}$)
а) Без демпфера; б) С демпфером

Хорошо известно, что введение демпферов служит для увеличения сил трения в колебательной УС. На рис. 7 приведены осциллограммы свободных затухающих колебаний упругой пластины ($h = 4 \text{ мм}$, $b = 60 \text{ мм}$, $L = 80 \text{ мм}$) без демпфера и с демпфером, позволяющие рассчитать декремент затухания. Расчеты показывают, что с применением демпфера логарифмический декремент затухания увеличился в 2,9 раз, но частота свободных колебаний УС меняется незначительно – с 279 Гц для пластины с демпфером до 284 Гц для пластины без демпфера.

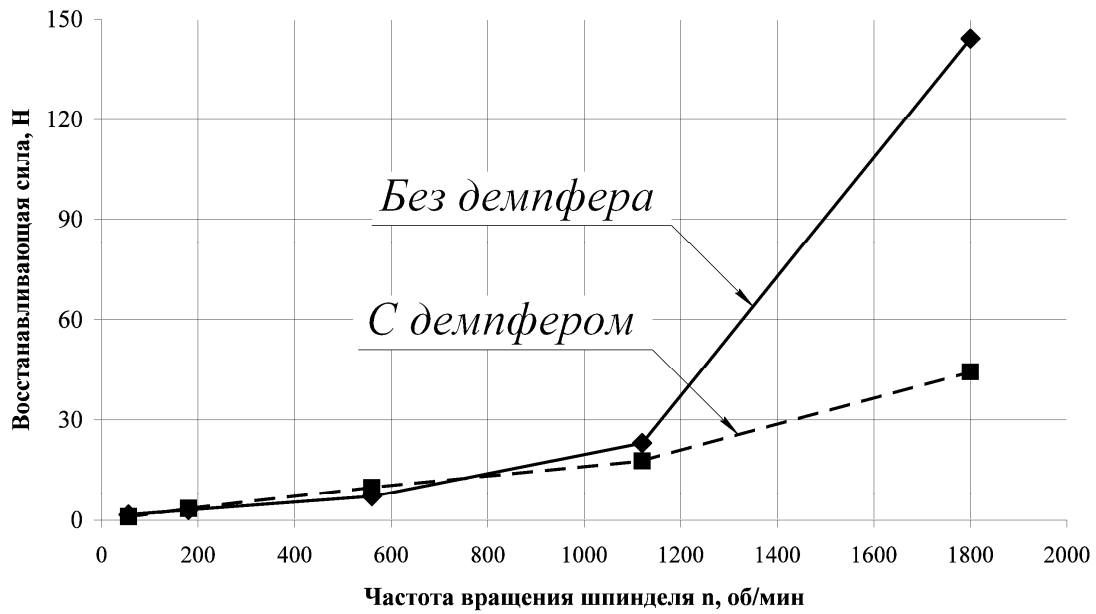
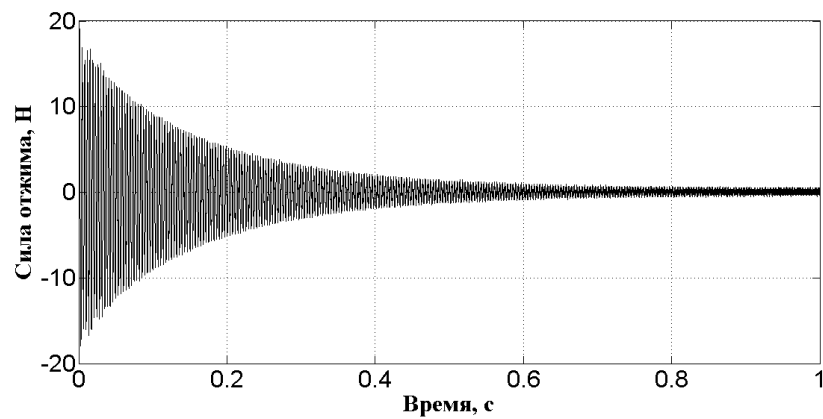


Рисунок 6 – Влияние скорости вращения кулачка на уровень восстанавливающих сил

а) Без демпфера.

Декремент $\delta = 0,0212$



б) С демпфером.

Декремент $\delta = 0,0615$

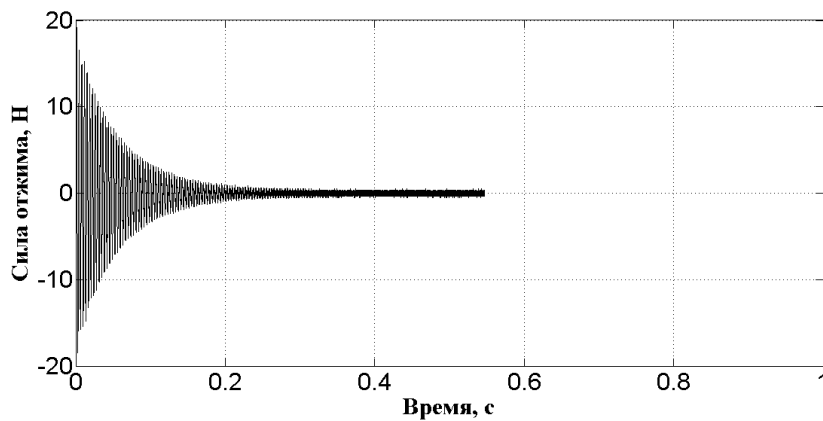


Рисунок 7 – Влияние введения вязкоупругой демпфирующей среды на логарифмический декремент затухания свободных колебаний

Повышение сил трения для успокоения колебательных систем находит широкое применение в практике. Поэтому, в нашем случае применение вязкоупругих сред, демпфирующих колебания и значительно уменьшающих величину силы ее отжима P_{om} , которая является вынуждающей силой для возбуждения колебаний, может быть эффективно использовано и при фрезерной обработке мало жестких деталей.

Выводы:

1. Если УС детали статически отклонить от положения равновесия (создать предварительный натяг силой P_{om}), то с повышением скорости вращения кулачка изменение величины силы отжима УС детали имеет определенную закономерность. При низких скоростях сила отжима практически не отличается от значений предварительного натяга, но при достижении определенного ее значения сила отжима начинает увеличиваться пропорционально увеличению скорости.

2. При ударе кулачком сила отжима детали имеет постоянную величину для каждого удара, в отличии от резания зубом фрезы, где каждый рез вызывает колебания величины силы отжима с определенным периодом, зависящим от направления подачи (встречное или попутное фрезерование). Это связано с различными условиями контактирования кулачка и зуба фрезы. В первом случае это упругий удар, во втором – удар с зацеплением во время снятия припуска.

3. Установленное постоянство величины отклоняющей силы для каждой скорости вращения кулачка, позволяет значительно точнее изучать влияние изменения сил трения в УС мало жесткой детали на величину вынуждающей и восстанавливающих сил.

4. Экспериментально показано, что введение дополнительной вязкоупругой среды (демпфера) в контакт с УС мало жесткой детали, позволяет значительно, более 3-х раз, снизить уровень вынуждающих и восстанавливающих сил при высоких скоростях вращения кулачка.