

## СИЛА РЕЗАНИЯ ПРИ МОДУЛИРОВАННОМ ИЗМЕНЕНИИ ПОДАЧИ

Процесс резания с модулированной подачей протекает под действием ряда факторов, в результате которых значение и направление силы резания носят переменный характер. К этим факторам в первую очередь относятся: периодическое изменение толщины среза; изменение кинематики процесса; периодическое перемещение режущей кромки резца в слое металла, наклепанного в меньшей степени, чем при точении с постоянной подачей. Действие указанных факторов приводит к существенному изменению физических процессов, протекающих в зоне пластического деформирования металла. Одновременно происходит непрерывное изменение условий трения по передней и задней поверхностям инструмента.

Периодическое изменение толщины среза, которая пропорциональна подаче  $s$ , на изменение силы резания влияет более существенно, чем другие факторы. Известно, что сила резания связана с глубиной резания и подачей нелинейной зависимостью

$$P = C_p t^{x_p} s^{y_p}. \quad (1)$$

Значения постоянных коэффициентов  $C_p$  и показателей степени  $x_p$  и  $y_p$  зависят от свойств обрабатываемого материала, геометрических параметров режущей части резцов, условий смазки, охлаждения и т.д. Практически для всех конструкционных сталей общего назначения величина  $y_p$  находится в пределах  $0,5 < y_p < 1$ . Это указывает на то, что удельная сила резания с ростом толщины среза уменьшается. По этой причине среднее значение силы резания при модулированной подаче должно быть меньше силы резания при точении с постоянной подачей, равной среднему значению модулированной.

При модулированном изменении подачи текущее значение подачи на оборот в случае ее возрастания от минимума до максимума может быть подсчитано по формуле

$$s_o = \frac{s_H \Delta L}{\Delta s} \left( 1 - \frac{1}{e^{\frac{\Delta s}{\Delta L} t_o}} \right) e^{\frac{\Delta s}{\Delta L} t_s}, \quad (2)$$

где  $s_H$  — начальная скорость подачи, мм/мин;  $\Delta s$  — величина одного наброса подачи, мм/мин;  $\Delta L$  — длина обработки между набросами подачи, мм;  $t_o$  — время одного оборота детали;  $t_s$  — текущее время обработки с переменной подачей.

Подставляя в зависимость (1) значение  $s_o$  из выражения (2), получим формулу для расчета текущего значения, например, тангенциальной составляющей силы резания  $P_z$  при возрастании подачи:

$$P_z = C_P t^x P_P \left[ \frac{s_H \Delta L}{\Delta S} \left( 1 - \frac{1}{e^{\frac{\Delta s}{\Delta L} t_s}} \right) \right] Y_P. \quad (3)$$

Проинтегрировав выражение (3) по времени  $t_s$  изменения подачи от минимума до максимума и разделив на длину интервала интегрирования, получим формулу для расчета среднего значения  $P_z$  :

$$\bar{P}_z = C_P t^x P_P \left[ \frac{s_H \Delta L}{\Delta S} \left( 1 - \frac{1}{e^{\frac{\Delta s}{\Delta L} t_o}} \right) \right] Y_P \frac{1}{t_s} \int_0^{t_s} e^{\frac{\Delta St_s}{\Delta L}} Y_P dt_s.$$

После преобразований

$$\bar{P}_z = C_P t^x P_P \left[ \frac{s_H \Delta L}{\Delta S} \left( 1 - \frac{1}{e^{\frac{\Delta s}{\Delta L} t_o}} \right) \right] \frac{\Delta L}{Y_P \Delta St_s} \left( e^{\frac{Y_P \Delta St_s}{\Delta L}} - 1 \right).$$

Для случая изменения подачи от  $s_H = 0,2$  мм/об до  $s_K = 0,4$  мм/об на длине 0,4 мм при точении заготовок из стали 45 диаметром 70 мм среднее расчетное значение составляющей силы резания  $P_z$  составило 90,6 % от силы  $P_z$ , полученной при точении с постоянной подачей, равной среднему значению модулированной.

Изменение подачи приводит к изменению углов  $\gamma$  и  $\alpha$ . Наибольшее влияние на силу резания оказывает угол  $\gamma$ . Периодическое увеличение (уменьшение) переднего угла приводит к изменению деформаций в зоне резания (происходит периодическое изменение величины угла скалывания  $\beta$ ). С ростом угла скалывания уменьшается коэффициент усадки стружки, что указывает на уменьшение интенсивности сдвига, т.е. на облегчение процесса резания. С изменением переднего угла изменяются также условия трения стружки о переднюю поверхность. Увеличение  $\gamma$  ведет к уменьшению силы трения. Это осуществляется за счет уменьшения площади контакта передней поверхности со стружкой. Уменьшение интенсивности сдвига и силы трения обеспечивает в результате уменьшение удельной силы резания.

Изменение заднего угла  $\alpha$  на величину силы резания влияет в меньшей степени. С уменьшением  $\alpha$  увеличивается площадь контакта задней поверхности резца с упруговосстанавливающимся металлом обрабатываемой детали, что ведет к увеличению силы трения, а следовательно, и силы резания. Интенсивность влияния угла  $\alpha$  на силу резания по сравнению с влиянием угла  $\gamma$  незначительна.

При точении с модулированной подачей фактическая толщина срезаемого слоя определяется относительным положением поверхностей резания на предыдущем и последующем оборотах детали, т.е. зависит от параметров модулированной подачи и частоты вращения детали. При определенном соотношении параметров модулированной подачи и частоты вращения шпинделя (наличии

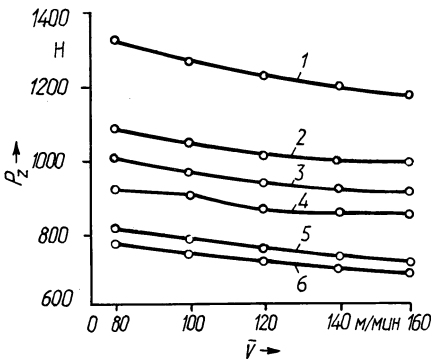


Рис. 1. Зависимости составляющей силы резания  $P_z$  от скорости резания при точении с постоянной и модулированной подачами:

1 —  $s_{const} = 0,4$  мм/об; 2 —  $s_{max} = 0,4$  мм/об при модулированном изменении подачи; 3 —  $s_{const} = 0,3$  мм/об; 4 —  $s_{cp} = 0,3$  мм/об при модулированном изменении подачи; 5 —  $s_{const} = 0,2$  мм/об; 6 —  $s_{min} = 0,2$  мм/об при модулированном изменении подачи

сдвига фаз траекторий перемещения режущей кромки резца на двух смежных оборотах детали) можно добиться явления, когда большая толщина среза будет совпадать с большим действительным углом  $\gamma$ , а малая — с меньшим. В этом случае средняя сила резания будет меньше, чем при точении с постоянной подачей, равной среднему значению модулированной.

Наличие сдвига фаз приводит также к уменьшению среднего значения силы резания вследствие периодического перемещения режущей кромки резца в ненаклепанном или менее наклепанном на предыдущем обороте детали слое металла. Подобное явление наблюдается при точении с вибрациями в направлении подачи.

Изменение силы резания при точении с модулированной подачей исследовали при точении заготовок из стали 45 на различных режимах резания. Зависимости составляющих силы резания  $P_z$  от скорости резания при точении с постоянной и модулированной подачей приведены на рис. 1. Графики построены по средним значениям десяти замеров. Параметры модулированной подачи были приняты следующими  $s_{min} = 0,2$  мм/об;  $s_{max} = 0,4$  мм/об;  $L = 0,4$  мм;  $\Delta L = 0,01$  мм;  $\Delta s = 1,2$  мм/мин. Из графиков видно, что при точении с модулированной подачей средние значения составляющей силы резания  $P_z$  по сравнению с обычным резанием уменьшаются во всем диапазоне исследуемых скоростей. Это указывает на уменьшение работы, совершаемой при точении с модулированной подачей, что также благоприятно сказывается на условиях работы инструмента. Пиковые значения составляющей силы резания  $P_z$  также меньше составляющей силы резания  $P_z$  при точении с постоянной подачей, равной пиковому значению модулированной подачи. Причем больше всего это выражено для верхнего пикового значения подачи. Предполагается, что это связано с тем, что скорость изменения подачи по мере приближения к ее верхнему пиковому значению возрастает, поэтому эффект отставания силы резания от подачи проявляется в большей степени.