

УДК 621.9.06; 621.7.07

В.В. Ерохин, к.т.н., доц.

В.Б. Ильицкий, д.т.н., проф.

Брянский государственный технический университет (Россия)

ПАРАМЕТРЫ ВИБРОУСТОЙЧИВОСТИ СТАНОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

Излагаются основные положения по определению составляющих параметра погрешности установки заготовки в станочном приспособлении, зависящих от вибрационного состояния технологической системы. Знание этого параметра позволяет существенно уточнить динамику колебаний технических систем и тем самым повысить качество формообразования изготавливаемых деталей.

Постановка проблемы. Непостоянство сил резания при формообразовании заготовки и переменность жесткости станочных приспособлений и других элементов технологической системы предопределяют возникновение вибраций. При вибрации повышается шероховатость обрабатываемой поверхности заготовки, ухудшаются условия работы режущего инструмента и усиливается динамический характер силы резания. Применение материалов элементов станочных приспособлений с малыми коэффициентами затухания обуславливает появление резонирующих гармоник колебаний приспособления, что не только снижает качество обрабатываемой поверхности заготовки, но и долговечность самого приспособления из-за появления больших внутренних напряжений. Отсюда следует, что борьба с вибрациями в технологической системе, и особенно в станочном приспособлении, является одной из главных проблем по повышению качества обрабатываемой поверхности резанием.

Основная часть. Одной из основных составляющих эксплуатационных свойств станочного приспособления является его виброустойчивость.

Основными параметрами виброустойчивости являются такие показатели: логарифмический декремент колебаний Δ , коэффициент диссипации колебательной системы β [кг/с], коэффициент затухания δ [с⁻¹]. Зная данные показатели, можно определить значение вибрационной скорости, ускорения и перемещения. Однако эти показатели определяют процесс затухания колебаний, уже возникших в станочном приспособлении, что существенно снижает качественную и количественную оценки приспособления относительно его виброустойчивости. Данные параметры виброустойчивости рассмотрены в статье [3]. В

этом случае необходимо определить такие параметры виброустойчивости станочного приспособления, которые были прямо (не косвенно) связаны с такой характеристикой качества станочного приспособления, как его точность.

Далее в статье рассматриваются аспекты расчета и управления параметрами виброустойчивости станочных приспособлений на этапе конструкторско-технологической подготовки производства.

Под точностью станочного приспособления будем понимать обеспечение им заданных параметров точности размеров, отклонения формы, волнистости и шероховатости обрабатываемой поверхности резанием заготовки. В этом случае рассмотрим только обеспечение приспособлением заданных значений размерной точности обрабатываемых поверхностей заготовки, установленной в рассматриваемое приспособление. Размерная точность обрабатываемой поверхности заготовки определяется ее погрешностью установки в приспособлении. Под действием сил резания на заготовку происходят колебания и вибрационные перемещения как самой заготовки, так и деталей приспособления. В этом случае составляющими параметрами погрешности установки заготовки, зависящими от вибраций (колебаний) приспособления, являются максимальные амплитуды колебания $\varepsilon_{в,к}$ установочных опор и вибрационные перемещения $\varepsilon_{в,прц}$ незафиксированных (штифтами, установочными пальцами, шпонками и т. д.) деталей приспособления или обрабатываемых заготовок.

Максимальная амплитуда $\varepsilon_{в,к,i}$ вибрационного колебания i -го контакта соединения между деталями приспособления или заготовкой и установочными опорами (далее соединение) определяется по формуле

$$\varepsilon_{в,к} = \sqrt{\frac{2W}{c_c}} \text{ (м)},$$

где $c_{c,i}$ – контактная жесткость, определяемая упругой составляющей контактной жесткости зоны i -го соединения [4], Н/м; W_i – энергия колебания в i -ом соединении, Дж.

Энергия колебания i -го соединения определяется разностью между подводимой энергией $W_{нд,i}$ за цикл колебания и диссипируемой энергией $W_{дис,i}$ за цикл колебания при контактном проскальзывании детали соединения, т. е.

$$W_i = W_{нд,i} - W_{дис,i} \text{ (Дж)}.$$

Отрицательное значение W_i обуславливает равенство нулю $\varepsilon_{в,к,i}$.

Подводимая энергия определяется по формуле:

$$W_{нд,i} = W_{заг} - \sum_i (W_{i-1})_{носл}, \quad (1)$$

где $W_{заг}$ – энергия колебания заготовки, Дж; $\sum_i (W_{i-1})_{посл}$ – сумма

энергий колебаний в последовательных соединениях, предшествующих рассматриваемому соединению относительно направления распространения энергии колебания, Дж.

В рассматриваемом выражении (1) для первого ($i = 1$) соединения, т. е. соединения установочной опоры с базирующей поверхностью заготовки, $\sum_i (W_{i-1})_{посл} = 0$.

$$W_{заг} = \frac{J\omega^2}{2} \text{ (Дж)},$$

где J – момент инерции заготовки относительно оси вращательного движения, кг·м²; ω – угловая скорость заготовки, рад./с.

Энергию, диссипацирующую за цикл колебания в любом (номер соединения i опускаем) соединении при действии на него нормальной нагрузки $N \pm Q \cos \alpha$ (рис. 1), определяем на основе работ, проведенных Р.Д. Миндлином, Х.Дересевичем, К.Джонсон (Кембриджский университет), экспериментально подтвержденных Л.Е. Гудменом и С.Б. Брауном, но дополнительно с учетом рельефа контактирующих поверхностей соединения.

$$W_{дисс} = m \frac{9f_s^2 N_w^2}{10r_0} \left(\frac{2 - \mu_1}{G_1} + \frac{2 - \mu_2}{G_2} \right) \times \\ \times \left\{ 0,25\lambda \left[\frac{1 + \lambda}{1 - \lambda} (1 - \lambda K_w)^{5/3} - \frac{1 - \lambda}{1 + \lambda} (1 + \lambda K_w)^{5/3} \right] - \right. \\ \left. - \frac{6 - K_w - 5\lambda^2 K_w}{6(1 - \lambda^2)} (1 - K_w)^{2/3} \right\},$$

где m – число единичных контактов шероховатости [2] при взаимодействии шероховатых тел под действием силы N , нормальной к плоскости контакта; f_s – эффективный коэффициент трения [4]; N_w – сила, нормальная идеальной поверхности контакта (без неровностей профиля) и приходящаяся на единичную неровность профиля (шероховатость, волнистость), Н; μ_1, μ_2 и G_1, G_2 – соответственно коэффициенты Пуассона и модули упругости второго рода (Па) первого (индекс 1) и второго (индекс 2) контактирующих тел; $\lambda = f_s / \text{tg} \alpha$, где α – угол между

внешними постоянной силой N и осциллирующей силой Q (рис. 1); $K_{ш} = Q_{ш} \sin \alpha / (f_s N_{ш})$, где $Q_{ш}$ – осциллирующая сила, действующая на идеальную поверхность контакта и приходящаяся на единичную неровность профиля, Н; r_0 – радиус площадки контакта единичных шероховатостей поверхностей при действии силы N , м.

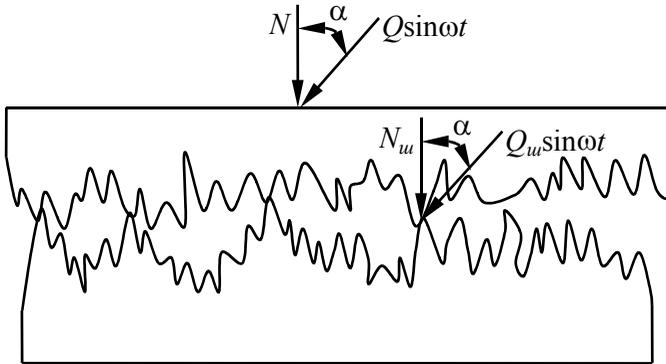


Рис. 1. Контакт двух тел, сжатых постоянной нормальной силой N и осциллирующей наклонной силой Q

Сила $N_{ш}$ определяется по формуле [2]

$$N_{ш} = \frac{N(S_m S_{m,np})_{\max} R p_1^{\chi_1} R p_2^{\chi_2}}{A_c t_{m1} t_{m2} \left[R p_1 \left(\frac{N}{A_c t_{m1} c' k_1 \sigma_{m1}} \right)^{\frac{1}{\nu_1}} + R p_2 \left(\frac{N}{A_c t_{m2} c' k_2 \sigma_{m2}} \right)^{\frac{1}{\nu_2}} \right]^{\chi_1 + \chi_2}}, \text{ Н}, \quad (2)$$

где $R p$, $R p_{np}$, t_m , $t_{m,np}$, S_m , $S_{m,np}$ – высота сглаживания, относительная опорная длина профиля на уровне средней линии, средний шаг неровностей в поперечном и продольном направлениях, м; \max – максимальное значение из двух контактирующих поверхностей; A_c – контурная площадь контакта, м²; c' – коэффициент стеснения, $c' = 2,82$ [2]; k – степень упрочнения поверхностного слоя; σ_m – напряжение текучести (условный предел текучести) материала, Па; ν – параметр степенной аппроксимации кривой опорной поверхности шероховатости; χ – параметр опорной кривой профиля, $\chi = \nu - 2/n$, где n , n_{np} – степень параболоида, аппроксимирующего единичную шероховатость поверхности в поперечном и продольном направлениях ($n = 1$, $n_{np} = 4$ – точение, фрезерование, строгание; $n = n_{np} = 2$ – шлифование, виброобкатывание, маг-

нитноабразивная и электрохимическая обработки; $n = n_{np} = 4$ – накатывание и полирование).

Силу $Q_{ш}$ определяем по формуле (2), только в место силы N необходимо подставить силу Q .

Радиус площадки контакта единичных шероховатостей поверхностей r_0 определяется по формуле [2]

$$r_0 = \sqrt{ab} = \sqrt{\frac{t_{m1} S_{m1} t_{m,np.1} S_{m,np.1}}{4} \left(\frac{y_{k1}}{Rp_1} \right)^{\frac{1}{n_1}} \left(\frac{y_{k1}}{Rp_{np1}} \right)^{\frac{1}{n_{np1}}}},$$

где a, b – полуоси эллипса контакта двух единичных шероховатостей под действием силы N, m ; y_k – нормальная контактная деформация реальной поверхности, м.

Значение нормальных контактных деформаций определяется из выражения

$$y_{k1} = y_{n1} + y_{y1} \text{ (м)},$$

где y_{n1}, y_{y1} – соответственно пластические и контактные деформации реальной поверхности.

$$y_{n1} = \left(\frac{NRp_1^{v_1} Wp_1^{v_{w1}} Hp_1^{v_{M1}}}{(c'k\sigma_m)_{\min} At_{m1} \cdot t_{m1_w} \cdot t_{m1_M}} \right)^{\frac{1}{v_1+v_{w1}+v_{M1}}} \text{ (м) [2];}$$

$$y_{y1} = 2\pi(c'k\sigma_m)_{\min} S_{m1} \frac{(1-\mu_1^2)y_{n1}}{E_1 \cdot Ra_1} \text{ (м) [2]},$$

где Wp, Hp – высота сглаживания профиля соответственно волнистости, макроотклонения, м; v_w, v_M – параметр степенной аппроксимации начального участка опорной кривой соответственно волнистости, макроотклонения; t_{mw}, t_{mM} – относительная длина опорной линии на уровне средней линии соответственно волнистости, макроотклонения; A – номинальная площадь контакта, м; E – модуль упругости первого рода, Па; Ra – среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости, м.

Опорная площадь контакта находится из выражения [2]

$$A_c = \frac{At_{m1_w} t_{m1_M}}{Wp_1^{v_{w1}}} y_{n1} \text{ (м}^2\text{)}.$$

Число контактов при взаимодействии двух шероховатых поверхностей определяется по формуле [2]:

$$m = \frac{A_c t_{m1} t_{m2} k_1 k_2 y_{n1}^{z_1+z_2}}{(S_m S_{m,np})_{\max}},$$

где k_1, k_2 – коэффициенты, зависящие от параметров шероховатости n и v , определяются они из источника [2].

Вибрационное перемещение $\varepsilon_{в.прц}$ деталей приспособления и закрепленной заготовки в станочном приспособлении определяется:

для безударного резания заготовки

$$\varepsilon_{в.прц} = V_n t_o \text{ (м);}$$

при ударном резании заготовки

$$\varepsilon_{в.прц, \max} = V_n t_o \text{ (м);}$$

$$\varepsilon_{в.прц, \min} = V_n t_{y\delta} n_{y\delta} \text{ (м),}$$

где t_o – основное время обработки заготовки, с; V_n – скорость перемещения детали приспособления или заготовки, м/с; $t_{y\delta}$ – время удара при резании, с; $n_{y\delta}$ – количество ударов (врезаний) режущей кромкой инструмента по поверхности заготовки за основное время ее обработки, шт.

Под воздействием вибрационных сил, имеющих закон изменения во времени близкий к гармоническому, скорость перемещения приспособления, элементов приспособления или заготовки определяется по формуле [1]

$$V_n = q \varepsilon_{в.к.и} \omega \cos \frac{\pi (F_{mp, \max} - F_{сд})}{F_{mp, \max} + F_{mp, \min}}, \quad (3)$$

где q – коэффициент, учитывающий тип контакта ($q = 1$ при движении рассматриваемого тела по плоскости); ω – угловая частота вибрации, рад/с; $F_{mp, \max}, F_{mp, \min}$ – максимальная и минимальная силы трения в рассматриваемом сопряжении двух тел, Н; $F_{сд}$ – сдвигающая сила, приложенная к рассматриваемым телам и направленная вдоль их сопряжения, Н.

Частота вибрационных колебаний определяется угловыми частотами колебаний внешних сил. Угловая частота колебаний внешних сил при фрезеровании находится в пределах 60...1500 рад./с ($\omega = \pi n_{\phi} z_{\phi} / 30$, где n_{ϕ} – число оборотов шпинделя с фрезой, z_{ϕ} – количество зубьев фрезы), при однолезвийном растачивании и точении 30...400 рад./с.

Основой применимости формулы (3) является выполнение такого условия:

$$F_{mp, \min} < F_{сд} < F_{mp, \max}.$$

Максимальное значение силы трения в сопряжении двух тел определяется коэффициентом трения покоя f_n , минимальное значение динамическим эффективным коэффициентом трения f_{δ} .

Время удара при резании определяется по формуле

$$t_{y0} = \frac{P_p}{j_{mc}V},$$

где P_p – сила резания, Н; j_{mc} – минимальная жесткость технологической системы, Н/м; V – скорость удара в направлении нормальном зоне контакта двух тел, м/с.

Скорость удара равна скорости резания материала. При любом виде обработки резанием удар возникает при врезании режущей кромки инструмента в материал заготовки.

Выводы. Проводимые нами работы показали, что динамические характеристики приспособления могут существенно изменять параметры всей технологической системы и, главным образом, влиять на положение заготовки в пространстве, что прямо связано с точностью и качеством обработки. В частности, погрешность установки, определенная с учетом динамических характеристик, увеличивается на 12–33 %, а коэффициент трения уменьшается на 40–50 %, что существенно сказывается на расчетах необходимых сил закрепления деталей.

Поэтому исследования, связанные с динамикой приспособлений, позволяют уточнить эксплуатационные характеристики приспособлений и создавать оптимальные конструкции, обеспечивающие требуемое качество.

Оперируя значениями вибрационных колебаний и перемещений деталей приспособления или обрабатываемой заготовки, динамических эффективных коэффициентов трения, можно не только более точно определить погрешность установки заготовки в приспособлении, но и управлять ее на этапе конструкторско-технологической подготовки производства.

ЛИТЕРАТУРА:

1. *Блехман И.И.* Вибрационная механика. – М.: Физматлит, 1994. – 400 с.
2. *Рыжов Э.В., Колесников Ю.В., Сулов А.Г.* Контактное взаимодействие твердых тел при статических и динамических нагрузках. – К.: Наукова думка, 1982. – 169 с.
3. *Ерохин В.В.* Виброустойчивость станочных приспособлений / Справочник. Инженерный журнал, 2005. – № 3. – 64 с.
4. *Ерохин В.В.* Проектирование станочного приспособления из условия минимального коэффициента перегрузки: Справочник. Инженерный журнал. – 2005. – № 9. – 64 с.

ЕРОХИН Виктор Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Брянского государственного технического университета.

Научные интересы:

- технология машиностроения;
- усовершенствование станочных приспособлений.

ИЛЬИЦКИЙ Валерий Борисович – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Брянского государственного технического университета.

Научные интересы:

- технология машиностроения;
- усовершенствование станочных приспособлений.

Подано 13.03.2006