

УДК 621.73.06-52

Алиев И. С.  
 Пыц Е. Я.  
 Пыц Я. Е.

### РАСЧЕТ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛОКАЛЬНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТРУБЧАТОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ФРИКЦИОННОМ НАГРЕВЕ

Деформирование трубчатой заготовки инструментом трения – достаточно сложный и неустановившийся 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 [1–3].

Цель настоящей работы состоит в анализе силовых факторов и влияния температуры трения на силу деформирования при ротационной обкатке. Для достижения поставленной цели необходимо проанализировать геометрию очага деформации, схема которого представлена на рис. 1.

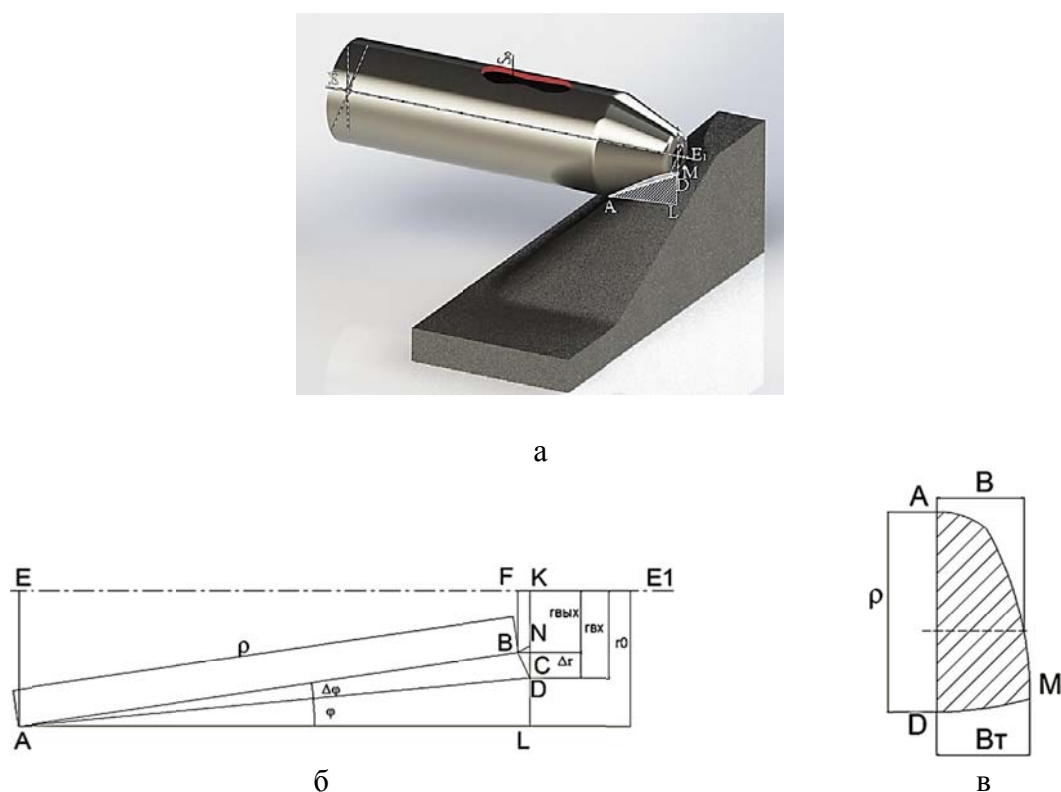


Рис. 1. Геометрические параметры очага деформации:  
 а – схема очага деформации; б – схема для расчета  $\Delta r$ ,  $r_{ex}$ ,  $r_{vyx}$ ; в – схема площади контакта

На рис. 1 приняты следующие обозначения:  $EE_1$  – ось вращения заготовки;  $AD$  – длина образующей в процессе обкатки ( $AD = \rho$ );  $KD = r_{ex}$  – радиус входа заготовки в очаг деформации;  $FB = r_{vyx}$  – радиус выхода заготовки из очага деформации;  $DC = \Delta r$  – изменение радиуса за один оборот заготовки;

Из геометрических соотношений в треугольнике  $ABD$  ( $AB = AD$ ),  $BNC$  и  $BCD$  следует:

$$F = \sqrt{L_m^2 + \rho^2 - B_m^2},$$

где  $F$  – площадь поверхности контакта;

$B_m$  – ширина поверхности контакта по торцу заготовки;

$L_m$  – длина поверхности контакта по торцу заготовки.

Ширина поверхности контакта по торцу заготовки определяется по известной зависимости:

$$B_m = 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{\alpha}{360}.$$

Длина поверхности контакта по торцу заготовки определяется из формулы:

$$L_m = \frac{\pi \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta\varphi \cdot \cos \varphi \cdot (r_0 - \rho \cdot \sin \varphi)} \cdot \alpha}{360}.$$

Расчетная площадь поверхности контакта между заготовкой и деформирующим инструментом имеет вид [2]:

$$F = \sqrt{\left(\frac{\pi \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta\varphi \cdot \cos \varphi \cdot (r_0 - \rho \cdot \sin \varphi)} \cdot \alpha}{360}\right)^2 + \rho^2 - \left(2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{\alpha}{360}\right)^2}$$

Расчет усилий деформирования выполним по аналогии с методикой расчета работ ротационной обкатки, предложенной в [3].

При локальном деформировании сила обкатки включает в себя:

$$P_H = P_D + P_T,$$

где  $P_H$  – сила обкатки;

$P_D$  – сила деформирования;

$P_T$  – сила трения между заготовкой и инструментом.

Согласно [3] силу деформирования при обкатке можно представить как:

$$P_D = P_{\Pi\Phi} + P_{\text{ИП}} + P_{\text{ИМ}} + P_{\text{СК}} + P_{\text{ПР}},$$

где  $P_{\Pi\Phi}$  – сила, направленная на полезное формоизменения;

$P_{\text{ИП}}$  – сила пластического изгиба поперечного сечения заготовки;

$P_{\text{ИМ}}$  – сила пластического изгиба в меридиональном направлении;

$P_{\text{СК}}$  – сила скручивания;

$P_{\text{ПР}}$  – сила продольного изгиба трубчатой заготовки.

Составляющие силы обкатки, затрачиваемые на скручивание и продольный изгиб заготовки, являются случайными, их возникновение связано с некорректной организацией технологического процесса. В нормальных условиях влияние этих составляющих на величину силы обкатки незначительно, поэтому при расчетах  $P_H$  ими можно пренебречь.

$$P_{\text{ин}} = \sum_{i=1}^N \frac{2 \cdot \pi}{l_{\text{обк}} \cdot \sqrt{3} \cdot \sin \varphi_i} \cdot S_0^2 \cdot r_0 \cdot \sigma_s^i \cdot \ln \left( \frac{r_0 + S_0}{S_0 + r_{\text{ex}}} \right).$$

$$P_{ум} = \frac{\sum_{i=1}^N 0.5 \cdot (\pi \cdot r_0 \cdot S_0^2 \cdot \sigma_s^i \cdot \Delta\varphi_i)}{l_{обк}}$$

$$P_{нф} = \sum_{i=1}^N \frac{2 \cdot \pi \cdot r_0}{l_{обк} \cdot \cos \varphi} \cdot \sigma_s$$

$$\cdot \left[ 2 \cdot \sqrt{r_0} \cdot (\sqrt{r_{ex}} - \sqrt{r_{ввх}}) \cdot \left( r_0^2 - \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot r_{cp} + \sqrt{r_{ex} \cdot r_{ввх}}) \right) + \Delta r \cdot (r_0 - r_{cp}) \right]$$

$$P_{\partial} = \sum_{i=1}^N \frac{2 \cdot \pi}{l_{обк} \cdot \sqrt{3} \cdot \sin \varphi_i} \cdot S_0^2 \cdot r_0 \cdot \sigma_s^i \cdot \ln \left( \frac{r_0 + S_0}{S_0 + r_{ex}} \right) + 0.5 \cdot (\pi \cdot r_0 \cdot S_0^2 \cdot \sigma_s^i \cdot \Delta\varphi_i) + \frac{2 \cdot \pi \cdot r_0}{\cos \varphi} \cdot \sigma_s$$

$$\cdot \left[ 2 \cdot \sqrt{r_0} \cdot (\sqrt{r_{ex}} - \sqrt{r_{ввх}}) \cdot \left( r_0^2 - \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot r_{cp} + \sqrt{r_{ex} \cdot r_{ввх}}) \right) + \Delta r \cdot (r_0 - r_{cp}) \right]$$

$$P_{мп} = 2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot \sum_{i=1}^N \frac{P_{cp}^i \cdot F_i}{l_{обк}} \cdot \left( r_0 - \rho \cdot (\sin \varphi^i - \Delta\varphi \cdot \cos \varphi^i) \right)$$

$$P_H = \left( \sum_{i=1}^N \frac{2 \cdot \pi}{l_{обк} \cdot \sqrt{3} \cdot \sin \varphi_i} \cdot S_0^2 \cdot r_0 \cdot \sigma_s^i \cdot \ln \left( \frac{r_0 + S_0}{S_0 + r_{ex}} \right) + 0.5 \cdot (\pi \cdot r_0 \cdot S_0^2 \cdot \sigma_s^i \cdot \Delta\varphi_i) + \frac{2 \cdot \pi \cdot r_0}{l_{обк} \cos \varphi} \cdot \sigma_s \right.$$

$$\cdot \left[ 2 \cdot \sqrt{r_0} \cdot (\sqrt{r_{ex}} - \sqrt{r_{ввх}}) \cdot \left( r_0^2 - \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot r_{cp} + \sqrt{r_{ex} \cdot r_{ввх}}) \right) + \Delta r \cdot (r_0 - r_{cp}) \right] \Bigg) +$$

$$\left( 2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot \sum_{i=1}^N \frac{P_{cp}^i \cdot F_i}{l_{обк}} \cdot \left( r_0 - \rho \cdot (\sin \varphi^i - \Delta\varphi \cdot \cos \varphi^i) \right) \right)$$

где  $S$  – текущая толщина стенки трубчатой заготовки;

$r_{изг}$  – радиус изгиба поперечного сечения трубы;

$\sigma_s$  – напряжение сопротивления деформации;

$\varphi$  – угол наклона образующей инструмента;

$\Delta\varphi$  – шаг изменения угла наклона инструмента;

$l_{обк}$  – длина пути очага деформирования.

Текущая толщина стенки трубы  $S$  зависит от начального радиуса трубы  $r_0$ , текущего радиуса  $r$  и исходной толщины стенки заготовки  $S_0$ . Текущую толщину стенки трубы в процессе деформирования определим по зависимости, аналогичной с операцией осесимметричного обжима для линейной схемы напряженного состояния ( $\sigma_p = \sigma_z = 0$ ).

$$\sigma_s = \sigma_{0,д} \cdot K_t \cdot K_\varepsilon \cdot K_u,$$

где  $\sigma_{0,д}$  – базисное значение сопротивления деформации;

$K_t$  – температурный коэффициент:

$$K_t = 0,57 + 0,0045 \left( 1200 - t_i^0 \right) \sqrt{\frac{1200 - t_i^0}{t_i^0}};$$

$K_\varepsilon$  – степенной коэффициент:

$$K_\varepsilon = 0,47\sqrt{\varepsilon} - 0,045, \text{ при } \varepsilon \leq 15 \%;$$

$$K_\varepsilon = 0,82 + 0,082\sqrt{\varepsilon}, \text{ при } \varepsilon > 15 \%;$$

$K_u$  – скоростной коэффициент:

$$K_u = 0,80 + 0,065\sqrt{u}, \quad \text{при } u = 1 \dots 100 \text{ с}^{-1};$$

$$K_u = 0,80 + 0,085\sqrt{u}, \quad \text{при } u = 100 \dots 300 \text{ с}^{-1},$$

где  $t_i^0$  С – температура заготовки на  $i$ -м обороте.

Для определения  $t_i^0$  С был проведен предварительный эксперимент по определению величины температуры нагрева. Данные эксперимента обрабатывались методикой линейного сглаживания по трем точкам, результаты данной обработки представлены в виде графиков (рис. 2), анализ графиков позволил получить уравнения зависимости температуры заготовки от времени контакта заготовки с инструментом при различных частотах вращения заготовки:

- при частоте вращения 500 об/мин:  $t_i^0 = -0,8268 x^2 + 50,552 x - 31,533$ ;
- при частоте вращения 800 об/мин:  $t_i^0 = -1,0761 x^2 + 58,938x + 34,58$ ;
- при частоте вращения 1250 об/мин:  $t_i^0 = 386,77\ln(x) - 4,3771$ .



Рис. 2. Графики зависимости температуры нагрева от времени контакта заготовки с инструментом при различных скоростях вращения

Коэффициент трения  $\mu$  при горячей обработке труб давлением зависит от температуры деформирования [4]. Как известно [5], с ростом отношения  $S_0/D_0$  коэффициент трения убывает, а между температурой и коэффициентом трения зависимость нелинейная, но ее можно аппроксимировать до линейной в пределах выбранного температурного интервала. Для линейной модели коэффициент трения определим по формуле:

$$\mu = 0,274 + 0,03 \cdot \frac{t_i^0 \text{ С} - 925}{125} - 0,0245 \cdot \frac{(S_0 / D_0) - 0,21}{0,042}.$$

Результаты математического расчета представлены в виде графиков рис. 3, 4.

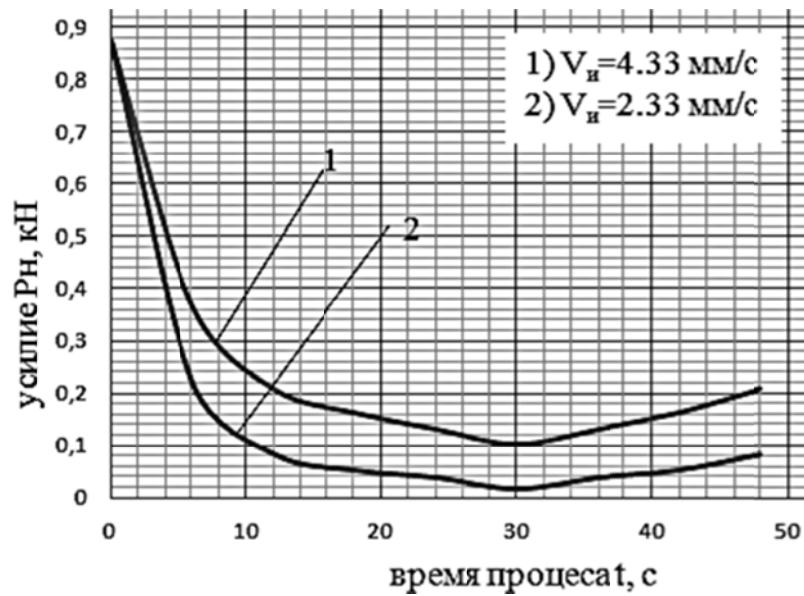
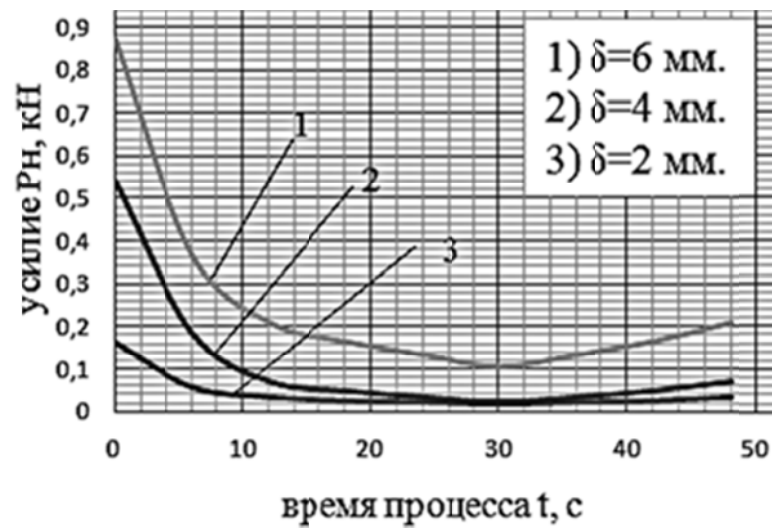
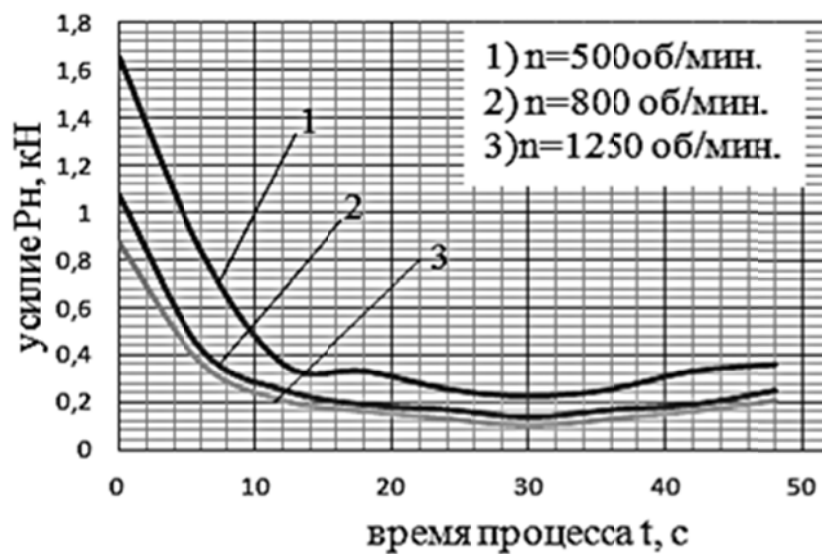


Рис. 3. Расчетные значения усилий  $n = 1250 \text{ об/мин}$ ,  $S_0 = 6 \text{ мм}$



а



б

Рис. 4. Расчетные значения силы  $P_n$ :

а –  $V_u = 4,33 \text{ мм/с}$ ,  $n = 1250 \text{ об/мин}$ ; б –  $V_u = 4,33 \text{ мм/с}$ ,  $S_0 = 6 \text{ мм}$

## ВЫВОДЫ

В процессе локального деформирования при фрикционном нагреве полых и сплошных заготовок происходит увеличение температуры деформируемой части заготовки за счет сил трения. Интенсивность генерируемого работой трения теплового потока достаточно велика для совмещения процессов нагрева и локального деформирования заготовки.

Величина общего усилия, необходимого для локального деформирования, определяется: линейной скоростью вращения заготовки, линейной скоростью подачи инструмента, свойствами материала заготовки, состоянием поверхности трения, геометрическими размерами заготовки и площадью трения.

Численная реализация методики расчета усилий позволила определить характер распределения усилий процесса по времени, определить максимальные усилия, необходимые для проведения процесса локального деформирования, что позволило выбрать подходящее оборудование для проведения экспериментов по определению усилий локального деформирования.

Проведение натурального эксперимента по фрикционной формовке конуса на конце поллой заготовки Ø40 мм и толщиной стенки 2, 4, 6 мм без предварительного нагрева позволило подтвердить адекватность принятой схемы расчета.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Капорович В. Г. *Производство деталей из труб обкаткой* / В. Г. Капорович. – М. : Машиностроение, 1978. – 134 с.
2. Капорович В. Г. *Обкатка в производстве металлоизделий* / В. Г. Капорович. – М. : Машиностроение, 1973. – 168 с.
3. *Производство изделий машиностроения горячей обкаткой : монография* / В. С. Рыжиков [и др.]. – Краматорск : ДГМА, 2006. – 284 с.
4. Пыц Я. Е. *Анализ условий ротационной обкатки толстостенных изделий из труб* / Я. Е. Пыц // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. праць*. – Краматорськ : ДДМА, 2001. – С. 361–364.
5. Капорович В. Г. *Определение работы полезного формоизменения при обкатке* / В. Г. Капорович, В. А. Паламарчук // *Депонированные научные работы*. – 1983. – № 7. – Реф. 720.
6. Пыц Я. Е. *Исследование нагрева трубчатых заготовок для ротационной обкатки инструментом трения* / Я. Е. Пыц, В. Г. Макшанцев // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. праць*. – Краматорск-Славянск, 2000. – С. 301–304.
7. Данченко Ю. В. *Определение коэффициента трения при горячей безоправочной прокатке труб* / А. В. Чус, В. В. Тронь, О. В. Данченко // *Деп. в инст-те Черметинформация 15.03.83*. – № 22374мд-83.

Алиев И. С. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. ОМД ДГМА;

Пыц Е. Я. – аспирант ДГМА;

Пыц Я. Е. – канд. техн. наук, доц. каф. МТО ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: evgenii\_pyc@mail.ru

Статья поступила в редакцию 21.03.2013 г.