

На рис. 4 видно, что с ростом амплитуды и частоты вибраций увеличиваются остаточные напряжения сжатия. Наибольший эффект наблюдается при введении в зону резания вынужденных ультразвуковых колебаний с частотой $35 \cdot 10^3$ Гц и амплитудой 3...5 мкм. Следовательно, циклический характер взаимодействия обрабатываемой поверхности с задней поверхностью инструмента при точении в условиях вибраций значительно повышает интенсивность уплотнения материала, в результате чего остаточные напряжения сжатия увеличиваются пропорционально амплитуде и частоте вибраций.

Образование в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений увеличивает ресурс деталей двигателей летательных аппаратов. Следовательно, рациональное применение вынужденных колебаний и управление автоколебаниями при обработке деталей позволяет получать повышенные эксплуатационные характеристики изделий, как это имеет место после специальных упрочняющих операций. Однако преимуществом применения обработки резанием с вибрациями является совмещение упрочнения с процессом формообразования поверхностей.

Л и т е р а т у р а

1. Сулима А.М., Евстигнеев М.М. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов. - М.: Машиностроение, 1974.
2. Кузнецов Н.Д. Влияние свойств материалов и технологии изготовления на конструкционную прочность. - В кн.: Проблемы прочности, - Киев: Изд. АН УССР, 1971, № 7.
3. Прилук И.В.А. Технологические методы снижения волнистости поверхности. - М.: Машиностроение, 1978.
4. Авдонин Г.Т. Исследование технологических особенностей чистового точения при наличии автоколебаний: Автореф. дисс. канд. техн. наук. - Курьбышев: КИТИ, 1983.

УДК 621.992.4.001.24:669.017.25

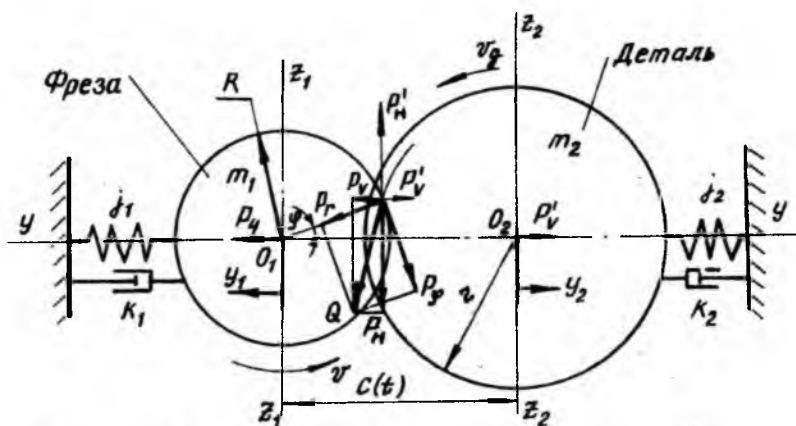
И.В. Михайлов

ДИНАМИКА БРЕЗЕРОВАНИЯ НАРУЖНЫХ УПОРНЫХ РЕЗЬБ
НА ДЕТАЛЯХ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Технико-экономические показатели обработки наружных упорных резьб больших диаметров (свыше 200 мм) можно повысить путем замены операции

многопроходного точения однопроходным фрезерованием инструментом, оснащенным металлокерамикой. Однако в связи с малой изученностью динамических явлений возникают определенные трудности с назначением режимов резбощерования, обеспечивающих необходимое качество резб и стойкость режущих инструментов.

Многомассовую технологическую систему резбощерования с большим числом степеней свободы можно с известной степенью приближения представить в виде двухмассовой системы с двумя степенями свободы в направлении $Y-Y$ (рис.1). Связь парциальных систем детали и фрезы в единой замкнутой упругой системе осуществляется через зону резания.



Р и с. 1. Расчетная схема резбощерования.

Подобное упрощение возможно на основе результатов анализа упругих свойств элементов системы. Жесткость систем детали и фрезы в осевом направлении на порядок выше, чем в плоскости YOZ . Деформация в направлениях $Z-Z$ и крутильные деформации парциальных систем оказывают на изменение вынуждающей силы резания меньшее влияние, чем деформации в направлении $Y-Y$. В связи с этим перемещения в указанных направлениях можно пренебречь.

Известно, что при многолезвийной обработке наличие следов на обработанной поверхности, оставленных предыдущим зубом, создает дополнительную связь с запаздыванием [1]. Тогда замкнутая эквивалентная динамическая система резбощерования может рассматриваться как двухконтурная со звеном запаздывания (рис.2).

На основе принципа Даламбера система уравнений, описывающих движение осей O_1 и O_2 по направлению $Y-Y$ имеет вид:

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2 y_1(t)}{dt^2} + K_1 \frac{dy_1(t)}{dt} + j_1 y_1(t) = P_y(t) \\ m_2 \frac{d^2 y_2(t)}{dt^2} + K_2 \frac{dy_2(t)}{dt} + j_2 y_2(t) = P_y(t) \end{cases}$$

где m_1, m_2 - приведенные массы звеньев системы; K_1, K_2 - коэффициенты сопротивления; j_1, j_2 - жесткость звеньев системы по координатной оси Y .

Из схемы (см. рис. 1) следует, что

$$P_y(t) = P_r(\varphi) \cos \varphi(t) - P_\varphi(\varphi) \sin \varphi(t),$$

где $\varphi(t) = \omega(t)$ - угол поворота фрезы.

В работе [2] показана возможность описания закона изменения окружной силы P_φ выражением

$$P_\varphi = a_{z\varphi} C_{nn} (C_3 - C_4 R_\varphi) + C_{3n} (C_5 - C_6 R_\varphi), \quad (2)$$

где $a_{z\varphi}$ - толщина среза по вершине зуба фрезы;

$$C_3 = R(\operatorname{tg} \beta + \operatorname{tg} \gamma) - e_\beta \operatorname{tg} \beta - e_\gamma \operatorname{tg} \gamma + C'_\beta;$$

$$C_4 = \operatorname{tg} \beta + \operatorname{tg} \gamma; \quad C_5 = (R - e_\beta) \operatorname{csc} \beta + (R - e_\gamma) \operatorname{csc} \gamma + C''_\beta;$$

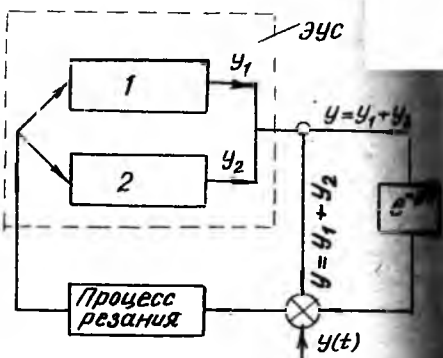
$$C_6 = \frac{(\cos \beta + \cos \gamma)}{\cos \beta \cos \gamma}; \quad R_\varphi = f[R, d, \varphi(t)].$$

Здесь C_{nn}, C_{3n} - коэффициенты, зависящие от условий обработки;

R - радиус инструмента; β, γ - углы наклона прямолинейных боковых образующих профиля резьбы; e_β, e_γ - постоянные, зависящие от β, γ, P ; P - шаг резьбы; C'_β, C''_β - коэффициенты, зависящие от P .

Изменение радиальной составляющей можно представить зависимостью

$$P_r = P_\varphi \left[A + B \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\varphi + a}{a + b} \right) \right], \quad (3)$$



Р и с. 2. Схема замкнутой эквивалентной динамической системы

где A, B, a, b - постоянные, зависящие от условий процесса формирования.

В работах [1], [3] показано, что основным фактором, влияющим на периодическое изменение силы резания при автоколебаниях, является изменимость сечения среза при относительных перемещениях инструмента и обрабатываемого изделия. С учетом этого и приняв во внимание наличие сдвига следов обработки во времени, на основании уравнений (2), (3) можно записать:

$$P_{\varphi}(y) = \left\{ \begin{array}{l} C_{nn} [a_{z\varphi}(t) - \Delta a_{z\varphi}(t) + \Delta a_{z\varphi}(t-T) + \Delta a_{z\varphi}^{\varepsilon}(t)] \{ C_3 - \\ - C_4 [R_{\varphi}(t) - \Delta R_{\varphi}(t) + \Delta R_{\varphi}(t-T) + \Delta R_{\varphi}^{\varepsilon}(t)] \} + \\ + C_{3n} \{ C_5 - C_6 [R_{\varphi}(t) - \Delta R_{\varphi}(t) + \Delta R_{\varphi}(t-T) + \Delta R_{\varphi}^{\varepsilon}(t)] \} \\ \text{при } R_{\varphi}(t) - \Delta R_{\varphi}(t) + \Delta R_{\varphi}(t-T) + \Delta R_{\varphi}^{\varepsilon}(t) > R - h_1; \\ a_{z\varphi}(t) - \Delta a_{z\varphi}(t) + \Delta a_{z\varphi}(t-T) + \Delta a_{z\varphi}^{\varepsilon}(t) > 0; \\ 0 \text{ при } R_{\varphi}(t) - \Delta R_{\varphi}(t) + \Delta R_{\varphi}(t-T) + \Delta R_{\varphi}^{\varepsilon}(t) \geq R; \\ a_{z\varphi}(t) - \Delta a_{z\varphi}(t) + \Delta a_{z\varphi}(t-T) + \Delta a_{z\varphi}^{\varepsilon}(t) \leq 0. \end{array} \right. \quad (4)$$

$$P_r(y) = \left\{ \begin{array}{l} [A + B \lg^2 \left(\frac{a+y}{a+b} \right)] \{ C_{nn} [a_{z\varphi}(t) - \Delta a_{z\varphi}(t) + \Delta a_{z\varphi}(t-T) + \\ + \Delta a_{z\varphi}^{\varepsilon}(t)] \{ C_3 - C_4 [R_{\varphi}(t) - \Delta R_{\varphi}(t) + \Delta R_{\varphi}(t-T) + \\ + \Delta R_{\varphi}^{\varepsilon}(t)] \} + C_{3n} \{ C_5 - C_6 [R_{\varphi}(t) - \Delta R_{\varphi}(t) + \Delta R_{\varphi}(t) + \\ + \Delta R_{\varphi}^{\varepsilon}(t)] \} \} \\ \text{при } R_{\varphi}(t) - \Delta R_{\varphi}(t) + \Delta R_{\varphi}(t-T) + \Delta R_{\varphi}^{\varepsilon}(t) > R - h_1; \\ a_{z\varphi}(t) - \Delta a_{z\varphi}(t) + \Delta a_{z\varphi}(t-T) + \Delta a_{z\varphi}^{\varepsilon}(t) > 0; \\ 0 \text{ при } R_{\varphi}(t) - \Delta R_{\varphi}(t) + \Delta R_{\varphi}(t-T) + \Delta R_{\varphi}^{\varepsilon}(t) \geq R; \\ a_{z\varphi}(t) - \Delta a_{z\varphi}(t) + \Delta a_{z\varphi}(t-T) + \Delta a_{z\varphi}^{\varepsilon}(t) \leq 0. \end{array} \right. \quad (5)$$

В выражениях (4), (5) имеем:

$$a_{z\varphi}(t) = \frac{C(t)}{z} S_z \sin \varphi(t); R_{\varphi}(t) = \sqrt{C^2(t) + z^2 - 2zC(t) \left[\frac{R_0 \operatorname{tg} \varphi}{z} \right]},$$

где C - межцентровое расстояние; S_z - подача на зуб; z - наружный радиус резьбы; $R_0 = C - z$.

Изменение толщины среза по вершине зуба вследствие упругих от-
тий

$$\Delta a_{z\varphi}(t) = (y_1 + y_2)(t) \cos \varphi(t); \Delta a_{z\varphi}(t-T) = (y_1 + y_2)(t-T) \cos \varphi(t)$$

при $0 \leq \varphi \leq \varphi_0$. Величины изменения радиуса вычислялись аналогично:

$$\Delta R_{\varphi}(t) = (y_1 + y_2)(t) \cos \varphi(t); \Delta R_{\varphi}(t-T) = (y_1 + y_2)(t-T) \cos \varphi(t).$$

Время запаздывания $T = 60n/z$, где n - число оборотов фрезы в минуту, z - число зубьев фрезы.

Изменение толщины среза за счет биения зубьев фрезы

$$\Delta a_{z\varphi}^{\varepsilon}(t) = \frac{\delta}{z} \sin \varphi(t),$$

где δ - величина радиального биения зубьев фрезы. Аналогично

$$\Delta R_{\varphi}^{\varepsilon}(t) = \frac{\delta}{z} \sin \varphi(t).$$

При выводе уравнений системы (I) сделаны следующие допущения:

а) угловые скорости вращения фрезы и детали постоянны, скоростью вращения детали по сравнению со скоростью вращения фрезы можно пренебречь ($\omega_u = 0$); б) силы резания вследствие упругих деформаций технологической системы зависят только от изменения настройки; в) величина отставания изменения силы резания от изменения сечения среза мала. Его можно пренебречь при обработке закаленных материалов с мартенситной структурой [4]; г) угол поворота фрезы φ отсчитывается от линии, соединяющей оси вращения детали и фрезы.

Полученная в виде системы (I) математическая модель колебательного процесса резбозерезования представляет систему дифференциально-разностных уравнений с переменными коэффициентами. Определение области устойчивости для подобных нестационарных систем сопряжено с определенными трудностями из-за невозможности использования частотных критериев. Наиболее надежным способом проверки устойчивости таких систем является их решение с помощью АВМ или ЭЦВМ.

При подготовке данных для решения системы на ЭЦВМ расчет приведенных масс m_1, m_2 звеньев системы производился известными методами. Коэффициенты жесткости j_1, j_2 определялись по диаграммам перемещений звеньев технологической системы при ее статическом нагружении.

Коэффициенты сопротивления K_1 и K_2 зависят от целого ряда факторов: внутреннего трения в материале оправок фрезы и детали; трения на контактных поверхностях режущего инструмента; внутреннего трения в пластической зоне резания; конструкционного трения в опорах и стыках. Величины K_1 и K_2 рассчитывались по результатам эксперимента как

$$K_1 = \frac{2m_1 \lambda_1}{T_1}, \quad K_2 = \frac{2m_2 \lambda_2}{T_2},$$

где λ_1, λ_2 - декременты колебаний звеньев технологической системы; T_1, T_2 - периоды собственных затухающих колебаний звеньев. Наряду с λ определились коэффициенты рассеяния энергии $\xi = 1 - e^{-2\lambda}$.

В таблице приведены показатели, характеризующие диссипативные свойства элементов резьбофрезерной установки, смонтированной на станке ИК62. Эти показатели определены по результатам осциллографических исследований в режиме холостого хода установки.

Диссипативные свойства звеньев системы

Звено системы СПИД	Жесткость, МН/м	Декремент колебаний, λ	Коэффициент рассеяния энергии, ξ	f_c , Гц
Оправка с фрезой	30	0,52	0,65	720
"	10	0,48	0,61	690
"	5	0,40	0,55	650
"	31	0,45	0,59	315

В режиме резания λ и ξ находились в пределах:
 для оправки $\lambda_1 = 1,9-2,1$; $\xi_1 = 0,98-0,985$,
 для детали $\lambda_2 = 1,8-1,9$; $\xi_2 = 0,97-0,98$.

Величины коэффициентов сопротивления составляли соответственно $K_1 = 6,4-7,04 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{мм}$; $K_2 = 35-37 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{мм}$. Большие значения коэффициентов соответствуют большей жесткости оправки. Высокий уровень демпфирования в рабочем режиме может быть вызван следующими причинами:

а) высоким уровнем сил трения на задних поверхностях режущего инструмента на начальном участке контакта с изделием. При малых углах φ суммарная длина рабочего участка режущего лезвия наибольшая, а толщины срезов минимальны. Это вызывает повышенные давления

и высокий суммарный уровень сил трения на задних поверхностях инструмента;

б) результирующее движение оправки, фрезы, складывающееся из движений в координатных направлениях Y и Z , при наличии угла подъема винтовой линии вызывает дополнительные силы демпфирования от внедрения боковых задних поверхностей инструмента в обработанную поверхность;

в) на передней поверхности инструмента в процессе резания могут возникнуть значительные силы трения, обусловленные сравнительно большими толщинами срезов при больших φ . Эти силы, наряду с рассеянием энергии в пластической зоне, также способствуют повышению демпфирования в процессе резбоформирования.

Высокие уровни диссипации энергии и значений рабочих коэффициентов жесткости элементов технологической системы, малые величины возмущающего усилия P_v в рабочем диапазоне режимов резания дали основание предположить наличие аperiodического движения звеньев системы. Для проверки выдвинутого предположения было проведено решение системы (I) на ЭВМ ЕС-1022 для условий: резьба SpUp 350х6; $D = 100$ мм; $z = 4$; $\Delta = 0,02$ мм; $k_1 = 30$ Мн/м; $k_2 = 20$ Мн/м; $K_1 = 6$ Н·с/мм; $K_2 = 30$ Н·с/мм; $S_z = 0,29$ мм/зуб; $v = 2,3$ м/с; обрабатываемый материал - сталь 30ХГСА (HRC 34...38).

Анализ результатов решения уравнений показал отсутствие высокочастотных составляющих при перемещении звеньев системы, характерных для автоколебательных процессов. Экспериментальные исследования перемещений звеньев в направлении $Y-Y$ подтвердили наличие вынужденных колебаний звеньев с частотой вращения зубьев фрезы. Только при снижении жесткости оправки фрезы с 30 до 50 Мн/м зафиксировано наличие гармоник с частотой $f \approx 650$ Гц. Но и в этом случае максимальные значения амплитуд высокочастотной составляющей в 20-30 раз меньше пиковых значений отжатий оправки с частотой врезания зубьев и составляют 3-4 мкм. Увеличение числа зубьев фрезы до $z = 12$ и скорости резания до 3,3 м/с не привели к изменению динамических явлений.

На основании вышесказанного можно констатировать, что фрезерование упорных резб на деталях из закаленной стали 30ХГСА является в принятых условиях обработки динамически устойчивым процессом. Параметры траекторий движения звеньев рассматриваемой динамической системы определяются, в основном, их упругими характеристиками и силовыми факторами резбофрезерования. Это дает основание представить виброперемещение элементов технологической системы как упругое под действием сил резания.

Л и т е р а т у р а

1. К у д и н о в В.А. Динамика станков.-М.: Машгиз, 1967.
2. Ж а р к о в И.Г., М и х а й л о в А.В. Исследование сил при скоростном фрезеровании упорных резьб на высокопрочных материалах.- В сб.: Прогрессивные технологические процессы образования резьбовых соединений.-Саратов:Саратов.книжн.изд-во, 1980.
3. П о д у р а е в В.Н. Обработка резанием с вибрациями.-М.:Машиностроение, 1970.
4. А в д о н и н Г.Т., Б у р м и с т р о в Е.В., М а р к у ш и н Е.М. Роль отстаивания силы резания от изменения толщины среза в возбуждении вибраций при обработке резанием.-В кн.:Динамика станков: Тез.докл.Всесоюз.конф.-Куйбышев:КуАИ, 1980.

УДК 621.9.06

А.П.К о т е л ь н и к о в

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ НА ПЛОТНОСТЬ ПЛОСКОГО СТЫКА

Методы и режимы обработки оказывают существенное влияние на качественное изменение качественных характеристик поверхностного слоя детали в процессе ее приработки.

С этими характеристиками связана величина плотности стыка, под которой понимают отношение [1]

$$|\Lambda| = \left| \frac{V_M}{V_M + V_3} \right|,$$

где V_M - объем металла в стыке; V_3 - объем зазора стыка.

Плотность стыка оказывает влияние на герметичность, электропроводность, теплопроводность и другие параметры зоны контакта.

Исследование плотности проводилось применительно к плоскому стыку насоса, в котором уплотнительное кольцо из бронзы БрАЖ9-4 (с размерами 88x80x3 мм прижато с усилием 80Н к неподвижной закаленной (НРС 45, $R_a = 0,32$ мкм) буксе и вращается со скоростью 5 м/с в условиях масляной смазки (рис.1). Эксперименты проводились на стенде, имитирующем работу плоского стыка насоса.

Процесс приработки исследовался на 6-ти сериях точных и выглаженных алмазным наконечником колец, по 6 колец в каждой серии. Исходные значения средних арифметических отклонений профиля точных