

УДК 621.983; 539.374

Яковлев С. С.  
Трегубов В. И.  
Пилипенко О. В.  
Пасынков А. А.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПЕРАЦИИ РОТАЦИОННОЙ ВЫТЯЖКИ С УТОНЕНИЕМ СТЕНКИ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ АНИЗОТРОПНОГО МАТЕРИАЛА И РАЗДЕЛЕНИЕМ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ

При изготовлении тонкостенных осесимметричных оболочек различного назначения в настоящее время находят всё более широкое использование ротационная вытяжка. Для производства такого типа деталей находят успешное применение схемы ротационной вытяжки роликами с открытой и закрытой калибровкой, а также с разделением очага деформации [1–5].

Прокат, подвергаемый штамповке, как правило, обладает анизотропией механических свойств, обусловленной маркой материала и технологическими режимами его получения. Анизотропия механических свойств материала заготовки может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на устойчивое протекание технологических процессов обработки металлов давлением. Изучение процесса ротационной вытяжки с утонением осложняется также наличием локальной деформации и объемным характером состояния материала в пластической области [4–7].

Целью работы является разработка математической модели операции ротационной вытяжки с утонением стенки трубных заготовок из анизотропного материала и разделением очага деформации, выявить особенности расчета силовых режимов для 3-х роликовой схемы ротационной вытяжки осесимметричных оболочек с разделением деформации.

Схема с разделением деформации имеет ряд важных преимуществ по сравнению с традиционными схемами, состоящих в снижении потребных деформирующих сил (при прочих равных условиях), достижении более высоких степеней деформации за один проход, что позволяет интенсифицировать процесс ротационной вытяжки. Сущность указанной схемы состоит в том, что суммарная деформация разделяется между роликами или группой роликов по определённой зависимости (рис. 1).

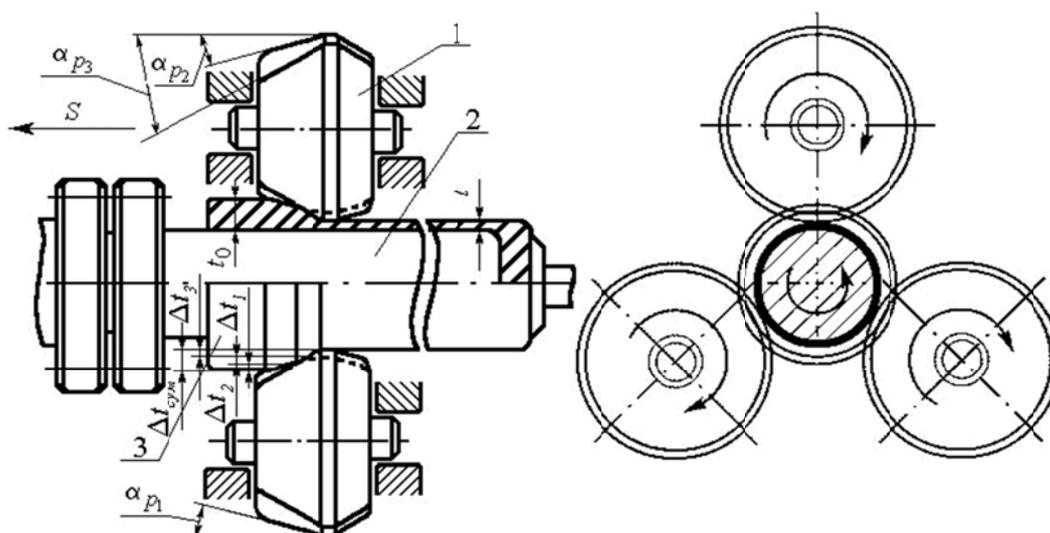


Рис. 1. Трехроликовая схема ротационной вытяжки осесимметричных оболочек с разделением деформации при радиальном смещении роликов:

1 – ролик; 2 – оправка; 3 – деталь

Разделение деформации осуществляется взаимным смещением роликов либо в осевом и радиальном направлении, либо смещением только в радиальном направлении, при этом используются ролики с различным профилем [4, 5].

В работах [6, 7] разработана математическая модель формоизменения анизотропной трубной заготовки при ротационной вытяжке на специализированном оборудовании тонкостенных осесимметричных оболочек с утонением стенки коническими роликами с учетом локального очага деформации и фактической подачи  $S_\phi$  металла в очаг деформации (рис. 2).

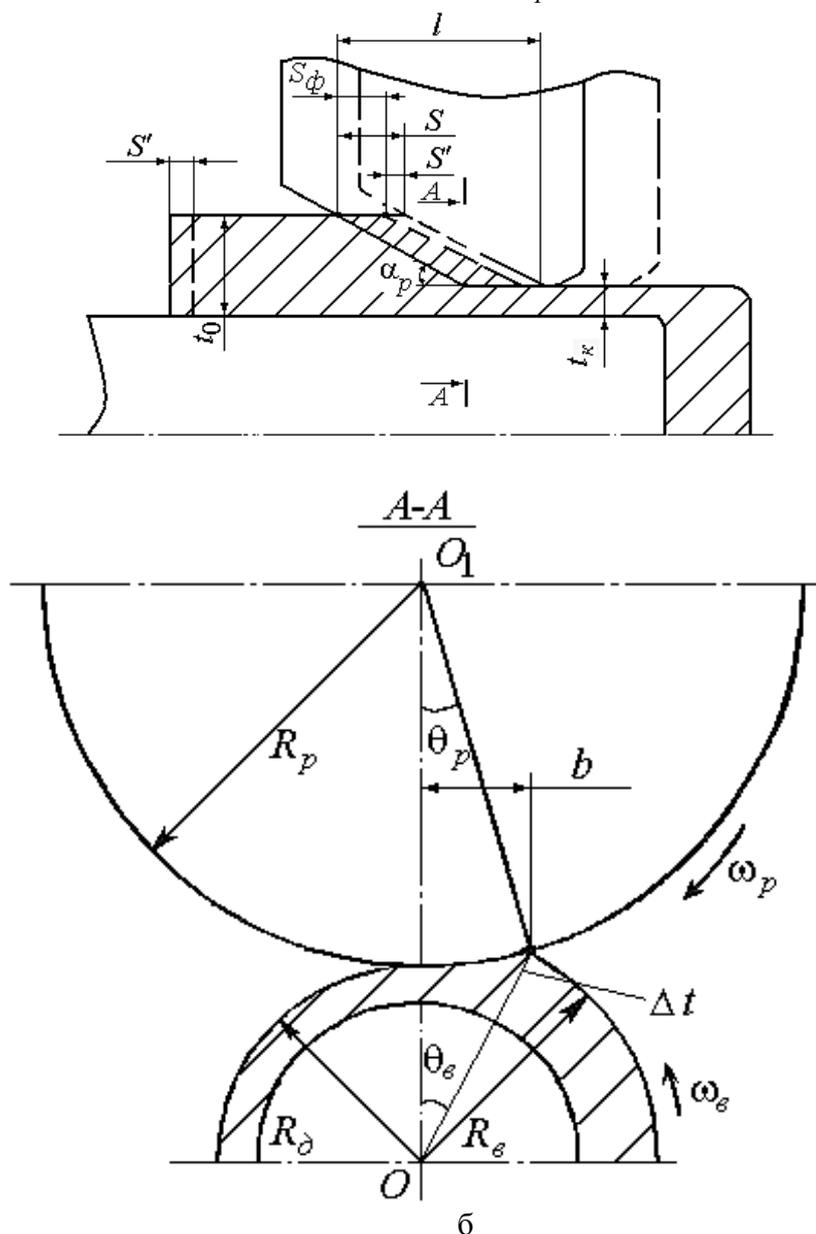


Рис. 2. Схема очага деформации при ротационной вытяжке осесимметричных оболочек по прямому способу

Принимается, что материал трубной заготовки подчиняется условию пластичности Мизеса-Хилла и ассоциированному закону пластическому течению. Анизотропия механических свойств заготовки – цилиндрическая. В отличие от известных подходов к анализу кинематики течения материала в очаге пластической деформации принято, что процесс реализуется в условиях квазиплоской деформации. Компоненты скоростей деформации определяются в цилиндрической системе координат последовательно – радиальная, далее находится тангенциальная составляющая в предположении, что в очаге деформации реализуется квазиплоская деформация при граничном условии ее распределения на выходе из очага деформации.

Осевая составляющая скорости определяется путем интегрирования условия несжимаемости при граничном условии, связанным с распределением этой скорости на выходе из очага деформации. Принимая скорости потоков областей равными, находится скорость на выходе из очага деформации. В дальнейшем вычисляются компоненты скоростей деформации в цилиндрической системе координат и величина интенсивности скорости деформации. Используя уравнение равновесия в цилиндрической системе координат и уравнение пластического течения, устанавливающие связи между напряжениями и скоростями деформаций, после подстановки последних в уравнения равновесия получим систему уравнений для определения среднего напряжения. Учитывая, что на границе входа материала в очаг пластической деформации величина осевого напряжения равна нулю, т. е.  $\sigma_z = 0$ . Это условие, позволило определить распределение величин среднего напряжения  $\sigma$  на входе материала в очаг пластической деформации и радиальных  $\sigma_r$ , тангенциальных  $\sigma_\theta$ , осевых  $\sigma_z$  и касательных  $\tau_{r\theta}$ ,  $\tau_{\theta z}$ ,  $\tau_{r\theta}$  напряжений. Предварительно вычислив компоненты скоростей деформации, среднюю величину накопленной интенсивности деформации в очаге пластической деформации и среднюю величину интенсивности напряжения  $\sigma_{icp}$  в очаге деформации.

Получены выражения для определения составляющих сил ротационной вытяжки:

– радиальная

$$P_R = \iint \sigma_R r_k d\theta \sin \theta dz, \quad (1)$$

– тангенциальная

$$P_\tau = \iint \sigma_{\tau|_{\theta=\theta_g}} dr \cos \theta_g dz, \quad (2)$$

– осевая

$$P'_z = \int_{R_d} \int_0^{\theta_g} \sigma_z(r, \theta) r dr d\theta, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} \sigma_\tau &= \sigma_r \sin^2 \theta + \sigma_\theta \cos^2 \theta + \tau_{r\theta} \sin 2\theta; \\ \sigma_R &= \sigma_r \cos^2 \theta + \sigma_\theta \sin^2 \theta - \tau_{r\theta} \sin 2\theta; \quad \sigma'_z = \sigma_z. \end{aligned}$$

С учетом составляющей силы трения осевая сила равна

$$P_z = P'_z + \mu_o P_R, \quad (4)$$

где  $\mu_o$  – коэффициент трения между поверхностями заготовки и оправки.

На рис. 3 представлены схемы ротационной вытяжки с разделением деформации путем радиального смещения трех роликов, установленных в одной плоскости, имеющих различные углы рабочего конуса. Разделение деформации при такой схеме достигается установкой роликов с различной величиной зазора от оправки, причем ролик с наименьшим углом устанавливается с наибольшим зазором, а ролик, имеющий наибольший угол в комплекте, устанавливается с зазором, равным толщине стенки готовой детали на обрабатываемом участке.

При такой установке деформирующие ролики при ротационной вытяжке образуют три последовательно расположенных неразрывных участка деформации, наклоненных к оси детали под различными углами. Деформирование на начальном участке осуществляется роликом с минимальным углом, а на последнем участке – роликом с максимальным углом. Такой порядок расположения очагов деформации позволяет ограничить образование напыля (  $\alpha_{p1}$  ), обеспечить более высокую точность диаметральных размеров изготавливаемых деталей (  $\alpha_{p3}$  ).

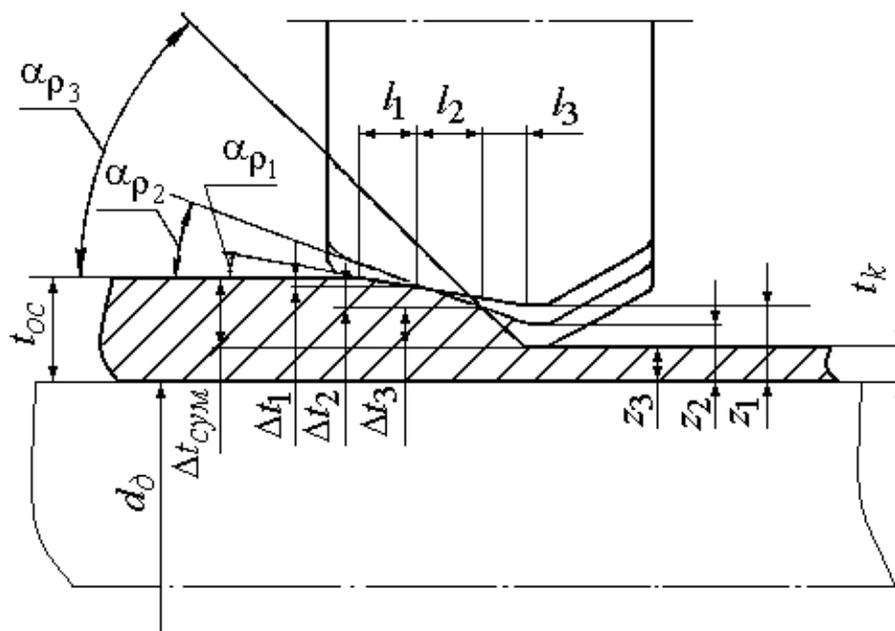


Рис. 3. Схема очага деформации при ротационной вытяжке осесимметричных оболочек тремя роликами, смещенными в радиальном направлении

Важным условием обеспечения высокой точности при использовании схемы (рис. 2) является обеспечение равновесия радиальных сил:

$$P_{R1} = P_{R2} = P_{R3}. \quad (5)$$

Приведенные выше соотношения позволяют рассчитать распределение суммарной степени деформации  $\varepsilon$  ( $\varepsilon = 1 - t_k / t_0$ ) между роликами ( $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ ) с учетом неравномерного распределения давления на контактной поверхности ролика и заготовки, геометрических параметров используемых роликов и трубной заготовки, технологических параметров процесса, величины проекции поверхности контакта заготовки и ролика на площадь с нормалью в радиальном направлении и упрочнения материала детали на соответствующем участке деформирования.

Условие (5) не разрешается в явном виде относительно величин степеней деформации на первом  $\varepsilon_1$  и втором ролике  $\varepsilon_2$ , поэтому искомые величины устанавливаются путем численных расчетов по этому условию методом последовательных приближений с учетом приведенных выше соотношений соотношения:

$$(1 - \varepsilon) = (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_3). \quad (6)$$

Приближенная методика разделения деформации между роликами для 3-х роликовой схеме деформирования рассмотрена в работе [6]. При 3-х роликовых схемах с разделением деформации величины изменения толщины стенки для соответствующего ролика  $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$  и  $\Delta t_3$  могут быть определены по выражениям соответственно:

$$\Delta t_1 = \frac{\Delta t_{\text{сум}}}{1 + \sqrt{\frac{\text{tg}\alpha_{p2}}{\text{tg}\alpha_{p1}} + \sqrt{\frac{\text{tg}\alpha_{p3}}{\text{tg}\alpha_{p1}}}}}; \quad \Delta t_2 = \frac{\Delta t_{\text{сум}}}{1 + \sqrt{\frac{\text{tg}\alpha_{p1}}{\text{tg}\alpha_{p2}} + \sqrt{\frac{\text{tg}\alpha_{p3}}{\text{tg}\alpha_{p2}}}}};$$

$$\Delta t_3 = \frac{\Delta t_{\text{сум}}}{1 + \sqrt{\frac{\text{tg}\alpha_{p1}}{\text{tg}\alpha_{p3}} + \sqrt{\frac{\text{tg}\alpha_{p2}}{\text{tg}\alpha_{p3}}}}}, \quad (7)$$

где  $\Delta t_1$ ;  $\Delta t_2$ ;  $\Delta t_3$  – величины изменения толщины стенки для соответствующего ролика;  $\alpha_{p1}$ ;  $\alpha_{p2}$ ;  $\alpha_{p3}$  – углы рабочего конуса роликов;  $S_{\phi}$  – величина фактической подачи металла в очаг деформации;  $D_p$ ;  $d_d$  – диаметр ролика и детали, мм, где  $\Delta t_1$ ;  $\Delta t_2$ ;  $\Delta t_3$  – величины изменения толщины стенки для соответствующего ролика;  $\alpha_{p1}$ ;  $\alpha_{p2}$ ;  $\alpha_{p3}$  – углы рабочего конуса роликов;  $S_{\phi}$  – величина фактической подачи металла в очаг деформации;  $D_p$ ;  $d_d$  – диаметр ролика и детали, мм.

Величина радиальной составляющей силы в этом случае определяется по выражению (1), тангенциальная – по формуле:

$$P_{\tau} = P_{\tau 1} + P_{\tau 2} + P_{\tau 3}, \quad (8)$$

где  $P_{\tau 1}$ ,  $P_{\tau 2}$ ,  $P_{\tau 3}$  – тангенциальные составляющие сил на первом, втором и третьем роликах соответственно;

$$P_{\tau 1} = \iint \sigma_{\tau 1}|_{\theta=\theta_{e1}} dr \cos \theta_{e1} dz; \quad P_{\tau 2} = \iint \sigma_{\tau 2}|_{\theta=\theta_{e2}} dr \cos \theta_{e2} dz;$$

$$P_{\tau 3} = \iint \sigma_{\tau 3}|_{\theta=\theta_{e3}} dr \cos \theta_{e3} dz;$$

где  $\theta_{e1}$ ,  $\theta_{e2}$ ,  $\theta_{e3}$  – угол контакта заготовки с первым, вторым и третьим роликами;  $\sigma_{\tau 1}$ ,  $\sigma_{\tau 2}$ ,  $\sigma_{\tau 3}$  – тангенциальные напряжения на первом, втором и третьем роликах соответственно.

Осевая сила на суппорт стана ротационной вытяжки вычисляется по выражению:

$$P_z = P_{z1} + P_{z2} + P_{z3}, \quad (9)$$

где  $P_{z1}$ ,  $P_{z2}$ ,  $P_{z3}$  – осевые составляющие сил на первом, втором и третьем роликах соответственно;  $\sigma_{z1}$ ,  $\sigma_{z2}$ ,  $\sigma_{z3}$  – осевые напряжения на первом, втором и третьем роликах на выходе из очага деформации при  $z = 0$  соответственно.

Момент сил, приложенный к оправке для осуществления пластического формоизменения в очаге деформации, приближенно может быть вычислен по формуле:

$$M_{\theta} \approx M_{\theta 1} + M_{\theta 2} + M_{\theta 3}.$$

Работа деформации, совершаемая моментами  $M_{\theta 1}$ ,  $M_{\theta 2}$  и  $M_{\theta 3}$  на углах  $\theta_{e1}$ ,  $\theta_{e2}$ ,  $\theta_{e3}$  вычисляется по выражению:

$$A_{def} \approx M_{\theta 1} \theta_{e1} + M_{\theta 2} \theta_{e2} + M_{\theta 3} \theta_{e3}.$$

В табл. 1 приведены результаты расчета распределения суммарной степени деформации по роликам при ротационной вытяжке осесимметричных деталей из стали 12Х3ГНМФБА по 3-х роликовой схеме деформирования с разделением очага пластической деформации по выражению (5) и по приближенной методике (7) при различных сочетаниях углов конусности роликов ( $\alpha_{p1}$ ,  $\alpha_{p2}$ ,  $\alpha_{p3}$ ). Расчеты выполнены для ротационной вытяжки осесимметричных деталей из трубной заготовки с наружным диаметром  $D_0 = 116,2$  мм, и толщиной стенки трубы  $t_0 = 6,05$  мм, роликами диаметром  $D_p = 280$  мм. Механические характеристики стали 12Х3ГНМФБА приведены в работе [6].

Таблица 1

Распределение суммарной степени деформации по роликам при ротационной вытяжке осесимметричных оболочек из стали 12Х3ГНМФБА по 3-х роликовой схеме деформирования с разделением очага пластической деформации ( $\alpha_{p1} = 15^\circ$ ;  $\alpha_{p2} = 20^\circ$ ;  $\alpha_{p3} = 30^\circ$ )

| Суммарная степень на роликах $\varepsilon_{ip}$ | Распределение суммарной степени деформации, % |       |       |                |       |       |
|---|---|-------|-------|----------------|-------|-------|
|   | по условию (5)                                |       |       | по условию (7) |       |       |
|   | 20  | 40    | 60    | 20             | 40    | 60    |
| $\varepsilon_{1p}$                              | 5,08  | 11,01 | 16,51 | 5,67           | 12,11 | 18,46 |
| $\varepsilon_{2p}$                              | 7,86  | 14,42 | 23,05 | 7,75           | 14,47 | 23,26 |
| $\varepsilon_{3p}$                              | 8,53  | 21,22 | 37,73 | 8,07           | 20,27 | 36,13 |

Анализ результатов расчетов, приведенных в табл. 1, показывает, что максимальная величина расхождения результатов расчетов степеней деформации по роликам, вычисленная из условия равенства радиальных проекций площадей контактов роликов с заготовкой (7) и условия равенства радиальных составляющих сил (5), не превышает 10 %.

На рис. 4 представлены графические зависимости изменения относительных величин радиальной  $\bar{P}_R$ , тангенциальной  $\bar{P}_\tau$  и осевой  $\bar{P}_z$  составляющих сил от степени деформации  $\varepsilon$  при ротационной вытяжке по 3-х роликовой схеме ротационной вытяжки с разделением деформации осесимметричных деталей из стали 12Х3ГНМФБА при фиксированных значениях рабочей подачи  $S$  и углов конусности роликов ( $\alpha_{p1}$ ,  $\alpha_{p2}$  и  $\alpha_{p3}$ ). Точками обозначены результаты экспериментальных исследований.

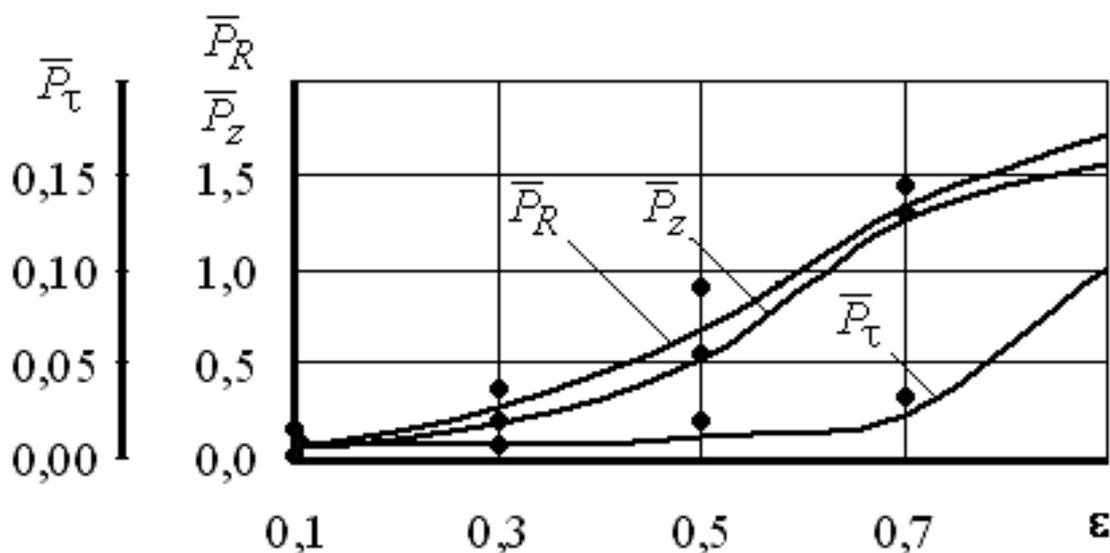


Рис. 3. Зависимости изменения  $\bar{P}_R$ ,  $\bar{P}_\tau$ ,  $\bar{P}_z$  от  $\varepsilon$  для стали 12Х3ГНМФБА ( $S=1$  мм/об;  $\alpha_{p1} = 10^\circ$ ,  $\alpha_{p2} = 20^\circ$ ;  $\alpha_{p3} = 30^\circ$ )

Расчеты выполнены для трубной заготовки из стали 12Х3ГНМФБА с наружным радиусом  $R_g = 64,15$  мм, толщиной стенки трубы  $t_0 = 6,05$  мм; диаметром ролика  $D_p = 280$  мм; частотой вращения шпинделя  $n = 75$  мин<sup>-1</sup>;  $\mu_0 = 0,15$ . Здесь введены обозначения:

$$\bar{P}_R = P_R / [(R_g - 0,5t_0)t_0\theta_g\sigma_{0,2}]; \quad \bar{P}_\tau = P_\tau / [(R_g - 0,5t_0)t_0\theta_g\sigma_{0,2}];$$

$$\bar{P}_z = P_z / [(R_g - 0,5t_0)t_0\theta_g\sigma_{0,2}],$$

а точками обозначены результаты экспериментальных исследований.

Анализ результатов расчетов и графических зависимостей показывает, что при обработке деталей по схеме с разделением деформации радиальная  $P_R$  и осевая  $P_z$  силы имеют меньшие значения по сравнению с обработкой указанных деталей по однорезной схеме обработки. Значения тангенциальной силы  $P_\tau$  не имеют больших расхождений при используемых схемах деформирования. Установлено, что ротационная вытяжка с использованием 3-х роликовых схем с разделением деформации позволяет снизить величины радиальных  $P_R$  сил деформирования на 25–30 % по сравнению с аналогичной схемой обработки без разделения деформации. Величина тангенциальной  $P_\tau$  составляющей силы ротационной вытяжки практически не зависит от используемой схемы обработки. Установлено, что с увеличением степени деформации относительные величины радиальных  $\bar{P}_R$ , осевых  $\bar{P}_z$  и тангенциальных  $\bar{P}_\tau$  составляющих сил интенсивно растут. Установлено, что с увеличением рабочей подачи  $S$  все три относительные составляющие сил возрастают. Заметим, что изменение условий трения на контактной поверхности оправки и заготовки существенно влияет на относительную величину осевой силы  $\bar{P}_z$ . С ростом коэффициента трения на оправке  $\mu_0$  величина относительной силы  $\bar{P}_z$  возрастает.

Выполнены экспериментальные исследования операции ротационной вытяжки с использованием 3-х роликовых схем с разделением деформации осесимметричных деталей из стали 12Х3ГНМФА. Экспериментальные исследования ротационной вытяжки производилась на 3-х роликовом станке модели В-280М. Стан оснащен 3-х роликовой кареткой с гидравлическим приводом осевого перемещения. Деформирующие ролики расположены через 120° по периметру окружности. В процессе обработки деталей производилась регистрация замеров трех составляющих сил ротационной вытяжки: радиальной  $P_R$ , осевой  $P_z$  и тангенциальной  $P_\tau$ . Тангенциальная сила  $P_\tau$  определялась косвенным путем, по замерам разности мощностей потребляемой электроприводом при обработке детали и при холостом вращении оправки с деталью. Для замеров осевой  $P_z$  и радиальной  $P_R$  нагрузок при ротационной вытяжке применительно к станку В-280М были разработаны и изготовлены гидроподушки. Заготовки были подвергнуты ротационной вытяжке с различными степенями деформации в диапазоне от 30 до 60 % и величинами рабочей подачи в диапазоне от 0,5 до 1 мм/об. Для каждой группы фиксированных параметров проводилось по шесть опытов. За основу брались среднеарифметические данные составляющих сил. Распределение суммарной степени деформации  $\varepsilon$  между роликами определялось с учетом соотношения (5).

Результаты экспериментальных работ показали, удовлетворительную сходимость расчётных и экспериментальных значений сил, не превышающую 10 %. Экспериментально установлено, что ротационная вытяжка с использованием 3-х роликовых схем с разделением деформации позволяет снизить величины радиальных и осевых сил деформирования на 25–30 % по сравнению с аналогичными схемами обработки без разделения деформации. Величина тангенциальной составляющей силы ротационной вытяжки не зависит от используемой схемы обработки.

Работа выполнена в рамках государственного задания на проведение научно-исследовательских работ Министерства образования и науки Российской Федерации на 2014–2020 годы и гранта РФФИ № 13-08-97-518 р\_центр\_а.

## ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель операции ротационной вытяжки с утонением стенки осесимметричных оболочек из анизотропных материалов с разделением деформации.
2. Установлено, что ротационная вытяжка с использованием 3-х роликовых схем с разделением деформации позволяет снизить величины радиальных  $P_R$  сил деформирования на 25–30 % по сравнению с аналогичной схемой обработки без разделения деформации. Величина тангенциальной  $P_t$  составляющей силы ротационной вытяжки практически не зависит от используемой схемы обработки.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гредитор М. А. Давильные работы и ротационное выдавливание. / М. А. Гредитор. – М. : Машиностроение, 1971. – 239 с.
2. Могильный Н. И. Ротационная вытяжка оболочковых деталей на станках. / Н. И. Могильный. – М. : Машиностроение, 1983. – 190 с.
3. Ковка и штамповка: справочник: в 4 т. Т. 4. Листовая штамповка / Под общ. ред. С. С. Яковлева; ред. совет : Е. И. Семенов (пред.) [и др.] 2-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 2010. – 732 с.
4. Яковлев С. С. Теория и технология штамповки анизотропных материалов. / С. С. Яковлев, В. Д. Кухарь, В. И. Трегубов / под ред. С. С. Яковлева. – М. : Машиностроение, 2012. – 400 с.
5. Гречников Ф. В. Деформирование анизотропных материалов. / Ф. В. Гречников. – М. : Машиностроение, 1998. – 446 с.
6. Яковлев С. С. Ротационная вытяжка с утонением стенки осесимметричных деталей из анизотропных трубных заготовок на специализированном оборудовании. / С. С. Яковлев, В. И. Трегубов, С. П. Яковлев. – М. : Машиностроение, 2009. – 265 с.
7. Пилипенко О. В. Технологические параметры ротационной вытяжки с утонением стенки трубных заготовок из анизотропного материала. / О. В. Пилипенко // Вестник машиностроения, 2008. – № 4. – С. 74–78.

## REFERENCES

1. Greditor M. A. Davil'nye raboty i rotacionnoe vydavlivanie. / M. A. Greditor. – M. : Mashinostroenie, 1971. – 239 s.
2. Mogil'nyj N. I. Rotacionnaja vytjazhka obolochkovyh detalej na stankah. / N. I. Mogil'nyj. – M. : Mashinostroenie, 1983. – 190 s.
3. Kovka i shtampovka: spravochnik: v 4 t. T. 4. Listovaja shtampovka / Pod obshh. red. S. S. Jakovleva; red. sovet : E. I. Semenov (pred.) [i dr.] 2-e izd., pererab. i dop. M. : Mashinostroenie, 2010. – 732 s.
4. Jakovlev S. S. Teorija i tehnologija shtampovki anizotropnyh materialov. / S. S. Jakovlev, V. D. Kuhar', V. I. Tregubov / pod red. S. S. Jakovleva. – M. : Mashinostroenie, 2012. – 400 s.
5. Grechnikov F. V. Deformirovanie anizotropnyh materialov. / F. V. Grechnikov. – M. : Mashinostroenie, 1998. – 446 s.
6. Jakovlev S. S. Rotacionnaja vytjazhka s utoneniem stenki osesimmetrichnyh detalej iz anizotropnyh trubnyh zagotovok na specializirovannom oborudovanii. / S. S. Jakovlev, V. I. Tregubov, S. P. Jakovlev. – M. : Mashinostroenie, 2009. – 265 s.
7. Pilipenko O. V. Tehnologicheskie parametry rotacionnoj vytjazhki s utoneniem stenki trubnyh zagotovok iz anizotropnogo materiala. / O. V. Pilipenko // Vestnik mashinostroenija, 2008. – № 4. – S. 74–78.

|                 |                                       |
|-----------------|---------------------------------------|
| Яковлев С. С.   | д-р техн. наук, проф. ТулГУ           |
| Трегубов В. И.  | д-р техн. наук, проф. ТулГУ           |
| Пилипенко О. В. | д-р техн. наук, проф., ректор ГУ-УНПК |
| Пасыноков А. А. | канд. техн. наук, доц. ТулГУ          |

ТулГУ – ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет», г. Тула, Россия.

ФГБОУ ВПО «Государственный университет учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел, Россия.

E-mail: [mpf-tula@rambler.ru](mailto:mpf-tula@rambler.ru)

Статья поступила в редакцию 06.02.2014 г.