

УДК 621.73.06–52

Пыщ Я. Е., Пыщ Е. Я

## ВЛИЯНИЕ СИЛ ТРЕНИЯ И СМАЗКИ НА КРУТЯЩИЙ МОМЕНТ И ТЕМПЕРАТУРУ ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК ПРИ РОТАЦИОННОЙ ОБКАТКЕ

Обработка материалов в машиностроении в настоящее время развивается в направлениях, связанных с повышением производительности, качества и эффективности производства, экономии материальных и энергетических ресурсов, повышением качества выпускаемых изделий и полуфабрикатов, сокращением себестоимости производства. Решение этих задач невозможно без применения прогрессивных ресурсосберегающих способов обработки материалов давлением [1].

К прогрессивным ресурсосберегающим способам обработки металлов давлением относятся технологию ротационной обкатки полых изделий фрикционным инструментом. Эта технология имеет существенные преимущества при производстве деталей и полуфабрикатов типа полых корпусов фильтров и гидроцилиндров, переходов, баллонов, роликов ленточных конвейеров и других осесимметричных деталей. Она достаточно просто реализуется на современном оборудовании и легко поддается механизации и автоматизации. Кроме того, обеспечивается существенное уменьшение металлоемкости изделий и трудоемкость обработки [2].

Процесс роторной обкатки в ряде случаев может конкурировать с ковкой, объемной и листовой штамповкой. [3]. Воплощение технологии не требует больших капитальных затрат, возможно использование существующего металлообрабатывающего оборудования, что важно при мелкосерийном и индивидуальном производстве. При изготовлении деталей крупными сериями или массовом производстве процесс рационально реализовать по схеме роторной обкатки с использованием роторной обкаточной машины.

При ротационной обкатке фрикционным инструментом в заготовке генерируется значительное количество тепла, использование которого для нагрева деформируемой части заготовки существенно уменьшает потребность в энергоресурсах [4].

Деформирование трубчатой заготовки фрикционным инструментом трения – достаточно сложный и неустойчивый процесс, для которого характерна локализация пластической деформации, величина зоны влияния которой значительно меньше величины деформируемой части заготовки. При таком процессе зона деформации постоянно перемещается вдоль поверхности трубы, симметричная форма поперечного сечения которой в процессе деформирования не сохраняется. При ротационной обкатке непрерывно изменяются длина обкатываемого участка, размеры поверхности контакта, толщина стенки и температурное поле трубы, а также энергосиловые параметры процесса [5, 6].

Целью настоящей работы является анализ влияния сил трения, в том числе наличия и эффективности смазки, на крутящий момент и температуру нагрева при ротационной обкатке трубчатых заготовок.

Процесс обкатки (рис. 1) применяют в производстве бесшовных газовых баллонов: трубчатой заготовке 1 с нагретым до ковочной температуры концом сообщают вращение вокруг своей оси  $X$ ; одновременно инструменту 2 – поступательное движение вдоль оси  $Y$  и  $Z$ . Создаваемое локальное давление инструмента на металл обеспечивает деформацию заготовки до заданного инструментом профиля. Деформация происходит в процессе трения-скольжения между инструментом и заготовкой [7].

Используя тарировочные графики по смазке и действующим нагрузкам, а также опытные данные, были выведены формулы, используя которые возможно определить крутящий момент при наличии и отсутствии смазки.

Момент инерции неизменяемой части трубы:

$$I_1 = m_1 \cdot \frac{R_1^2 + R_2^2}{2}, \quad (1)$$

где  $R_1$  – внешний радиус трубы;  
 $R_2$  – внутренний радиус трубы;  
 $m_1$  – масса неизменяемой части трубы.

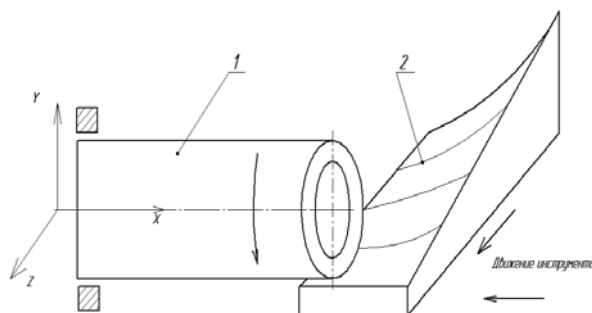


Рис. 1. Схема обкатки трубчатой заготовки:  
 1 – заготовка; 2 – инструмент трения

Момент инерции изменяемой части трубы:

$$I_2 = m_2 \cdot \frac{R_1^2 + R_2^2}{2}, \quad (2)$$

где  $R_1$  – внешний радиус трубы;  
 $R_2$  – внутренний радиус трубы;  
 $m_2$  – масса изменяемой части трубы.  
 Крутящий момент при наличии смазки:

$$M = (I_1 + I_2) \cdot \varepsilon - M_{\text{тр}1}, \quad (3)$$

где  $I_1$  – момент инерции неизменяемой части трубы;  
 $I_2$  – момент инерции изменяемой части трубы;  
 $\varepsilon$  – угловое ускорение;  
 $M_{\text{тр}1}$  – момент трения-скольжения со смазкой.  
 Крутящий момент при отсутствии смазки:

$$M = (I_1 + I_2) \cdot \varepsilon - M_{\text{тр}2}, \quad (4)$$

где  $I_1$  – момент инерции неизменяемой части трубы;  
 $I_2$  – момент инерции изменяемой части трубы;  
 $\varepsilon$  – угловое ускорение;  
 $M_{\text{тр}2}$  – момент трения-скольжения без смазки.

Существенным влиянием на крутящий момент при ротационной обкатке труб, как нам кажется, обладает также общее тепловое состояние деформируемой частим заготовки.

В трубчатой заготовке с момента начала контакта заготовки с инструментом до окончания обкатки происходят тепловые процессы, которые зависят от конвективного, контактного и лучистого теплообмена обкатываемой части заготовки с окружающей средой и с недеформируемой частью заготовки. Одновременно происходит генерация тепла и его потери [8].

Потери тепла происходят вследствие излучения и конвекции в окружающую среду, контактного теплообмена с инструментом и теплопередачи от нагретой к не нагретой части заготовки [9].

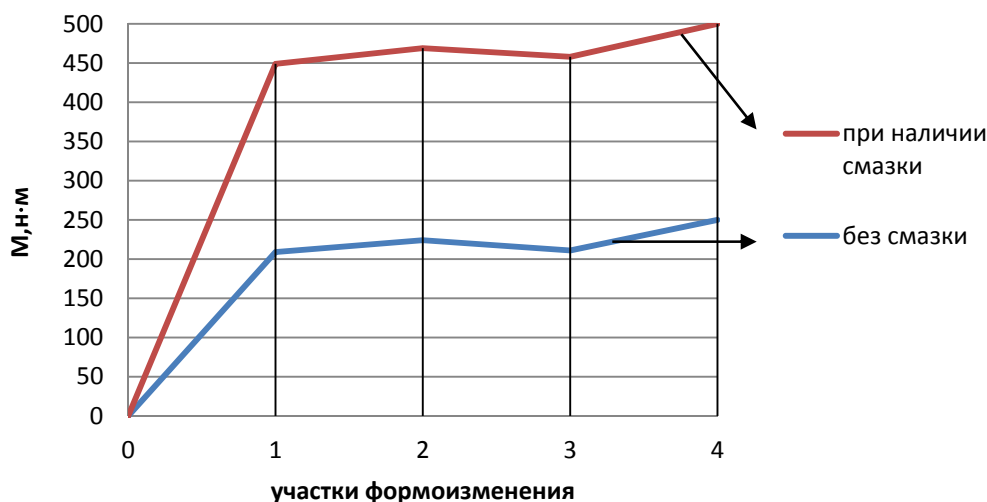


Рис. 2. Изменение крутящего момента при наличии и отсутствии смазки на различных участках формоизменения

Повышение температуры заготовки осуществляется за счет генерации тепла в результате работы, затрачиваемой на деформацию и трение между заготовкой и инструментом. Причем, на этапе обкатки потери и генерация тепла происходят одновременно [10].

Таким образом, уравнение температурного баланса запишем в виде [11]:

$$T^{i+1} = T^i - \Delta T_n^i + \Delta T_z^i, \quad (5)$$

где  $T^i$  – температура заготовки в начале  $i$ -го оборота, К,

$T^{i+1}$  – температура заготовки в конце  $i$ -го оборота, К,

$\Delta T_n^i$  – потери тепла в течение  $i$ -го оборота, К,

$\Delta T_z^i$  – генерация тепла в течение  $i$ -го оборота.

Согласно [19] потери тепла заготовки в течение  $i$ -го оборота определяем по формуле:

$$\Delta T_n^i = \Delta T_{un}^i - \Delta T_{uz}^i - \Delta T_k^i - \Delta T_{mn}^i, \quad (6)$$

где  $T_{un}^i$  – изменение температуры за счет контактного теплообмена между заготовкой и инструментом на  $i$ -м обороте заготовки, К;

$\Delta T_k^i$  – изменение температуры за счет потери тепла конвекцией в окружающую среду на  $i$ -м обороте заготовки, К;

$\Delta T_{uz}^i$  – изменение температуры за счет потери тепла излучением в окружающую среду на  $i$ -м обороте заготовки, К;

$\Delta T_{mn}^i$  – изменение температуры за счет теплопередачи от нагретой части заготовки к ненагретой на  $i$ -м обороте заготовки, К;

Генерация тепла в течение  $i$ -го оборота определяется по формуле:

$$\Delta T_z^i = \Delta T_\delta^i + \Delta T_{mp}^i, \quad (7)$$

$\Delta T_\delta^i$  – изменение температуры за счет энергии деформации на  $i$ -м обороте заготовки, К;

$\Delta T_{mp}^i$  – изменение температуры за счет работы сил трения на  $i$ -м обороте заготовки, К.

Анализ выражений (5)–(7) показывает, что для определения теплового состояния металла в ходе обработки обкаткой необходимо определить потери тепла за время процесса  $\Delta T_n$  и выяснить, какая часть энергии, затрачиваемой на деформацию трубы и преодоление контактного трения превращается в тепло и, следовательно, оказывает влияние на тепловое состояние металла в очаге деформации. Следует выяснить, как зависит генерация тепла  $\Delta T_z$  от времени процесса и определить функцию распределения температуры по толщине стенки трубы.

Изменение температуры заготовки, вызванное каждым из слагаемых в выражении (6), вычислим независимо друг от друга.

Изменение температуры за счет контактного теплообмена между заготовкой и инструментом  $\Delta T_{ин}$  определим как функцию коэффициента теплопередачи:

$$\Delta T_{ин}^i = (T^i - T_{инс}) \cdot \tau \cdot \alpha \cdot \left( \frac{F}{G \cdot c'} \right), \quad (8)$$

где  $T_{инс}$  – температура инструмента, К;

$\tau$  – время одного оборота заготовки, с;

$G$  – масса деформируемой части заготовки, кг;

$c'$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);

Коэффициент теплообмена  $\alpha$  можно принять:  $\alpha = (6-12) \cdot 10^3$  Вт/м·К. Для аналитического определения величины удельной теплоемкости углеродистых сталей используем зависимость:

$$c' = 4186,8 \cdot 10^3 \cdot \left[ 0,118 + 0,0351 \cdot \left( \frac{T}{T_s} \right) + 0,0143 \cdot \left( \frac{T}{T_s} \right)^2 \right], \quad (9)$$

где  $T$ ,  $T_s$  – соответственно текущая температура заготовки и температура плавления материала заготовки, К.

Изменение температуры за счет излучения в окружающую среду определим на основании следующих рассуждений.

Изменение количества тепла, содержащегося в заготовке, составит:

$$dQ = G \cdot c' \cdot d\tau. \quad (10)$$

С другой стороны:

$$dQ = F_H \cdot T \cdot \alpha_n \cdot d\tau, \quad (11)$$

где  $\alpha_n$  – коэффициент теплообмена излучением, Вт/м<sup>2</sup>·К;

$F_H$  – площадь наружной поверхности обкатываемой части заготовки, м<sup>2</sup>.

Приравняв (10) и (11), получим:

$$G \cdot c' \cdot d\tau = F_H \cdot T \cdot \alpha_n \cdot d\tau.$$

Отсюда:

$$\frac{dT}{T} = \left( \frac{\alpha_n}{G \cdot c'} \right) \cdot F_H \cdot d\tau.$$

В случае обкатки:

$$\Delta T_{из}^i = -T^i \cdot e^{-\frac{\alpha_n \cdot F_H \cdot \tau}{G \cdot c'}}. \quad (12)$$

При расчете изменений температуры за сравнительно малые временные интервалы, значение коэффициента  $\alpha_n$  предпочтительнее рассчитывать по формуле, предложенной в работе [11]:

$$\alpha_n = \frac{T_i^{2,05}}{11400}.$$

Изменение температуры за счет конвективных потерь тепла определяют решением системы уравнений:

$$dQ_k = \alpha_k \cdot (T^i - T_c) \cdot F_H \cdot d\tau,$$

где  $T_c$  – температура газовой среды, К;

$\alpha_k$  – коэффициент теплообмена конвекцией, Вт/м<sup>2</sup>·К.

$$dQ_k = G \cdot c' dT_k.$$

Отсюда следует:

$$\frac{dT_k}{(T^i - T_c)} = \frac{\alpha_k}{G \cdot c'} \cdot F_H d\tau$$

или, в наших обозначениях:

$$\Delta T_k^i = (T^i - T_c) + (T^i - T_c) \cdot e^{-\frac{\alpha_k \cdot F_H \tau}{G \cdot c'}}. \quad (13)$$

Условия обкатки таковы, что точка поверхности вращающейся заготовки движется относительно среды со скоростью 2–10 м/с. Это обстоятельство говорит о том, что происходит вынужденный конвективный теплообмен. Коэффициент теплопередачи  $\alpha_k$  в работе [12] предложено рассчитывать по зависимости:

$$\alpha_k = (0,0221 \cdot T_{гс} + 0,58) \cdot V_l^{0,8} \cdot l_p^{-0,2},$$

где  $T_{гс}$  – температура граничного слоя воздуха, К,

$V_l$  – линейная скорость движения точки поверхности заготовки относительно среды, м/с;

$l_p$  – определяющий размер (длина периметра поперечного сечения заготовки), м.

Изменение температуры за счет теплопередачи от нагретой части трубы к ненагретой определим на основании анализа решения одномерного уравнения теплопроводности:

$$q = \alpha_T \cdot (T^i - T_n),$$

где  $\alpha_T$  – коэффициент теплообмена теплопроводностью, Вт/м<sup>2</sup>К;

$T_n$  – температура ненагретой части заготовки, К.

Отсюда:

$$dQ_{тп} = F_c \cdot \alpha_T \cdot (T^i - T_n) d\tau, \quad (14)$$

где  $F_c$  – площадь поперечного сечения трубы, м<sup>2</sup>.

Приравнявая правые части (10) и (14):

$$G \cdot c' d\tau = F_c \cdot \alpha_T \cdot (T^i - T_n) d\tau,$$

получим:

$$\frac{dT}{(T^i - T_n)} = \left( \frac{\alpha_T}{G \cdot c'} \right) \cdot F_c d\tau.$$

Отсюда в наших обозначениях:

$$\Delta T_{тп}^i = (T^i - T_n) + (T^i - T_n) \cdot e^{-\frac{\alpha_T \cdot F_H \tau}{G \cdot c'}}. \quad (15)$$

Коэффициент  $\alpha_m$  можно определить аналогично  $\alpha$ .

Результаты расчета представлены в виде графических зависимостей распределения температурного поля во времени при постоянной толщине стенки 6 мм и постоянной скорости подачи инструмента 4 мм/с в зависимости от различных частот вращения заготовок.

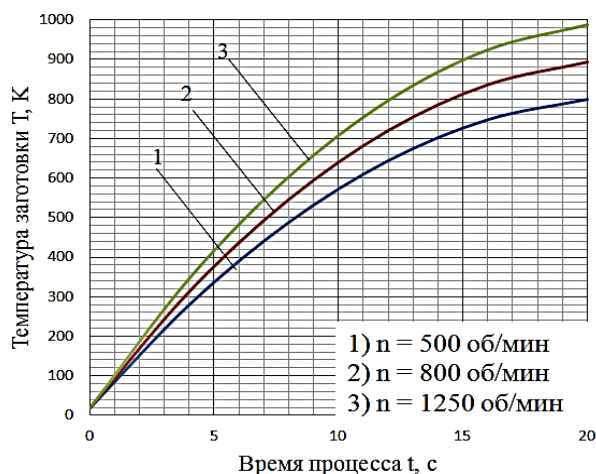


Рис. 3. Расчетные значения роста температуры по времени (при  $V_u = 4,33$  мм/с,  $\delta = 6$  мм)

Учитывая результаты, полученные при расчете зависимости крутящего момента от наличия смазки и анализируя графики зависимости полученных расчетных значений температуры, можно сказать, что при наличии смазки крутящий момент возрастает, что приводит к уменьшению величины работы, затрачиваемой на преодоление сил трения, и, как следствие, уменьшения генерации тепла. Это приводит к снижению общего теплового баланса заготовки и увеличению машинного времени на обработку.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Технология и оборудование ротационной обработки давлением* : монография / Я. Е. Пыц, В. Г. Макшанцев, С. Н. Оборнев, Е. Я. Пыц. – Краматорск : ДГМА, 2012 – 144 с. – ISBN 978-966-379-576-8.
2. Капорович В. Г. Технологические особенности горячей обкатки толстостенных трубчатых заготовок / В. Г. Капорович, Я. Е. Пыц // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 1992. – № 2. – С. 4–6.
3. Пыц Я. Е. Актуальные вопросы производства толстостенных изделий из труб ротационной обкаткой инструментом трения / Я. Е. Пыц // *Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении* : темат. сб. науч. трудов. – Краматорск, 2002. – С. 290–292.
4. *Использование эффекта нагрева трением при обкатке трубчатых заготовок на роторной машине* / Л. Л. Роганов, В. Г. Середя, Я. Е. Пыц, О. О. Чудненко // *Обработка материалов давлением* : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2008. – № 1 (19). – С. 207–211.
5. Капорович В. Г. *Производство деталей из труб обкаткой* / В. Г. Капорович. – М. : Машиностроение, 1978. – 136 с.
6. *Производство изделий машиностроения горячей обкаткой* : монография / В. С. Рыжиков, В. К. Удовенко, В. Г. Середя, М. А. Афанасьева, В. Я. Бражник, В. В. Капорович, С. В. Капорович, А. Н. Кулик, А. В. Маковецкий, В. Г. Макшанцев, В. А. Паламарчук, Я. Е. Пыц, В. И. Юдин ; Под ред. В. С. Рыжикова, В. К. Удовенко. – Краматорск, ДГМА, 2006. – 284 с. – ISBN 966-379-067-9.
7. Пыц Я. Е. Анализ влияния сил трения, а именно смазки, на изменение крутящего момента при ротационной обкатке трубчатых заготовок / Я. Е. Пыц, М. С. Рыбас. // *Студенський вісник*. – Краматорск : ДДМА, 2012. – № 2. – С. 27–30.
8. Пыц Я. Е. *Тепловые процессы при обкатке* / Я. Е. Пыц // *Проблемы развития наукоемких и малоотходных процессов*. – Краматорск, 1997. – С. 22–23.
9. *Об учете тепловых потерь при обкатке толстостенных трубчатых заготовок* / Я. Е. Пыц, С. Н. Оборнев // *Совершенствование процессов и машин обработки металлов давлением* : сб. науч. трудов. – К. : УМК ВО, 1988. – С. 96–101.
10. Ураков В. Ф. *Температурный эффект пластической деформации при резке металла* / В. Ф. Ураков // *Машины и технология обработки металлов давлением* : сб. науч. трудов. – М. : МВТУ им. Баумана, 1967. – С. 21–22.
11. Пыц Я. Е. *Исследование нагрева трубчатых заготовок для ротационной обкатки инструментом трения* / Я. Е. Пыц, В. Г. Макшанцев // *Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении* : Тематич. сборн. научн. трудов. – Краматорск–Славянск, 2000. – С. 301–304.
12. *Теория прокатки* : справочник / Под ред. В. И. Зюзина, Л. В. Третьякова. – М. : Металлургия, 1982. – 335 с.