

УДК 621.7.014.2

Алиев И. С.
Пыщ Е. Я.
Пыщ Я. Е.
Роганов Л. Л.

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛОКАЛЬНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТРУБЧАТОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ФРИКЦИОННОМ НАГРЕВЕ

Современные технологии обработки материалов в машиностроении имеют развитие в направлении, связанном с решением проблем повышения производительности, качества и эффективности труда, уменьшения расхода материалов и энергии, повышения качества выпускаемых деталей, сокращение их себестоимости. Решение этих проблем невозможно без применения прогрессивных ресурсосберегающих способов обработки материалов давлением.

К таким способам следует отнести 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 [1].

Процесс роторной обкатки в ряде случаев может конкурировать с ковкой, объемной и листовой штамповкой [2]. Воплощение технологии не требует больших капитальных затрат, возможно использование существующего металлообрабатывающего оборудования, что важно при мелкосерийном и индивидуальном производстве. При производстве деталей крупными сериями или при массовом производстве процесс рационально реализовать по схеме роторной обкатки, с использованием роторной обкатной машины.

При ротационной обкатке фрикционным инструментом выделяется значительное количество тепла, использование которого для нагрева деформируемой заготовки существенно уменьшает потребность в энергоресурсах [3].

Деформирование трубчатой заготовки фрикционным 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, теплового поля заготовки при фрикционном нагреве за счет силы трения 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.

На рис. 1 приняты следующие обозначения: EE_1 – ось вращения заготовки; AD – длина образующей в процессе обкатки ($AD = \rho$); $KD = r_{BX}$ – радиус входа заготовки в очаг деформации; $FB = r_{ВЫХ}$ – 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:

$$F = \sqrt{L_T^2 + \rho^2 - B_T^2}, \quad (1)$$

где F – площадь поверхности контакта;

B_T – максимальная ширина поверхности контакта (в торце заготовки);

L_T – длина поверхности контакта в торце заготовки.



а

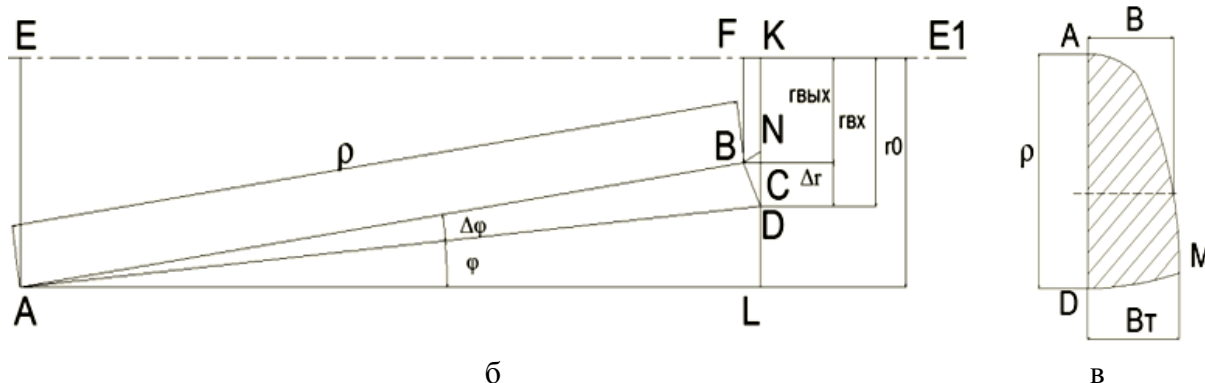


Рис. 1. Геометрические параметры очага деформации:

а – схема очага деформации; б – схема для расчета Δr , r_{BX} , r_{BIX} ; в – схема площади контакта

Ширина поверхности контакта в торце заготовки определяется по известной зависимости [3]:

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

Длина поверхности контакта по торцу заготовки определяется из формулы:

$$L_m = \frac{\pi \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta \varphi \cdot \cos \varphi \cdot (r_0 - \rho \cdot \sin \varphi)} \cdot \alpha}{360} \tag{3}$$

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

$$F = \sqrt{\left(\frac{\pi \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta \varphi \cdot \cos \varphi \cdot (r_0 - \rho \cdot \sin \varphi)} \cdot \alpha}{360}\right)^2 + \rho^2 - \left(2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{\alpha}{360}\right)^2} \tag{4}$$

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

При локальном деформировании сила обкатки включает в себя:

$$P_H = P_D + P_T, \tag{5}$$

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:

$$P_D = P_{ПФ} + P_{ИП} + P_{ИМ} + P_{СК} + P_{ПР}, \tag{6}$$

где $P_{ПФ}$ – сила, направленная на полезное формоизменение;

$P_{ИП}$ – сила, направленная на пластический изгиб поперечного сечения заготовки;

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

$P_{СК}$ – сила скручивания;

$P_{ПР}$ – 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.

$$P_{ин} = \sum_{i=1}^N \frac{2 \cdot \pi}{l_{обк} \cdot \sqrt{3} \cdot \sin \varphi_i} \cdot S_0^2 \cdot r_0 \cdot \sigma_s^i \cdot \ln \left(\frac{r_0 + S_0}{S_0 + r_{ex}} \right); \quad (7)$$

$$P_{ум} = \frac{\sum_{i=1}^N 0.5 \cdot (\pi \cdot r_0 \cdot S_0^2 \cdot \sigma_s^i \cdot \Delta \varphi_i)}{l_{обк}}; \quad (8)$$

$$P_{нф} = \sum_{i=1}^N \frac{2 \cdot \pi \cdot r_0}{l_{обк} \cdot \cos \varphi} \cdot \sigma_s \cdot \left[2 \cdot \sqrt{r_0} \cdot (\sqrt{r_{ex}} - \sqrt{r_{ввлх}}) \cdot \left(r_0^2 - \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot r_{cp} + \sqrt{r_{ex} \cdot r_{ввлх}}) \right) + \Delta r \cdot (r_0 - r_{cp}) \right]; \quad (9)$$

$$P_{\rho} = \sum_{i=1}^N \frac{2 \cdot \pi}{l_{обк} \cdot \sqrt{3} \cdot \sin \varphi_i} \cdot S_0^2 \cdot r_0 \cdot \sigma_s^i \cdot \ln \left(\frac{r_0 + S_0}{S_0 + r_{ex}} \right) + 0.5 \cdot (\pi \cdot r_0 \cdot S_0^2 \cdot \sigma_s^i \cdot \Delta \varphi_i) + \frac{2 \cdot \pi \cdot r_0}{\cos \varphi} \cdot \sigma_s \cdot \left[2 \cdot \sqrt{r_0} \cdot (\sqrt{r_{ex}} - \sqrt{r_{ввлх}}) \cdot \left(r_0^2 - \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot r_{cp} + \sqrt{r_{ex} \cdot r_{ввлх}}) \right) + \Delta r \cdot (r_0 - r_{cp}) \right]; \quad (10)$$

$$P_{mp} = 2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot \sum_{i=1}^N \frac{P_{cp}^i \cdot F_i}{l_{обк}} \cdot \left(r_0 - \rho \cdot (\sin \varphi^i - \Delta \varphi \cdot \cos \varphi^i) \right). \quad (11)$$

$$P_H = \left(\sum_{i=1}^N \frac{2 \cdot \pi}{l_{обк} \cdot \sqrt{3} \cdot \sin \varphi_i} \cdot S_0^2 \cdot r_0 \cdot \sigma_s^i \cdot \ln \left(\frac{r_0 + S_0}{S_0 + r_{ex}} \right) + 0.5 \cdot (\pi \cdot r_0 \cdot S_0^2 \cdot \sigma_s^i \cdot \Delta \varphi_i) + \frac{2 \cdot \pi \cdot r_0}{l_{обк} \cdot \cos \varphi} \cdot \sigma_s \cdot \left[2 \cdot \sqrt{r_0} \cdot (\sqrt{r_{ex}} - \sqrt{r_{ввлх}}) \cdot \left(r_0^2 - \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot r_{cp} + \sqrt{r_{ex} \cdot r_{ввлх}}) \right) + \Delta r \cdot (r_0 - r_{cp}) \right] \right) + \left(2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot \sum_{i=1}^N \frac{P_{cp}^i \cdot F_i}{l_{обк}} \cdot \left(r_0 - \rho \cdot (\sin \varphi^i - \Delta \varphi \cdot \cos \varphi^i) \right) \right), \quad (12)$$

где S – текущая толщина стенки трубчатой заготовки;

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

σ_s – напряжение сопротивления деформации;

φ – 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_ε – степенной коэффициент;

K_u – скоростной коэффициент:

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

$$K_\varepsilon = 0,47 \sqrt{\varepsilon} - 0,045, \text{ при } \varepsilon \leq 15 \%; \quad K_u = 0,80 + 0,065 \sqrt{u}, \text{ при } u = 1 \dots 100 \text{ с}^{-1};$$

$$K_\varepsilon = 0,82 + 0,082 \sqrt{\varepsilon}, \text{ при } \varepsilon > 15 \%; \quad K_u = 0,80 + 0,085 \sqrt{u}, \text{ при } u = 100 \dots 300 \text{ с}^{-1},$$

где t_i – температура заготовки на i -м обороте, °С.

Для определения t_i был проведен предварительный эксперимент по определению величины температуры нагрева. Данные эксперимента обрабатывались методикой линейного сглаживания по трем точка, 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 $t_i^0 = 386,77\ln(x) - 4,3771$.

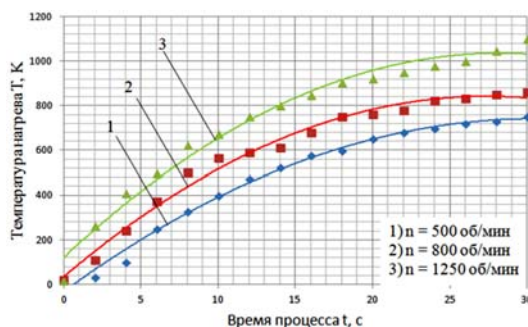


Рис. 2. Графики зависимости температуры нагрева от времени контакта заготовки с инструментом при различных скоростях вращения [8]

Коэффициент трения μ 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:

$$\mu = 0,274 + 0,03 \cdot \frac{t_i^0 C - 925}{125} - 0,0245 \cdot \frac{(S_0/D_0) - 0,21}{0,042}. \tag{13}$$

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

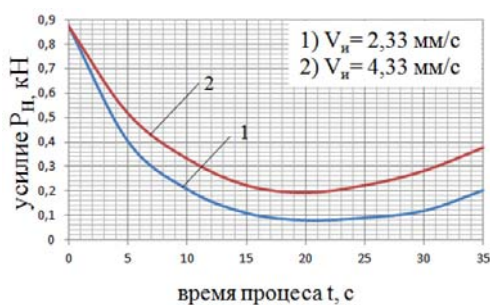


Рис. 3. Расчетные значения усилий при $n = 1250$ об/мин, $S_0 = 6$ мм

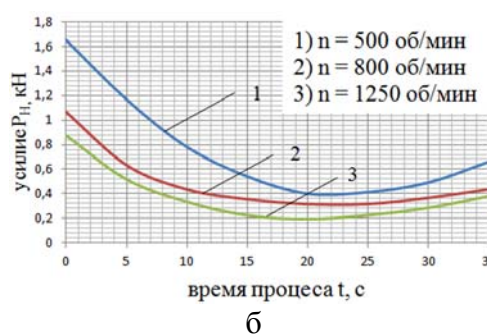
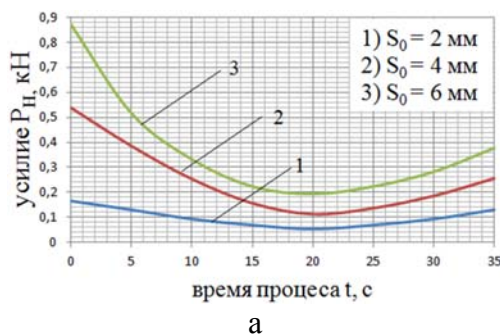


Рис. 4. Расчетные значения силы P_n :

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

Изучению процессов нагрева посвящено достаточно большое количество исследований. Кроме упомянутых выше см. также [9–15]. Однако, принятые в них допущения не позволяют использовать результаты этих работ для анализа теплового состояния металла при обкатке инструментом трения.

Кроме того, практически все исследователи, исключая [16], анализируют состояние заготовки при деформировании, предполагая предварительный нагрев деформируемого участка до ковочной температуры. Тем самым, значительная часть тепловой энергии, выделяемой при локальном деформировании в результате поверхностного и внутреннего трения, остается неучтенной. Задачей данного исследования мы видим в учете этой тепловой энергии и использовании ее на нагрев деформируемой части заготовки. При этом предварительный нагрев тем или иным способом производиться не будет, нагреваться заготовка должна исключительно за счет работы трения.

Тепловые процессы, происходящие в заготовке с момента начала контакта заготовки с инструментом до окончания обкатки, зависят от конвективного, контактного и лучистого теплообмена обкатываемой части заготовки с окружающей средой и недеформируемой частью заготовки. Потери тепла происходят вследствие излучения и конвекции в окружающую среду, контактного теплообмена с инструментом и теплопередачи от нагретой к ненагретой части заготовки [17]. 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 [18].

Таким образом, уравнение температурного баланса запишем в виде [19]:

$$T^{i+1} = T^i - \Delta T_n^i + \Delta T_z^i, \quad (14)$$

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

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

ΔT_n^i – потери тепла в течение i -го оборота, К;

ΔT_z^i – генерация тепла в течение i -го оборота.

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

$$\Delta T_n^i = \Delta T_{un}^i - \Delta T_{uz}^i - \Delta T_k^i - \Delta T_{mn}^i, \quad (15)$$

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

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

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

ΔT_{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:

$$\Delta T_z^i = \Delta T_\delta^i + \Delta T_{mp}^i, \quad (16)$$

ΔT_δ^i – изменение температуры за счет энергии деформации на i -м обороте заготовки, К;

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

Анализ выражений (14)–(16) показывает, что для определения теплового состояния металла в ходе обработки обкаткой необходимо определить потери тепла за время процесса ΔT_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 ΔT_z от времени процесса и определить функцию распределения температуры по толщине стенки трубы.

Изменение температуры заготовки, вызванное каждым из слагаемых в выражении (15), вычислим независимо друг от друга.

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

$$\Delta T_{ин}^i = (T^i - T_{инс}) \cdot \tau \cdot \alpha \cdot \left(\frac{F}{G \cdot c'}\right), \quad (17)$$

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

τ – время одного оборота заготовки, с;

G – масса деформируемой части заготовки, кг;

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

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

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

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:

$$dQ = G \cdot c' d\tau. \quad (18)$$

С другой стороны:

$$dQ = F_H \cdot T \cdot \alpha_u d\tau, \quad (19)$$

где α_u – коэффициент теплообмена излучением, Вт/м²·К;

F_H – площадь наружной поверхности обкатываемой части заготовки, м².

Приравняв (18) и (19), получим:

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

Отсюда:

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

В случае обкатки:

$$\Delta T_{из}^i = -T^i \cdot e^{-\frac{\alpha_u \cdot F_H \cdot \tau}{G \cdot c'}}. \quad (20)$$

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

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

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

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

где T_c – температура газовой среды, К;

α_k – коэффициент теплообмена конвекцией, Вт/м²·К.

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

Отсюда следует:

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

или в наших обозначениях:

$$\Delta T_k^i = (T^i - T_c) + (T^i - T_c) \cdot e^{-\frac{\alpha_k \cdot F_n \cdot \tau}{G \cdot c'}}. \quad (21)$$

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 α_k в работе [11] предложено рассчитывать по зависимости:

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

где T_{zc} – температура граничного слоя воздуха, К,

V_n – 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 не нагретой определим на основании анализа решения одномерного уравнения теплопроводности:

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

где α_T – коэффициент теплообмена теплопроводностью, Вт/м²К;

T_n – температура не нагретой части заготовки, К.

Отсюда:

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

где F_c – площадь поперечного сечения трубы, м².

Приравнявая правые части (21) и (29):

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

получим:

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

Отсюда в наших обозначениях:

$$\Delta T_{mn}^i = (T^i - T_n) + (T^i - T_n) \cdot e^{-\frac{\alpha_T \cdot F_n \cdot \tau}{G \cdot c'}}. \quad (22)$$

Коэффициент α_m можно определить аналогично α .

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, при постоянной частоте вращения заготовки 1250 об/мин и скорости подачи инструмента 4 мм/с при различных толщинах стенки и при постоянной частоте вращения заготовки 1250 об/мин постоянной толщине заготовки 6 мм в зависимости от скорости подачи инструмента (рис. 5).

Для подтверждения адекватности математической модели были проведены эксперименты по определению влияния фрикционного нагрева за счет сил трения на нагрев заготовки, определению усилий затрачиваемых на локальное деформирование трубчатой заготовки.

Для проведения экспериментальных исследований использовался токарный станок типа 1А625Сп, на который был установлен универсальный динамометр УДМ-600, оснащенный усилителем ТА-5 (рис. 6). В качестве заготовок использовались трубы (рис. 7) диаметром $\varnothing 40$ мм и толщиной стенки $\delta = 2$ мм, 4 мм, 6 мм.

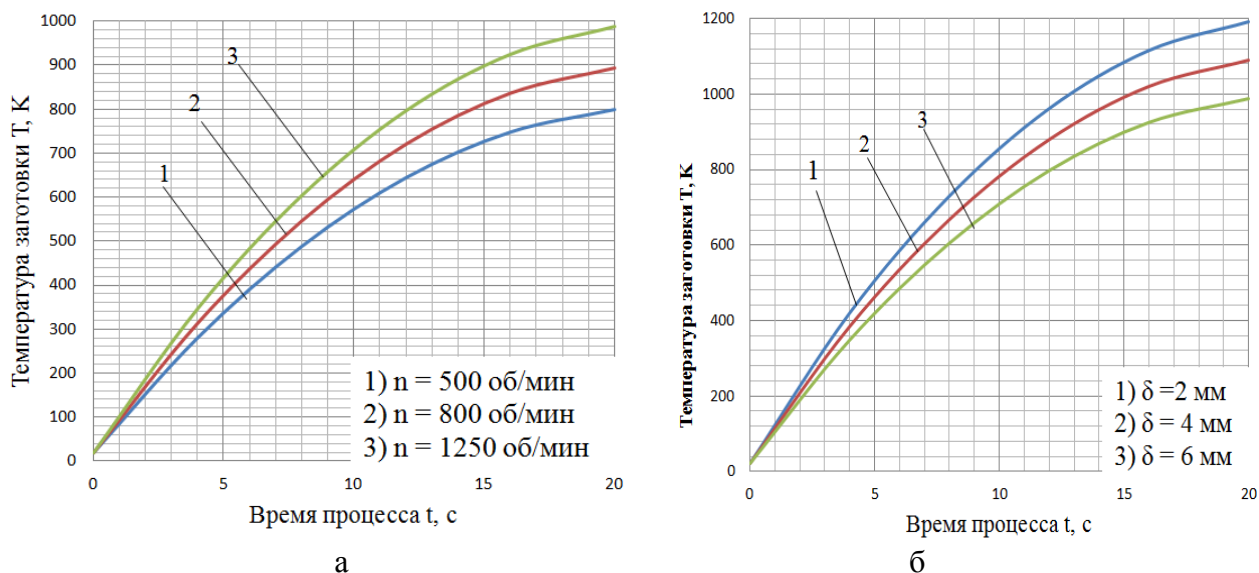


Рис. 5. Расчетные значения роста температуры по времени при:
 а – $V_u = 4,33$ мм/с, $\delta = 6$ мм; б – $V_u = 4,33$ мм/с, $n = 1250$ об/мин

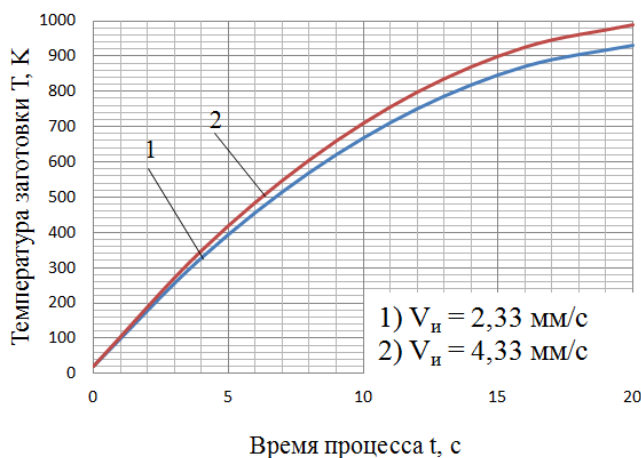


Рис. 6. Расчетные значения роста температуры по времени при $\delta = 6$ мм, $n = 1250$ об/мин

В УДМ закреплялся инструмент переменного профиля (рис. 8) на выходе, из которого заготовка приобретала конечную форму конус (рис. 9).



Рис. 7. Экспериментальная установка

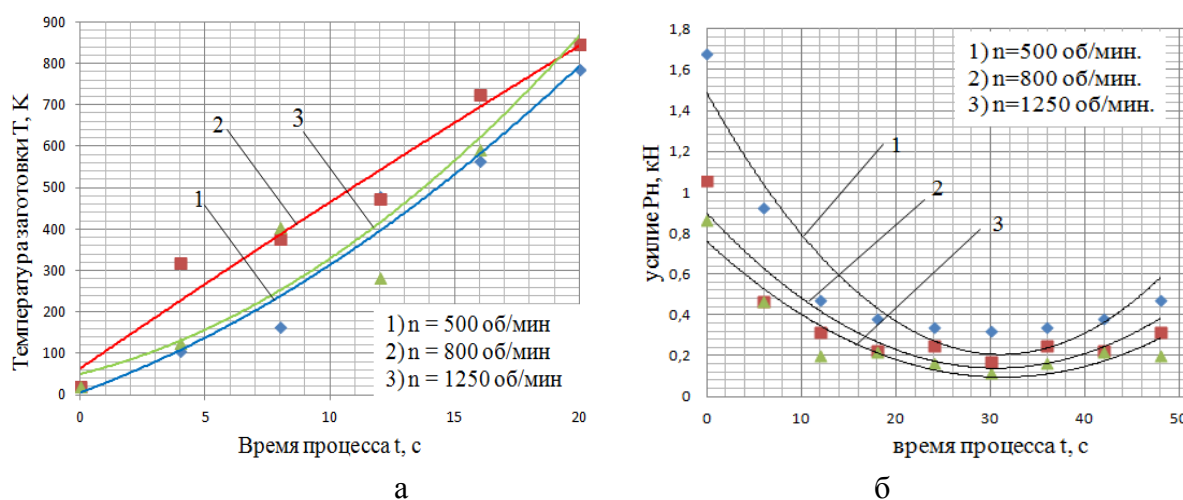
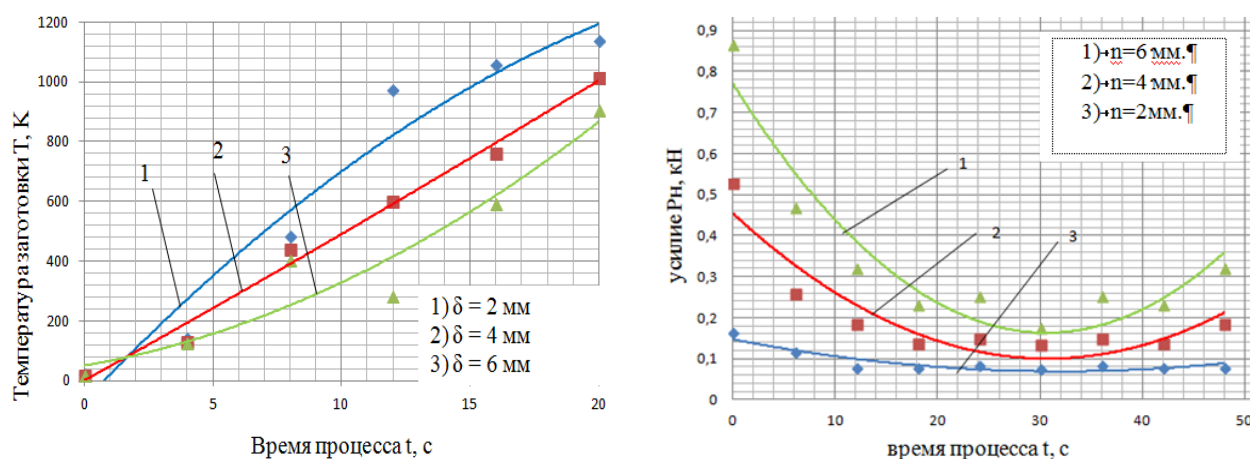


Рис. 8. Инструмент переменного профиля



Рис. 9. Вид заготовок после обкатки

Результаты эксперимента были обработаны в программной среде Excel и представлены в виде графиков зависимостей распределения усилий и 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. 10), при постоянной частоте вращения заготовки 1250 об/мин и скорости подачи инструмента 4 мм/с при различных толщинах стенки (рис. 11), при постоянной частоте вращения заготовки 1250 об/мин постоянной толщине заготовки 6 мм в зависимости от скорости подачи инструмента (рис. 12) и сравнительные графики результатов эксперимента и расчетов (рис. 13).

Рис. 10. Экспериментальные значения изменения температуры и усилий по времени при $V_u = 4,33$ мм/с, $\delta = 6$ ммРис. 11. Экспериментальные значения изменения температуры и усилий по времени при $V_u = 4,33$ мм/с, $n = 1250$ об/мин

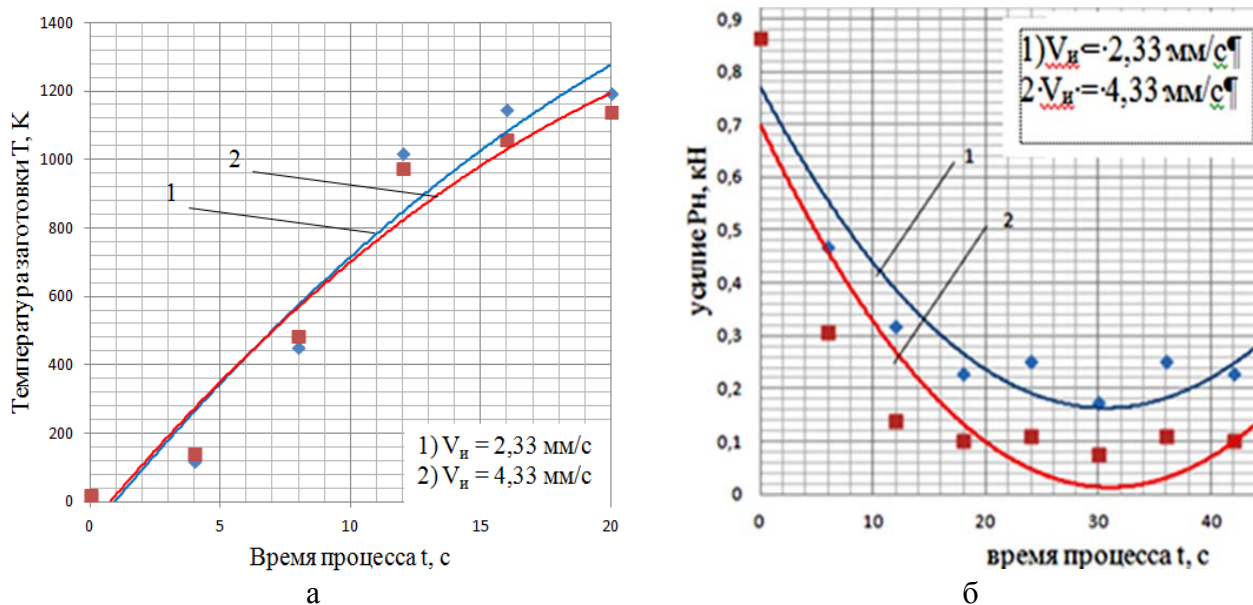


Рис. 12. Экспериментальные значения изменения температуры и усилий по времени при $\delta = 6 \text{ мм}$, $n = 1250 \text{ об/мин}$

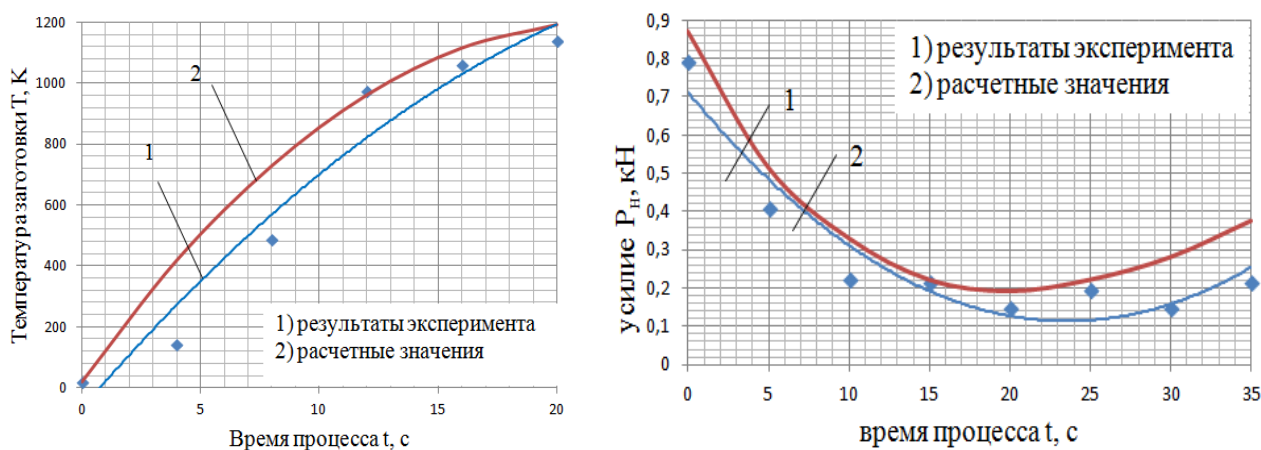


Рис. 13. Сравнительный график результатов эксперимента с расчетными данными

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 температуры и 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 модели расчета теплового поля позволила определить время нагрева заготовки до температуры пластического деформирования без принудительного нагрева, характер изменения температурного поля во времени.

Численная реализация методики расчета усилий поля 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 полой заготовки Ø40 мм и толщиной стенки 2, 4, 6 мм без предварительного нагрева позволило подтвердить адекватность принятых схем расчета.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Капорович В. Г. *Обкатка в производстве металлоизделий* / 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. – *Рукопись депонирована в УкрНИИТИ № 120УК – Д83 // 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. Макишанцев // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. праць.* – Краматорськ–Слов'янськ, 2000. – С. 301–304.
7. Данченко Ю. В. *Определение коэффициента трения при горячей безопрывочной прокатке труб* / А. В. Чус, В. В. Тронь, О. В. Данченко // *Деп. в инст-те Черметинформация 15.03.83.* – № 22374мд–83.
8. Pyts E. Ya. *Influence of Friction force on the thermal state of blank part in the process of rotational running* / E. Ya. Pyts, I. S. Aliev // *Science, Technology and Higher Education [Text] : materials of the international research and practice conference, Vol. II, Westwood, Desember 11th–12th, 2012 / Publishing office Accent Graphics communications – Westwood – Canada, 2012.* – 608 p.
9. Тайц Н. Ю. *Определение температуры металла в процессе деформации* / Н. Ю. Тайц, А. Г. Сабельников, В. И. Губинский // *Известие вузов. Черная металлургия.* – 1965. – № 2. – С. 156–160.
10. Тайц Н. Ю. *Технология нагрева стали* / Н. Ю. Тайц. – М. : Металлургиздат, 1962. – 567 с.
11. Коновалов Ю. В. *Расчет параметров листовой прокатки : справочник* / А. Л. Остапенко, В. И. Пономарев. – М. : Металлургия, 1986. – 430 с.
12. *Теория прокатки : Справочник* / Под ред. В. И. Зюзина, Л. В. Третьякова. – М. : Металлургия, 1982. – 335 с.
13. Гелеи Ш. *Расчеты усилий и энергии при пластической деформации металла* / Ш. Гелеи. – М. : Металлургиздат, 1958. – 420 с.
14. Зайков М. А. *Режимы деформаций и усилия при горячей прокатке* / М. А. Зайков. – М. : Металлургиздат, 1960. – 302 с.
15. Ураков В. Ф. *Температурный эффект пластической деформации при резке металла* / В. Ф. Ураков // *Машины и технология обработки металлов давлением : сб. науч. тр.* – М. : МВТУ им. Баумана, 1967. – С. 21–22.
16. *Сварка трением : справочник* / В. К. Лебедев [и др.]. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд., 1987. – 236 с.
17. *Об учете тепловых потерь при обкатке толстостенных трубчатых заготовок* / Я. Е. Пыц, С. Н. Оборнев // *Совершенствование процессов и машин обработки металлов давлением : сб. науч. тр.* – К. : УМК ВО, 1988. – С. 96–101.
18. Пыц Я. Е. *Тепловые процессы при обкатке* / Е. Я. Пыц // *Проблемы развития наукоемких и малоотходных процессов.* – Краматорск, 1997. – С. 22–23.
19. Капорович В. Г. *Деформирование толстостенных трубчатых заготовок инструментом трения* / В. Г. Капорович, Я. Е. Пыц. – *Деп. в ВИНТИ 20.12.86 № 1744 ТМ.* – *Деп. реф. N 183.*

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. МПФ ДГМА;

Роганов Л. Л. – д-р техн. наук, проф. каф. МПФ ДГМА.

E-mail: aliev@dgma.donetsk.ua; evgenii_pyts@mail.ru; yaroslav.pyts@dgma.donetsk.ua

Статья поступила в редакцию 04.12.2013 г.