

Моделирование динамики процесса механической обработки с учетом взаимодействия упругой и тепловой систем станка

к.т.н. С. П. Никитин

Интенсификация режимов работы современного технологического оборудования и использование новых конструкционных материалов приводят к тому, что тепловые процессы и температурные поля в элементах конструкции становятся одними из главных факторов, ограничивающих производительность обработки и оказывающих существенное влияние на качество и точность изделий. Поэтому весьма важно научиться управлять тепловыми процессами при механической обработке.

Наряду с тепловыми процессами при интенсификации работы технологического оборудования, в частности металлорежущих станков, возрастает значение динамических процессов и их взаимодействия с тепловыми процессами. До настоящего времени тепловые и динамические процессы исследовали отдельно, но постоянные времени этих процессов в зоне резания близки, и при предельных режимах резания их взаимодействие существенно влияет на качество обработки. Поэтому поведение

технологического оборудования при резании можно предсказать только с учетом комплексного воздействия тепловых и динамических процессов.

Для обеспечения высоких показателей обработки необходимо надлежащее управление всеми процессами, протекающими в станке. При этом следует учитывать взаимодействие тепловой и упругой систем станка, а также процесса резания. Описать тепловые и динамические процессы можно с помощью математического моделирования.

В данной работе предлагаются математическая модель и методика расчета тепловых, динамических и рабочих процессов при лезвийной обработке, причем эти процессы рассматриваются как комплексная термодинамическая система. Для построения математической модели использован метод электрической аналогии [1].

Процесс резания является одним из передаточных звеньев динамической системы станка [2]. Он оказывает определяющее влияние на динамические характеристики и виброустойчивость динамической системы. Математические модели для описания процесса резания достаточно разработаны [2–4]; вид и сложность модели зависят от решаемой задачи. Для описания процесса резания используют статическую модель, аperiodическое звено, дифференцирующее звено, полную линейную математическую модель и т. д.

Динамические характеристики процесса резания и связь его с другими звеньями динамической системы станка определяются геометрическими параметрами срезаемого слоя (рис. 1), измеряемыми в системе координат $X'Y'Z'$, расположение которой относительно основной системы XYZ зависит от главного угла ϕ в плане режущего инструмента

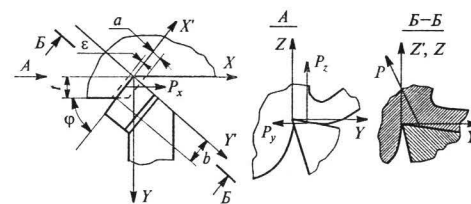


Рис. 1. Геометрические параметры срезаемого слоя (P_x , P_y , P_z — составляющие силы P резания; t — глубина резания; ϕ — главный угол инструмента в плане; ϵ — изменение толщины срезаемого слоя вследствие относительных колебаний инструмента и заготовки; остальные обозначения см. в тексте)

(РИ) (в дальнейшем будем опускать штрихи в обозначениях координат параметров по соответствующим осям, являющихся переменными модели).

Процесс резания является замыкающим звеном динамической системы и образует с упругой системой станка замкнутую систему. Кроме того, через процесс резания осуществляется взаимодействие между разными подсистемами станка: упругой несущей подсистемой, упругой подсистемой привода главного движения и упругой подсистемой привода подачи. При исследовании этих взаимодействий процесс резания рассматривают в виде полной линейной модели [3]:

$$P + T_p \dot{P} = k_{P_x} x + h_{P_x} \dot{x} + k_{P_y} y + h_{P_y} \dot{y} + h_{P_z} \dot{z}, \quad (1)$$

где P — сила резания; T_p — постоянная времени резания (стружкообразования); k_{P_x} и k_{P_y} — коэффициенты резания по осям X' и Y' (см. рис. 1); h_{P_x} , h_{P_y} и h_{P_z} — коэффициенты демпфирования по осям X' , Y' и Z' ; x , y и z — изменение координат вершины РИ в системе $X'Y'Z'$.

Модель (1) учитывает жесткость и демпфирование по координатам X' и Y' , определяющие толщину a и ширину b срезаемого слоя материала (см. рис. 1); по координате Z' учитывается только демпфирование. В левой части уравнения (1) с помощью постоянной времени T_p стружкообразования отражена инерционность процесса резания.

Если представить несущую подсистему токарного станка в виде упругости в направлении оси Y' , подсистему главного привода и подсистему привода подачи в виде упругостей по осям Z' и X' соответственно, то эквивалентная схема динамической системы, отражающая взаимодействие подсистем через полную линейную модель процесса резания, будет иметь вид, показанный на рис. 2.

Элементы эквивалентной схемы отражают основные физические явления, протекающие в динамической системе станка. Здесь приняты следующие обозначения: ПГД — подсистема привода главного движения; ПП — подсистема привода подачи; НС — несущая подсистема; C_x , C_y , C_z — приведенные жесткости подсистем; h_x , h_y — приведенные коэффициенты демпфирования подсистем; M_z , M_x , M_y — приведенные инерционные параметры подсистем; PP — процесс резания; L —

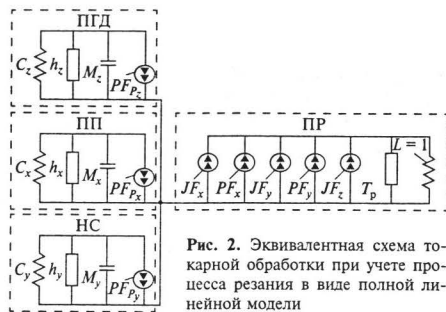


Рис. 2. Эквивалентная схема токарной обработки при учете процесса резания в виде полной линейной модели

условная единичная податливость процесса резания, необходимая для преобразования скорости изменения силы резания (переменной модели) в значение силы резания.

Фиктивные источники типа PF и JF отражают взаимодействие подсистем и обеспечивают связь между ними и процессом резания в эквивалентной схеме. Источник типа JF отражает силу воздействия на одну из подсистем; величина этой силы является функцией скорости по соответствующей координате в другой подсистеме, воздействующей на первую. Источник типа PF также отражает силу воздействия на подсистему, но величина этой силы является функцией координаты в другой подсистеме, воздействующей на первую.

Уравнения связи между подсистемами имеют вид

$$\left. \begin{aligned} PF_{P_z} &= k_z P; \quad PF_{P_x} = k_x P; \\ PF_{P_y} &= k_y P; \quad JF_x = h_{P_x} \dot{x}; \\ PF_x &= k_{P_x} \dot{x}; \quad JF_y = h_{P_y} \dot{y}; \\ PF_y &= k_{P_y} \dot{y}; \quad JF_z = h_{P_z} \dot{z}; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где PF_{P_z} — фиктивный источник, учитывающий воздействие силы P_z на подсистему ПГД; PF_{P_x} — то же силы P_x на подсистему ПП; PF_{P_y} — то же силы P_y на подсистему НС; PF_x и JF_x — фиктивные источники, учитывающие воздействие со стороны подсистемы ПП на процесс резания, обусловленное соответственно изменением относительного положения РИ и заготовки по оси X и скоростью этого изменения; PF_y и JF_y — фиктивные источники, учитывающие воздействие со стороны подсистемы

мы НС на процесс резания, обусловленное соответственно изменением относительного положения РИ и заготовки по оси Y и скоростью этого изменения; JF_z — фиктивный источник, учитывающий воздействие со стороны подсистемы НС на процесс резания, обусловленное изменением силы P резания в зависимости от скорости изменения относительного положения РИ и заготовки по оси Z ; k_x, k_y, k_z — коэффициенты, определяемые проекциями силы резания на соответствующие оси.

Математическая модель динамической системы механической обработки представляет собой систему четырех обыкновенных дифференциальных уравнений с четырьмя неизвестными:

$$\left. \begin{aligned} M_z \ddot{z} + h_z \dot{z} + C_z z + k_z P &= 0; \\ M_x \ddot{x} + h_x \dot{x} + C_x x + k_x P &= 0; \\ M_y \ddot{y} + h_y \dot{y} + C_y y + k_y P &= 0; \\ -h_{P_x} \dot{x} - k_{P_x} x - h_{P_y} \dot{y} - k_{P_y} y - h_{P_z} \dot{z} - T_p \dot{P} + P &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Сложность моделирования тепловых процессов в станках обусловлена тем, что помимо теплораспределения между элементами конструкции необходимо учитывать рабочие процессы, которые являются источниками теплоты. При моделировании тепловых процессов при резании за основу взята схема тепловых потоков (рис. 3) [5–8].

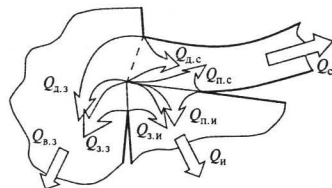


Рис. 3. Схема тепловых потоков при резании

Здесь представлены некоторые итоговые потоки, отражающие основные процессы теплораспределения при резании между заготовкой, стружкой и РИ. В этой схеме не отражены потоки, связанные с переносом теплоты посредством СОЖ и внешней среды; при необходимости их можно учесть в дальнейших исследованиях. Охлаждение воздушной средой при анализе тепловой модели процесса резания обычно не рассматривают.

Схема учитывает действие трех источников теплоты. Теплота Q_d деформации, возникающая в

области плоскости сдвига слоев металла, распределяется между стружкой ($Q_{d,c}$) и заготовкой ($Q_{d,z}$). При относительном движении стружки и РИ возникает теплота Q_p трения по передней поверхности, распределяющаяся между стружкой ($Q_{p,c}$) и РИ ($Q_{p,i}$). При относительном движении заготовки и РИ возникает теплота Q_z трения по задней поверхности, распределяющаяся между заготовкой ($Q_{z,z}$) и РИ ($Q_{z,i}$).

Для упрощения математического описания (но без потери точности и без отклонения от реальной физики процесса) представим это распределение в виде итоговых потоков теплообмена через контактные поверхности РИ. Итоговый тепловой поток между стружкой и передней поверхностью РИ на площадке контакта определяется потоками $Q_{p,c}$ и $Q_{p,i}$; тепловой поток между заготовкой и задней поверхностью РИ определяется потоками $Q_{z,z}$ и $Q_{z,i}$. Итоговый тепловой поток, уходящий с движущейся стружкой, обозначим Q_c , а тепловой поток, возникающий в результате отвода теплоты внутрь заготовки вследствие ее вращения, обозначим $Q_{a,z}$. Тепловой поток, направленный в тело РИ, обозначим Q_p .

Тогда, используя метод электрической аналогии, получаем эквивалентную схему, отражающую динамику тепловых процессов при резании (рис. 4). Здесь потенциалы в узловых точках соответствуют средним температурам характерных элементов исходной системы. Узел 1 определяет среднюю температуру стружки; узел 2 связан со средней температурой на передней поверхности РИ (температурой резания). Узел 3 показывает среднюю температуру в теле режущего клина, узел 4 — среднюю температуру на задней поверхности РИ, узел 5 — среднюю температуру в заготовке.

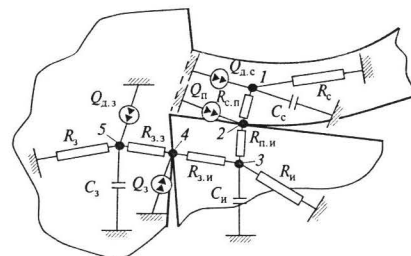


Рис. 4. Эквивалентная схема тепловых процессов при резании

Источники типа потока отражают тепловые источники, возникающие при резании. Теплота деформации Q_d приложена к узлу 1 ($Q_{d,c}$) и к узлу 5 ($Q_{d,z}$) при условии, что скорость движения стружки превышает скорость распространения теплоты в обрабатываемом материале вследствие теплопроводности. Источник теплоты Q_p трения по передней поверхности приложен к узлу 2, источник теплоты Q_z трения по задней поверхности — к узлу 4.

Резистивные элементы эквивалентной схемы отражают теплопроводность участков. Элемент $R_{c,p}$ определяет теплообмен между стружкой и передней поверхностью РИ, элемент $R_{p,i}$ — между заготовкой и задней поверхностью РИ. Элемент R_c отражает отвод теплоты со стружкой из зоны резания, элемент R_z — теплоотвод из зоны резания в глубину заготовки вследствие ее относительного движения.

Элементы $R_{z,i}$ и $R_{p,i}$ отражают теплообмен между задней и передней поверхностями РИ через режущую пластину. Их значения находят с учетом сопротивления материала режущей пластины тепловому потоку и координаты точки 3, в которой определяют среднюю температуру. Элемент R_i учитывает отвод теплоты через тело РИ; его значение находят из условия сопротивления материала РИ и контактов соединений корпуса РИ с режущей пластиной потоку теплоты.

Емкостные элементы в эквивалентной схеме учитывают теплоемкость соответствующих элементов модели: C_c — теплоемкость стружки; C_i — теплоемкость тела РИ; C_z — теплоемкость заготовки.

Математическая модель, полученная по эквивалентной схеме методом узловых потенциалов, имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} C_c \dot{\theta}_1 + \left(\frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_{c,p}} \right) \theta_1 - \frac{1}{R_{c,p}} \theta_2 &= Q_d m; \\ -\frac{1}{R_{c,p}} \theta_1 + \left(\frac{1}{R_{c,p}} + \frac{1}{R_{p,i}} \right) \theta_2 - \frac{1}{R_{p,i}} \theta_3 &= Q_p; \\ -\frac{1}{R_{p,i}} \theta_2 + C_i \dot{\theta}_3 + \left(\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_{z,i}} + \frac{1}{R_{p,i}} \right) \theta_3 - \frac{1}{R_{z,i}} \theta_4 &= 0; \\ -\frac{1}{R_{z,i}} \theta_3 + \left(\frac{1}{R_{z,i}} + \frac{1}{R_{z,z}} \right) \theta_4 - \frac{1}{R_{z,z}} \theta_5 &= Q_z; \\ -\frac{1}{R_{z,z}} \theta_4 + C_z \dot{\theta}_5 + \left(\frac{1}{R_{z,z}} + \frac{1}{R_z} \right) \theta_5 &= Q_d (1 - m), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $\theta_1 - \theta_5$ — средняя температура в узловых точках 1–5 эквивалентной схемы (см. рис. 4); m — коэффициент, учитывающий долю теплоты деформации, поступающую в стружку [5].

Математическая модель (4) описывает основные статические и динамические процессы теплораспределения при лезвийной обработке.

Предложенные модели (2)–(4) и метод электрических аналогий позволяют исследовать динамику процессов, протекающих в термодинамической системе станка при резании. Они обладают достаточной гибкостью и универсальностью, а также способны отображать нюансы термодинамических процессов при различных видах механической обработки и при необходимости дополнительно учитывать отвод теплоты через СОЖ и внешнюю среду. В то же время они компактны, что позволяет встраивать их в более сложные системы расчетов.

С учетом сказанного эквивалентная схема термодинамической системы станка, полученная методом электрической аналогии, представлена на рис. 5. Здесь узлы 1, 2 и 3 учитывают изменение координат соответственно z , x и y вершины РИ в процессе обработки; узел 4 учитывает скорость изме-

нения силы P резания; узлы 5, 6, 7, 8 и 9 учитывают изменение средней температуры характерных точек: стружки, передней поверхности РИ (температуры резания), режущего клина, задней поверхности РИ и заготовки соответственно.

Взаимодействие между упругой системой станка, процессом резания и тепловой системой отображено в схеме включением фиктивных источников PF и JF . В схеме учтено, что колебания упругой системы станка вызывают изменение силы резания, которая определяет мощность теплообразования. Обратное воздействие тепловой системы на упругую систему учтено относительным смещением РИ и заготовки в результате тепловых деформаций, а также снижением силы резания из-за изменения физических свойств материала в зоне резания.

Система уравнений, описывающая процессы в термодинамической системе, имеет вид.

$$\left. \begin{aligned} M_z \ddot{z} + h_z \dot{z} + C_z z + k_z P &= 0; \\ M_x \ddot{x} + h_x \dot{x} + C_x x + k_x P &= 0; \\ M_y \ddot{y} + h_y \dot{y} + C_y y + k_y P + k_y \theta_7 &= 0; \\ h_t \theta_6 - h_P \ddot{x} - k_P x - h_P \ddot{y} - k_P y - h_P \ddot{z} + P \dot{P} + P &= 0; \\ -k_{двз} \dot{z} - k_{дсз} P - k_{дНс} P + C_z \theta_5 + \left(\frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_{с.п}} \right) \theta_5 - \frac{1}{R_{с.п}} \theta_6 &= 0; \\ -k_{пв} \dot{z} - k_{пз} P - k_{пН} P - \frac{1}{R_{с.п}} \theta_5 + \left(\frac{1}{R_{с.п}} + \frac{1}{R_{п.и}} \right) \theta_6 - \frac{1}{R_{п.и}} \theta_7 &= 0; \\ -\frac{1}{R_{п.и}} \theta_6 + C_{и} \dot{\theta}_7 + \left(\frac{1}{R_{и}} + \frac{1}{R_{з.и}} + \frac{1}{R_{п.и}} \right) \theta_7 - \frac{1}{R_{з.и}} \theta_8 &= 0; \\ -k_{зв} \dot{z} - \frac{1}{R_{з.и}} \theta_7 + \left(\frac{1}{R_{з.и}} + \frac{1}{R_{з.з}} \right) \theta_8 - \frac{1}{R_{з.з}} \theta_9 &= Q_3; \\ -k_{двз} \dot{z} - k_{дсз} P + k_{дНз} P - \frac{1}{R_{з.з}} \theta_8 + C_z \dot{\theta}_9 + \left(\frac{1}{R_{з.з}} + \frac{1}{R_j} \right) \theta_9 &= 0. \end{aligned} \right\} (5)$$

Здесь k_t — коэффициент, определяющий изменение координаты u вследствие теплового расширения режущей пластины РИ; h_t — коэффициент, учитывающий влияние температуры резания на силу резания; $k_{двз}$, $k_{дсз}$ и $k_{дНс}$ — коэффициенты, определяющие поток теплоты деформации в стружку при изменении соответственно скорости v резания, а также тангенциальной P_z и нормальной P_N составляющих силы резания (P_N — проекция силы резания на нормаль к передней поверхности РИ); $k_{пв}$, $k_{пз}$ и $k_{пН}$ — коэффициенты, определяющие поток теплоты от трения по передней поверхности при изменении соответственно скорости v , а также сил P_z и P_N ; $k_{зв}$ — коэффициент, определяющий

поток теплоты от трения по задней поверхности при изменении скорости резания; $k_{двз}$, $k_{дсз}$ и $k_{дНс}$ — коэффициенты, определяющие поток теплоты деформации в заготовку при изменении соответственно скорости v , а также сил P_z и P_N ; $\theta_5 - \theta_9$ — температура в соответствующих узлах схемы (см. рис. 5).

Использование компьютерной программы PAN для анализа математической модели (5) позволило получить основные зависимости и характеристики взаимодействия упругой и тепловой систем при механической обработке.

При врезании РИ в заготовку возникает переходный процесс, связанный с колебаниями упругой системы. Несмотря на то, что тепловые процессы не обладают инерционностью, это приводит также к колебательному переходному процессу в тепловой системе (рис. 6), в результате которого установившееся значение температуры резания возникает спустя некоторое время, определяемое тепловыми сопротивлениями.

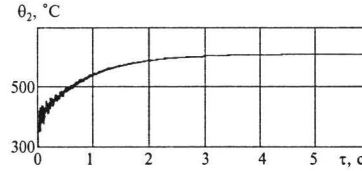


Рис. 6. Изменение температуры θ_2 резания при врезании инструмента (τ — текущее время)

На рис. 7 приведена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) изменения температуры резания θ_2 при периодическом изменении силы резания с частотой ω . Как видно, температура резания при этом существенно снижается в сравнении с установившимся значением, причем эффект снижения достигается уже при небольших значениях ω .

Это явление широко используют в практике, например, когда реализуют процесс прерывистого шлифования. Однако следует иметь в виду, что при некоторых частотах в силу резонансных явлений в технологической системе возможно увеличение температуры резания со всеми негативными последствиями для качества обработки.

Резонансные пики на рис. 7 определяются собственными частотами приводов главного движения и подачи и несущей системы станка. Возмож-

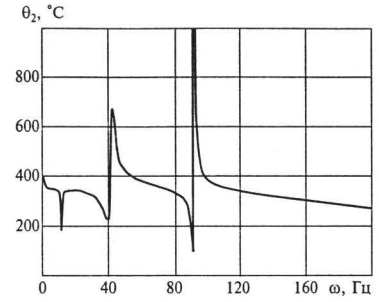


Рис. 7. АЧХ изменения температуры θ_2 резания при периодическом воздействии силы резания с частотой ω

ны также резонансы температур, обусловленные периодическими возмущениями в узлах станка.

Предложенная модель (5) и методика позволяют выявить основные взаимосвязи упругих и тепловых процессов при механической обработке.

Список литературы

- Зарубин В. С. Математическое моделирование в технике: Учеб. для вузов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. — 496 с.
- Кулинов В. А. Динамика станков. — М.: Машиностроение, 1967. — 360 с.
- Кедров С. С. Колебания металлорежущих станков. — М.: Машиностроение, 1978. — 199 с.
- Кулинов В. А. Системность и диалектика в динамике технологических процессов и машин // СТИН. — 2000. — № 1. — С. 5–9.
- Резников А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. — М.: Машиностроение, 1981. — 279 с.
- Резников А. Н., Резников Л. А. Тепловые процессы в технологических системах: Учеб. для вузов. — М.: Машиностроение, 1990. — 288 с.
- Якимов А. В., Слободяник П. Т., Усов А. В. Теплофизика механической обработки: Учеб. пособие. — К.: Одесса: Либидь, 1991. — 240 с.
- Ящеричев П. И., Еременко М. Л., Фельдштейн Е. Э. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: Учеб. для вузов. — Минск: Выш. шк., 1990. — 512 с.

Уважаемые авторы!

Не посылайте корреспонденцию ценными письмами и бандеролями.

Убедительная просьба направлять Ваши статьи в редакцию только

заказной почтой или обычным письмом. Это значительно сократит время их получения.