

УДК 621.787.4

ОБРАБОТКА ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ СОВМЕЩЕННЫМ РЕЗАНИЕМ И ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Отений Я.Н., Лаврентьев А.М., Вирт А.Э.

Камышинский технологический институт, филиал Волгоградского государственного технического университета, Камышин, e-mail: 100roj@mail.ru

В статье рассмотрены особенности обработки совмещенным резанием и поверхностным пластическим деформированием наружной поверхности тонкостенных труб. Представлена расчетная схема совмещенной обработки резанием и поверхностным пластическим деформированием, включающая в себя два устройства, осуществляющих обработку поверхностным пластическим деформированием наружной поверхности тонкостенной трубы с автоматической подачей, и режущей головкой, установленной между ними. Приведена схема совмещенной обработки резанием и поверхностным пластическим деформированием. На схеме показано, что силы резания, возникающие при точении пытаются остановить заготовку, затрудняя обработку деталей с самоподачей. На основании приведенной схемы получены расчетные зависимости для определения рациональной величины срезаемого слоя с наружной поверхности тонкостенной трубы при усилении деформирования, обеспечивающего обработку поверхностным пластическим деформированием, и не приводящем к остаточным деформациям стенки трубы.

Ключевые слова: совмещенная обработка, режущая головка, поверхностное пластическое деформирование

PROCESSING THIN-WALLED TUBES COMBINED CUTTING AND SURFACE PLASTIC DEFORMATION

Oteny Y.N., Lavrentiev A.M., Virt A.E.

Kamyshin Tecnological Institute, branch of the Volgograd State Technical University, Kamyshin, e-mail: 100roj@mail.ru

The article describes the features of processing combined cutting and surface plastic deformation of the outer surface of the thin-walled tubes. It presents the design scheme of the combined machining and surface plastic deformation, which includes two devices performing processing by superficial plastic deformation of the outer surface of the thin-walled tube with automatic feed, and the cutting-head mounted between them. The scheme combined machining and surface plastic deformation. The diagram shows that the cutting forces that arise when trying to stop the turning of the workpiece, making it difficult for the processing of parts with self-serve. Based on the above diagram obtained calculated dependences for determining the value of a rational cutting layer to the outer surface of a thin-walled pipe at deformation effort, providing the processing surface plastic deformation, and does not lead to permanent deformation of the pipe wall.

Keywords: combined treatment, cutter head, surface plastic deformation

В машиностроительном производстве обработка длинных валов и труб представляет значительные сложности, связанные с их недостаточной жесткостью. Еще большие проблемы возникают при обработке тонкостенных труб. Длинными считаются валы и трубы, для которых отношение длины к диаметру определяется из неравенства $L/d > 10$. В машиностроении в ряде случаев применяются трубы, длина которых составляет несколько метров, а указанное соотношение превышает значения $L/d > 100$. К таким деталям относятся детали многих товаров широкого потребления: инвалидные коляски, детали офисной и бытовой мебели, элементы оформления интерьеров офисов магазинов, аптек и других общественных помещений. Как правило, в качестве заготовок для изготовления перечисленных деталей применяются трубы толщиной стенок $h_{тр} = 1 \dots 3$ мм диаметрами $d = 10 \dots 50$ мм. В этих случаях к точности наружных диаметров труб не предъявляют высоких требований, однако устанавлива-

ются жесткие требования по обеспечению шероховатости наружной поверхности в пределах $Ra = 0,16 \dots 0,32$ мкм. Традиционный метод обработки указанных деталей сводится к трудоемкому процессу шлифования на бесцентрово-шлифовальных станках с последующей доводкой при помощи полировки.

Одним из возможных методов обработки длинных валов и тонкостенных труб диаметрами 10...32 мм и толщиной стенки 1...3 мм является совмещенное резание и поверхностное пластическое деформирование (ППД) роликами [1]. Схема обработки представлена на рис. 1.

Установка для совмещенной обработки резанием и ППД представляет собой два установленных соосно друг с другом обкатника постоянного усилия 1 и 2, между которыми расположена режущая головка 3. Деформирующие ролики 4 в обкатниках вращаются за счет фрикционного взаимодействия с опорными конусами 5, получающими вращение от привода на чертеже не

показанного. Ролики 4, нагруженные в осевом направлении постоянным усилием Q , вращают в свою очередь, обрабатываемую деталь 6. Подача детали в продольном направлении обеспечивается самозатягиванием (самоподачей), возникающей в результате установки роликов 4 на угол самозатягивания ω по отношению к оси детали.

Второй обкатчик осуществляет окончательную отделочную обработку поверхностным пластическим деформированием (ППД) для достижения низкой шероховатости в пределах $R_a = 0,12 \dots 0,32$ мкм. При указанной схеме осуществляется обработка тонкостенных труб напроход, что создает предпосылки для автоматизации процесса.

Оптимизация решения этой задачи сводится к нахождению таких параметров контактной зоны между деформирующим роликом и обрабатываемой поверхностью и условий деформирования, которые обеспечили бы требуемый крутящий момент при ограничениях по максимальной радиальной нагрузке приложенной к трубе и предотвращении недопустимого прогиба стенки трубы, а также обеспечении заданного качества поверхностного слоя.

В качестве функции цели данной оптимизационной задачи в работе [1] получено выражение для определения прогиба стенки трубы от распределенных по площади контакта между роликом и обрабатываемой поверхностью напряжений

$$\Delta R_{mp} = - \int_0^{L_k} \int_{-z_k}^{z_k} \left(\frac{0,135 \sigma_k R_{mp}}{E \cdot h_{mp}^3} \right) e^{-\eta \sqrt{z^2 + l_k^2}} \left[\cos(\eta \sqrt{z^2 + l_k^2}) + \sin(\eta \sqrt{z^2 + l_k^2}) \right] dz dl_k \leq [\Delta R] \rightarrow \min, \quad (1)$$

где L_k – общая длина контакта; z_k – изменение полуширины контакта между роликом и обрабатываемой деталью в зависимости от его длины; σ_k – распределение контактных напряжений; R_{tr} – радиус обрабатываемой трубы; h_{mp} – толщина стенки трубы; z – текущая координата полуширины контакта; E – модуль упругости; l_k – текущая координата длины контакта; $\eta = 0,135/R_{mp}$; $[\Delta R]$ – допустимое значение прогиба стенки трубы.

Обеспечение минимального прогиба стенки трубы при заданной производительности и качестве поверхностного слоя определяется соответствующим выбором конструктивных параметров деформирующих роликов, усилием деформирования, режимами обработки, количеством деформирующих роликов одновременно устанавливаемых в обкатниках. Чем больше роликов, тем меньше будет нагрузка на каждый из них.

Другим возможным вариантом является увеличение размеров контактной зоны и рационального распределения напряжений по площади контакта, желательно более равномерного.

Количество роликов, установленных одновременно по окружности детали имеет ограничения по конструктивным соображениям. На практике ролики диаметром меньше 10 мм, как правило, не применяются. Увеличение площади контакта может быть достигнуто за счет увеличения длины контактной зоны и ее ширины. Ширина контактной зоны будет тем больше, чем больше диаметр применяемого ролика и усилие деформирования. Как показывают расчеты, ширина контакта за счет этих параметров изменяется незначительно. Поэтому основным параметром, за счет которого можно увеличить площадь контакта является длина контакта.

В производственной практике используется два вида контактных зон: эллипсный и каплевидный. Первый вид контакта образуется деформирующими роликами, имеющими рабочую поверхность в виде тора. Они имеют большие диаметры за счет установки на подшипники качения, поэтому их количество в инструменте ограничено размерами подшипников. Каплевидные отпечатки получаются при обработке коническими роликами относительно небольших диаметров (10...20 мм) (рис. 2). Особенности каплевидного отпечатка является то, что за счет увеличенной глубины его внедрения на начальном (заходном) участке обеспечивается требуемая пластическая деформация и необходимое качественное преобразование поверхностного слоя; на остальном участке

(участке сбеге) происходит выравнивание деформаций, за счет чего предотвращается появление волнистости. Получение каплевидного контакта достигается установкой ролика на угол внедрения $\alpha = 0,5 \dots 1^\circ$.

Исходя из изложенного, можно записать следующие равенства и неравенства, накладывающие ограничения на функцию цели (1).

$$\begin{aligned} z_p \leq b_1; s_o \leq b_2; f = b_3; r_{np} \leq b_4; h_m \leq b_5; \\ V \leq b_6; \theta = b_7; \sigma_T = b_8; \sigma_B = b_{10}; t \leq b_{11}. \end{aligned} \quad (2)$$

где s_o – подача инструмента на оборот; f – коэффициент трения между деформирующим роликом и опорным конусом; r_{np} – профильный радиус заборной части конического ролика; h_m – глубина внедрения ролика в поверхность детали; V – скорость резания (раскатывания); θ – угол конусности ролика; σ_T, σ_B – предел текучести и предел временного сопротивления обрабатываемого материала; t – глубина резания; $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_{10}, b_{11}$ – ограничения на функции цели.

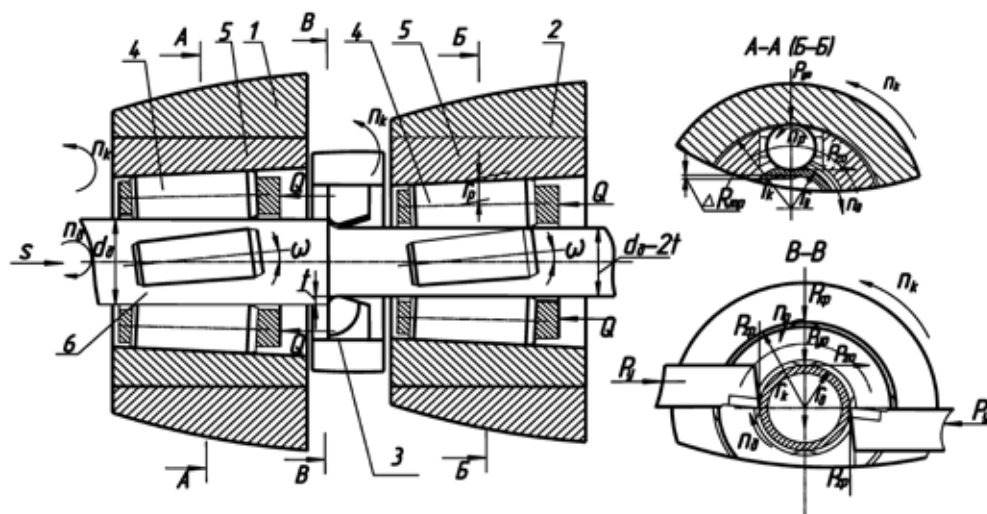


Рис. 1. Схема совмещенной обработки резанием и ППД:
1, 2 – обкатники; 3 – резцовая головка; 4 – деформирующие ролики; 5 – опорный конус

а

б

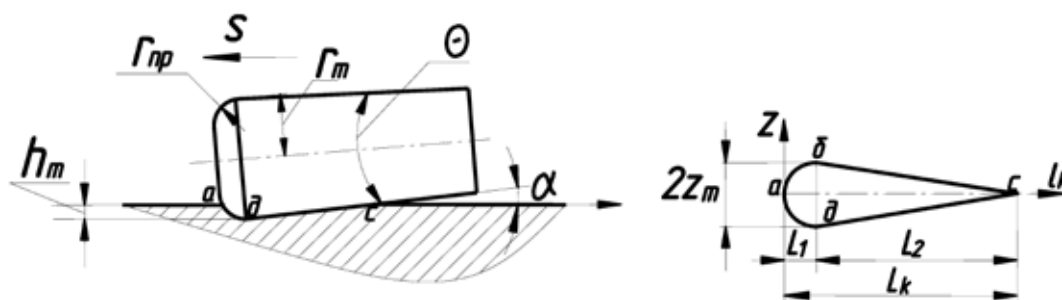


Рис. 2. Внедрение ролика в поверхность детали при обработке поверхностным пластическим деформированием (а) и форма и размеры каплевидного контакта, образуемого при обработке цилиндрических поверхностей коническими роликами (б)

Приведенные равенства и неравенства необходимо дополнить функциональными зависимостями связи геометрических параметров деформирующих роликов с геометрическими параметрами контактной зоны, контактными напряжениями, усилием деформирования и глубиной упрочнения. Методика определения этих параметров приведена в работе [1]. Ниже приводятся зависимости для определения указанных параметров. При обработке коническими роликами контактная зона является каплевидной, состоящей из заходного участка, обозначенного в формулах индексом 1 и участка сбega, индекс 2 (рис. 2).

Изменение радиуса ролика по длине контакта l_k :

$$r_{p1} = r_m - \sqrt{r_{np}^2 - (L_1 - l_k)^2} \quad \text{при} \quad 0 \leq l_k \leq L_1; \quad (3)$$

$$r_{p2} = r_m + (l_k - L_k) \cdot \operatorname{tg} \theta \quad \text{при} \quad L_1 \leq l_k \leq L_k, \quad (4)$$

где r_m – радиус ролика соответствующий максимальному его внедрению в поверхность детали (в сечении б-б на рис 1); L_1 – длина заходного участка каплевидного контакта; L_2 – длина участка сбega; L_k – общая длина контакта.

Длина контакта на заходном участке и участке сбега, а также полная длина контакта определяется по формулам

$$L_1 = \sqrt{r_{np}^2 - (r_{np} - h_m)^2}; L_2 = \frac{h_m}{\operatorname{tg} \alpha};$$

$$L_k = L_1 + L_2. \quad (5)$$

Изменение глубины внедрения ролика по длине контакта

$$h_{p1} = r_{np} - \sqrt{r_{np}^2 - l_k^2} \text{ при } 0 \leq l_k \leq L_1; \quad (6)$$

$$h_{p2} = h_m - (l_k - L_k) \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

при $L_1 \leq l_k \leq L_k$ (7)

Изменение полуширины контакта по его длине

$$z_{k1,2} = \sqrt{R_o^2 - \left[\frac{(R_o - r_{p1,2}) \cdot (R_o + h_{p1,2})}{R_o - (r_{p1,2} + h_{p1,2})} \right]^2}, \quad (8)$$

где в этой и нижеприведенных формулах индекс 1, применяется при расчете полуширины на заходном участке, а индекс 2 – на участке сбега.

Радиальное усилие деформирования P_{oy} выбирается из условий достижения заданного качества поверхностного слоя. Усилие деформирования будет различным на первичной и вторичной зонах контакта. В первичной зоне контакта (участок контакта, обозначенный буквами абса) происходит упругопластическое деформирование детали. На вторичном участке (участок адса) происходит упругое восстановление металла. На этих участках усилия деформирования вычисляются по формулам (9), (10)

$$P_{y1,2} = \int_0^{L_k} \int_0^{z_k} A \left[\frac{\mp D}{(R \mp h_p) \cos \varphi} \times \right. \\ \left. \times \left(\sin \beta \mp \sin \left(\frac{D \cdot \beta}{r_p} \right) \right) \right]^m dz dl_k, \quad (9)$$

$$P_{yn1,2} = \int_0^{L_k} \int_0^{z_k} \sigma_{\max} \sqrt{1 - \left(\frac{z_k - z}{z_k} \right)^2} dz dl_k, \quad (10)$$

где $\beta = \frac{r_p}{R_o - h_p} \arcsin \frac{z}{r_p}$; $D = R_o - r_p + h_p$;

z – текущая координата полуширины контакта; A и m постоянные коэффициенты, зависящие от механических свойств обрабатываемого материала.

Если по окружности детали установлено z_p роликов, то суммарное тангенциальное усилие обкатывания, вызывающее крутящий момент, преодолевающий силы резания P_z , будет равно:

$$P_{oz} = P_{oy} z_p f, \quad (11)$$

где z_p – количество роликов; f – коэффициент трения между поверхностями деформирующего элемента и обрабатываемой детали.

Сила резания вычисляется по формуле [3]

$$P_z = 10 C_{pz} s_o^y t^x V^n K_u, \quad (12)$$

где C_{pz} , y , x , n , K_u – коэффициенты, выбираемые по справочнику [3].

Совместное решение уравнений (1) и (2) позволяет получить значение максимально возможной глубины резания для заданных условий обработки:

$$t = \left(\frac{P_{oy} \cdot f \cdot z_p}{P_z} \right)^{1/x} \leq b_{11};$$

$$\Delta R_{\text{тр}} \leq [\Delta R_{\text{тр}}]. \quad (13)$$

Если неравенства $t \leq b_{11}$ и $\Delta R_{\text{тр}} \leq [\Delta R_{\text{тр}}]$ не выполняются, то производится корректировка исходных данных до тех пор, пока не будет достигнут требуемый результат.

Список литературы

1. Отений Я.Н. Технологическое обеспечение качества деталей машин поверхностным пластическим деформированием: Монография / ВолгГТУ. – Волгоград, 2005. – 224 с.
2. Патент Российской Федерации № 2247016. Способ комбинированной режущо-деформирующей обработки и устройство для его осуществления / Смольников Н.Я., Отений Я.Н., Никифоров Н.И., Журавлев А.И.
3. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Суслова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение-1, 2001.
4. Справочник машиностроителя в 6 томах. т.3. Под ред. академика АН УССР С.В. Серенсена. Изд. третье. – М.: Машгиз, 1962. – 651 с.
5. Шнейдер Ю.Г. Инструмент для чистовой обработки металлов давлением. – Л: Машиностроение, 1971. – 248 с.