



УДК 621.436:656.6.001.24

© *Е. В. Комялова, Е. Г. Калита, 2008***МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ  
В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ПРИ ТОКАРНОЙ  
ОБРАБОТКЕ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Комялова Е. В.* – канд. техн. наук, ст. преп. кафедры «Начертательная геометрия и машинная графика»; *Калита Е. Г.* – асп. кафедры «Литейное производство и технология металлов» (ТОГУ).

В современном промышленном производстве широкое применение находят разнообразные пластические массы. Более 40 % деталей в машино-, автомобиле- и судостроении изготавливаются из полимеров. Механическая обработка полимерных материалов существенно отличается от обработки сталей. В статье рассмотрено сравнение динамических свойств технологической системы при обработке резанием полимеров и металлов (на примере сталей) и анализируется возможное влияние таких различий на параметры качества обработки.

Various plastics have found wide use in the commercial production. More than 40 % of all plastics in machine- and shipbuilding are accounted for by polymers. The machining of polymeric materials is considerably different from steel processing. Dynamic features of a technological system with cut processing of polymers and metals (steels) are considered and a potential effect of such discrepancies on the quality after processing is analyzed.

В настоящее время имеется тенденция расширения области применения деталей из полимерных материалов в различных отраслях промышленности. Применение пластмасс позволяет, с одной стороны, улучшить технико-экономические показатели машин (снизить массу, сократить трудоемкость изготовления и т. д.), а с другой – существенно экономить черные и цветные металлы.

В последнее время при изготовлении различных механизмов и машин все чаще заменяют детали из дорогостоящих металлов и сплавов (бронза, латунь и т. д.) на аналогичные из пластмасс, в частности – изготовленные из капролона.

Это объясняется тем, что капролон обладает рядом положительных физико–механических и химических свойств: низкий коэффициент трения; высокая износостойкость; высокая механическая прочность; способность работать без смазки; вибропоглощаемость; нечувствительность к кратковременным перегрузкам и ударам; быстрая прирабатываемость; химическая стойкость; способность работать в абразивной среде.

Все перечисленные свойства выгодно отличает капролон от других применяемых антифрикционных материалов.

К основным технологическим мероприятиям по повышению износостойкости и долговечности машин и механизмов относится обеспечение требуемых параметров шероховатости сопрягаемых поверхностей деталей. В подвижных соединениях шероховатость оказывает значительное влияние на трение и износ трущихся поверхностей подшипников, направляющих, ползунов и т. п.

Прочность деталей также зависит от шероховатости поверхности. Разрушение детали, особенно при переменных нагрузках, в значительной степени объясняется концентрацией напряжений, являющихся следствием имеющихся неровностей.

В настоящее время реализуются современные эффективные методы получения изделий и деталей из капролона, однако обеспечение высокого качества сопрягаемых поверхностей деталей, требуемой точности и формы достигается за счет их механической обработки резанием.

При механической обработке различных материалов, в том числе и полимерных, важно обеспечить высокое качество поверхности обработанной детали. От качества поверхностного слоя зависят: прочность деталей, особенно при знакопеременных нагрузках, прочность прессовых и стабильность подвижных посадок, износостойкость, коэффициент трения, коррозионная прочность, оптические и химические свойства [1].

Наличие у полимерных материалов специфических свойств обуславливают резкое отличие процессов их механической обработки от процессов резания металлов, при этом эффективность методов обработки резанием в основном зависит от режимов обработки и используемых оборудования и режущего инструмента. Однако на практике имеются большие затруднения с достижением требуемых параметров шероховатости поверхности обрабатываемых деталей обычными методами обработки. Технологических методов, специально предназначенных для обработки капролона, недостаточно и они имеют невысокую эффективность. Это приводит к необходимости разработки новых оригинальных способов обработки деталей из пластмасс, сущность



которых заключается в направленном изменении свойств обрабатываемого материала в зоне резания с целью обеспечения благоприятных условий для получения обработанной поверхности высокой точности и качества.

Известно, что качество обработанной детали зависит от характера и параметров относительных колебаний инструмента и заготовки, которые вызывают периодическое изменение толщины срезаемого слоя и сил резания, что в свою очередь ведет к изменению размеров и появлению геометрических погрешностей у обработанных деталей [2]. Колебания элементов технологической системы приводят к ухудшению качества обработанной поверхности, а также снижению стойкости режущего инструмента [2, 3]. Для снижения уровня колебаний в технологической системе уменьшают режимы резания (глубину резания и подачу), вследствие чего существенно снижается производительность обработки.

Поглощение энергии колебаний в процессе механической обработки определяется демпфирующей способностью материалов деталей технологической системы и стыков между ними, которая характеризует способность материалов и стыков поглощать энергию циклического деформирования.

Демпфирующая способность материала зависит от многих факторов, например, от его химического состава и структуры; амплитуды циклической деформации (напряжения) и вида напряженного состояния; вида и режима термической обработки; предварительного пластического деформирования; температуры и др. Известные конструкционные материалы различаются по демпфирующей способности весьма существенно – на три порядка [4].

Наиболее низкими демпфирующими свойствами обладают титановые сплавы. Значительно лучшую демпфирующую способность по сравнению с титановыми сплавами имеют алюминиевые сплавы и стали. А самую высокую демпфирующую способность показали полимерные материалы.

Полимерные материалы состоят из длинных молекулярных цепочек органического происхождения. Атомы углерода прочно связаны друг с другом и образуют разветвления, в которых прочность соединения таких молекулярных цепочек зависит от технологии изготовления полимера. Демпфирование происходит при релаксации и восстановлении полимерной цепочки после ее деформирования; при этом имеет место строгое соответствие между эффектами, обусловленными влиянием частоты колебаний и температуры, поскольку существует непосредственная связь между температурой и характером молекулярного движения [5].

Наиболее важными внешними факторами, оказывающими влияние на демпфирующие свойства материала, являются температура, частота колебаний, динамическая нагрузка и статическое предварительное нагружение. В меньшей степени демпфирующие свойства зависят от остальных внешних факторов, таких, как износ, давление воздуха, наличие радиации и смазка [2–4].

Самым важным внешним фактором, определяющим демпфирующие свойства материалов, является температура. Под влиянием температуры снижается прочность и твердость материала, а коэффициент потерь принимает очень высокие значения. Сам коэффициент потерь, определяемый как:

$$C_z = \frac{2M}{t_3} \delta,$$

где  $M$  – масса;  $t_3$  – период затухания колебаний;  $\delta$  – логарифмический декремент затухающих колебаний, определяемый из соотношения

$$\delta = \ln(A_i / A_{i+1}),$$

где  $A_i$  – изменения амплитуды затухающих колебаний, зависит от частоты колебаний технологической системы, с ростом которой он увеличивается.

Оценка влияния величины амплитуд деформаций при динамических перемещениях на демпфирующие свойства материалов довольно затруднительна [6–9]. Это связано с тем, что большие амплитуды деформаций обычно приводят к большому поглощению энергии в материале, что в свою очередь вызывает быстрый рост его температуры, поэтому оба эффекта – температурный и амплитудный – проявляются одновременно. Однако для полимерных материалов, где модуль упругости и коэффициент потерь изменяются в зависимости от температуры относительно медленно, влияние температуры становится вторичным по сравнению с влиянием амплитуды динамических деформаций. Зависимость модуля упругости от амплитуды динамических деформаций определяется структурой материала [7, 8].

Также на демпфирующие свойства материала оказывает влияние статическое предварительное нагружение. В случае приложения нагрузки к материалу модуль упругости растет с ростом предварительной нагрузки, тогда как коэффициент потерь уменьшается [1].

В случае совместного воздействия статической и тепловой нагрузки в области небольших температур (до 100 °С) уменьшается общий уровень рассеивания энергии в материале. При этом характер влияния температуры на демпфирование колебаний образца не меняется с приложением механической нагрузки [5].



Исходя из вышесказанного, следует, что динамические свойства технологической системы при обработке резанием полимерных материалов должны иметь существенные отличия, по сравнению с обработкой металлических конструкционных материалов, вызванные большей демпфирующей способностью полимеров. Поэтому представляет значительный интерес сравнение динамических свойств технологической системы при обработке резанием полимеров и металлов (на примере сталей) и анализ возможного влияния таких различий на параметры качества обработки.

В работе [8] для определения параметров качества деталей при токарной обработке предложена математическая модель колебаний технологической системы, отличительными особенностями которой являются:

- 1) учет взаимного влияния параметров колебаний и силы резания;
- 2) учет взаимосвязи колебаний по различным осям координат;
- 3) представление расчетной схемы в виде многомассовой системы с сосредоточенными параметрами;
- 4) использование мгновенных (постоянных и переменных) значений подачи, скорости и глубины резания вместо их номинальных (постоянных) значений.

Учитывая тот факт [3, 7], что контактное и силовое взаимодействие инструмента с обрабатываемым материалом при обработке металлов и полимеров аналогичное, можно использовать данную модель при моделировании токарной обработки полимерных материалов. Адекватность данной модели подтверждается также тем, что значения коэффициентов упругости, жесткости и демпфирования выбраны конкретно для исследуемого материала.

На рис. 1 изображена принятая расчетная схема технологической системы. На заготовку действует сила резания с составляющими  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ , а на инструмент – та же сила, составляющие которой имеют противоположное направление ( $-P_x$ ,  $-P_y$ ,  $-P_z$ ).

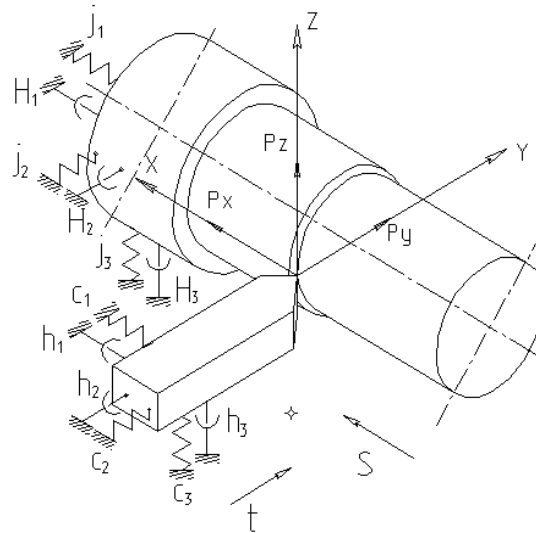


Рис. 1. Расчетная схема технологической системы

Коэффициенты жесткости для детали и инструмента обозначены соответственно: по оси  $X$  –  $j_1$  и  $c_1$ ; по оси  $Y$  –  $j_2$  и  $c_2$ ,  $Z$  –  $j_3$  и  $c_3$ . Коэффициенты демпфирования, соответственно для детали и инструмента обозначены: по оси  $X$  –  $H_1$  и  $h_1$ ; по оси  $Y$  –  $H_2$  и  $h_2$ ,  $Z$  –  $H_3$  и  $h_3$ . Инерционные коэффициенты для детали и инструмента: по оси  $X$  –  $M_1$  и  $m_1$ ,  $Y$  –  $M_2$  и  $m_2$ ,  $Z$  –  $M_3$  и  $m_3$ ; при этом принято, что инерционные коэффициенты одинаковы для изгибных колебаний (для детали – по осям  $Y$  и  $Z$ , а для инструмента – по осям  $X$  и  $Z$ ), и отличаются от инерционных коэффициентов для продольных колебаний (для детали – по оси  $X$ , а для инструмента – по оси  $Y$ ).

С учетом принятых расчетной схемы и обозначения, математическая модель колебаний имеет вид:

$$M \ddot{X} + H \dot{X} + C X = F(t)$$

где  $M$ ,  $H$ ,  $C$  – матрицы масс, демпфирования и жесткости технологической системы:

$$M = \begin{pmatrix} M_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_1 \end{pmatrix};$$



$$H = \begin{pmatrix} H_1 & 0 & 0 & 0 & \gamma_x & -\gamma_x \\ 0 & h_1 & 0 & 0 & -\gamma_x & \gamma_x \\ 0 & 0 & H_2 & 0 & \gamma_y & -\gamma_y \\ 0 & 0 & 0 & h_2 & -\gamma_y & \gamma_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & H_3 + \gamma_z & -\gamma_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\gamma_z & h_3 + \gamma_z \end{pmatrix};$$

$$C = \begin{pmatrix} j_1 + \beta_x & -\beta_x & \alpha_x & -\alpha_x & 0 & 0 \\ -\beta_x & c_1 + \beta_x & -\alpha_x & \alpha_x & 0 & 0 \\ \beta_y & -\beta_y & j_2 + \alpha_y & -\alpha_y & 0 & 0 \\ -\beta_y & \beta_y & -\alpha_y & c_2 + \alpha_y & 0 & 0 \\ \beta_z & -\beta_z & \alpha_z & -\alpha_z & j_3 & 0 \\ -\beta_z & \beta_z & -\alpha_z & \alpha_z & 0 & c_3 \end{pmatrix},$$

где  $X = (x_d, x_n, y_d, y_n, z_d, z_n)^T$  – вектор виброперемещений технологической системы по осям X, Y и Z детали и инструмента соответственно (т – символ транспонирования);  $F(t) = (P_x(t), -P_x(t), P_y(t), -P_y(t), P_z(t), -P_z(t))^T$  – вектор вибровозмущений, который содержит часть составляющих силы резания, явно зависящих от времени; коэффициенты  $\alpha_{x,y,z}, \beta_{x,y,z}, \gamma_{x,y,z}$  рассчитываются по формулам:

$$\alpha_{x,y,z} = 10 \cdot C_p \cdot K_p \cdot x \cdot s^{x-1} \cdot t^y \cdot v^n,$$

$$\beta_{x,y,z} = 10 \cdot C_p \cdot K_p \cdot y \cdot s^x \cdot t^{y-1} \cdot v^n, \dots \dots \dots (1)$$

$$\gamma_{x,y,z} = 10 \cdot C_p \cdot K_p \cdot n \cdot s^x \cdot t^y \cdot v^{n-1},$$

где  $C_p$  – коэффициент, учитывающий условия обработки;  $K_p$  – коэффициент, учитывающий фактические условия резания;  $x, y, n$  – показатели степени; данные коэффициенты определяются по справочной литературе.

Отметим, что для сравнительного анализа особенностей динамики технологической системы при обработке полимеров и сталей конкретный вид вектора вибровозмущений не имеет значения, поскольку эти особенности определяются с помощью динамической податливости.

Величина погрешности обработки детали равна  $\Delta(t) = y_d(t) - y_n(t)$ . Она включает в себя погрешность размера, волнистость и шероховатость обработанной поверхности. Поскольку погрешность обработки зависит от разности перемещений детали и инструмента по оси Y, то для определения особенностей обработки полимеров необходимо определить динамическую характеристику технологической системы в направлении этой оси.

В частотной области модель колебаний технологической системы имеет вид

$$X(\omega) = (-\omega^2 M + i\omega H + C)^{-1} F(\omega)$$

где  $X(\omega)$  – комплексный амплитудный спектр виброперемещений;  $\omega$  – круговая частота колебаний;  $i$  – мнимая единица;  $F(\omega)$  – комплексный амплитудный спектр вибровозмущений; выражение в скобках является матрицей динамической податливости технологической системы –  $W(\omega) = (-\omega^2 M + i\omega H + C)^{-1}$ .

В частотной области выражение для величины погрешности обработки имеет вид

$$\Delta_{\text{поп}}(\omega) = u_d(\omega) - u_n(\omega),$$

где  $\Delta_{\text{поп}}(\omega)$  – комплексный амплитудный спектр величины погрешности обработки в поперечном сечении;  $u_d(\omega)$  и  $u_n(\omega)$  – составляющие вектора  $X(\omega)$ .

Спектральное представление величины погрешности обработки детали в поперечном сечении характеризует при  $\omega = 0$  погрешность размера обработанной детали, при  $\omega = \omega_{\text{шп}}$  – величину эксцентриситета обработанной поверхности относительно базовой поверхности детали, при  $\omega = 2\omega_{\text{шп}}$  – овальность обработанной поверхности,  $\omega = 3\omega_{\text{шп}}$  – трехгранность и т. п., при  $15\omega_{\text{шп}} \leq \omega < 46\omega_{\text{шп}}$  – волнистость, а при  $\omega > 46\omega_{\text{шп}}$  – шероховатость обработанной поверхности в поперечном сечении.

Передаточная функция процесса резания

$$W_{\text{рез}} = |(w_{33} - w_{34} - w_{43} + w_{44})|,$$

т. е. выражается через составляющие матрицы динамической податливости. Поскольку нас интересуют различия динамических характеристик при обработке сталей и полимеров, то сравнение можно выполнить на основе анализа передаточной функции процесса резания в этих случаях.

На рис. 2 представлены результаты моделирования функции  $W_{\text{рез}}$  при обработке заготовок из стали 45 и капролона на токарно-винторезном станке модели 16K20. Для регистрации колебаний, возникающих в технологической системе, использовался измерительный комплекс, включающий измеритель шума и вибрации ВШВ-003 с пьезоэлектрическим преобразователем ДН-4, который был закреплен на резцедержателе станка. Принятый электрический сигнал после аналого-цифрового преобразования поступал на ЭВМ для дальнейшего корреляционного и спектрального анализа. Для корреляционного и спектрального анализа колебаний технологической системы использовалась свободно распространяемая версия программы Power Graph 3.2.



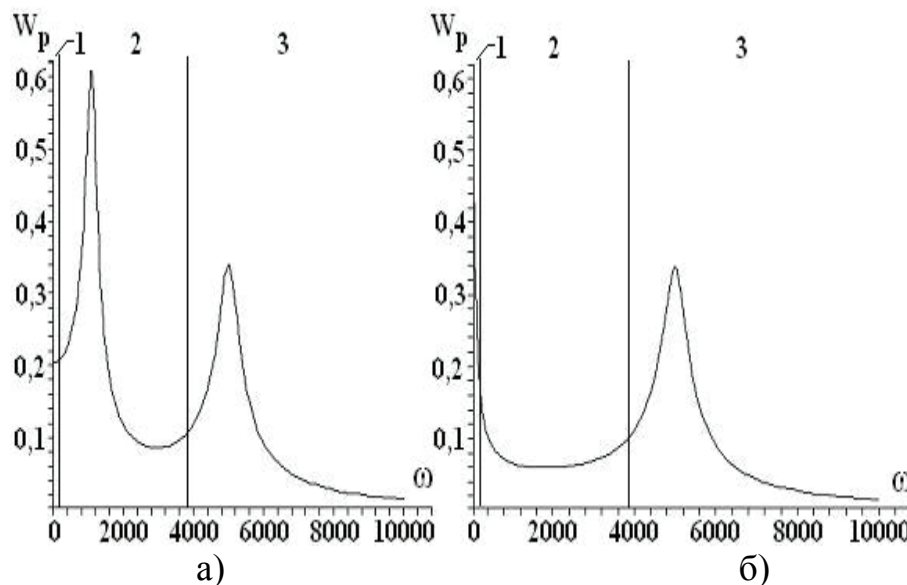


Рис. 2. Зависимость передаточных функций  $W_{рез}$  (мкм/кН) от круговой частоты  $\omega$  (рад/с) при скорости резания  $v = 75$  м/мин:  
а) для стали 45; б) для капролона

При моделировании установлена особенность динамики технологической системы при обработке резанием полимеров, заключающаяся в расположении наибольших значений динамической податливости системы в области, соответствующей погрешности размера и эксцентриситета (рис. 2, б зона 1), а также шероховатости обработанной поверхности (рис. 2, б зона 3). При обработке сталей наибольшие значения динамической податливости технологической системы расположены в области погрешности формы – огранки и волнистости (рис. 2, а зона 2).

Обеспечение точности размера при обработке полимеров может выполняться обычным способом – настройкой и поднастройкой на размер. Поэтому наибольшее влияние на качество обработки полимеров оказывают высокочастотные колебания технологической системы, формирующие шероховатость обработанной поверхности. Как следует из выражения (1) на величину погрешности обработки оказывают влияние динамическая податливость и сила резания, поэтому повышение качества обработки полимеров связано с уменьшением силы резания. Как отмечалось ранее, снижение значений режимов обработки (скорости резания и подачи) связано со снижением производительности. В связи с этим одним из главных направлений повышения качества обработки является снижение величины напряжений в полимерных



материалах и соответственно силы резания, за счет предварительных воздействий на них.

Таким образом, принципиальным отличием колебаний технологической системы при обработке полимерных материалов от обработки сталей, оказывающих существенное влияние на качество обработки, является преобладание высокочастотных колебаний, формирующих шероховатость поверхности.

### Библиографические ссылки

1. Тюдзе Р., Кавай Т. Физическая химия полимеров. М., 1977.
2. Шапиро Г. И. Механизация и автоматизация механической обработки пластмассовых изделий // Пластмассы в машиностроении / Под ред. В. К. Завгороднего. М., 1959.
3. Резание конструкционных материалов, режущие инструменты и станки / Под ред. П. Г. Петрухи. М., 1974.
4. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов. М., 1979.
5. Бидерман В. Л. Теория механических колебаний. М., 1980.
6. Матвеев В. В. Демпфирование колебаний деформируемых тел. Киев, 1985.
7. Кудинов В. А. Динамика станков. М., 1967.
8. Ивахненко Е. О. Обеспечение точности обработки на токарных станках посредством выбора рациональных режимов резания с учетом состояния динамической системы СПИД. Хабаровск, 1997.