УДК 621.7.10

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСКАТКИ ТРУБ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Хейн Вин Зо

«МАТИ» – Российский государственный технологический университет им. К.Э. Циолковского, Москва, e-mail: taryar4ever@gmail.com

В настоящее время к конструкциям самолетов и других изделий машиностроения предъявляются все более высокие эксплуатационные требования, а с другой стороны, стоит задача снижения себестоимости продукции. Поэтому специалисты, работающие в этих областях, ведут работы по созданию новых материалов, по повышению технологичности конструкций, созданию новых технологических процессов, оснастки и оборудования. Важной частью любой машины являются трубопроводные системы. Трубопроводы работают в условиях сложного нагружения. Они испытывают действия высоких давлений, пульсирующей нагрузки и гидравлических ударов. Поэтому к ним предъявляются высокие требования по механическим свойствам материала, качеству внешней и внутренней поверхностей, сохранению формы сечения, а также максимальному утонению стенок трубы. При изготовлении трубопроводов используются различные технологические операции: раздача, обжим, гибка и др. Наибольшее распространение при изготовлении различных соединительных элементов нашел процесс раздачи (и развальцовки) концевых участков труб. В связи с применением высокопрочных и малопластичных материалов эти традиционные технологии не позволяют получить качественные детали, а также имеют низкую экономическую эффективность. Поэтому исследования в этом направлении являются актуальными.

Ключевые слова: математическое моделирование, процесс раскатки труб

MODELING OF ROTARY EXPANSION METHOD OF TUBES FOR THE PRODUCTION OF PARTS OF AIRCRAFT

Hein Win Zaw

«MATI» – Russian State Technological University named after K.E. Tsiolkovsky, Moscow, e-mail: taryar4ever@gmail.com

Currently, the aircraft structure and other engineering products are being placed on higher operating requirements, and on the other hand the task of reducing production costs. Therefore, professionals working in these areas, are working on the creation of new materials to improve the manufacturability of designs, creating new processes, tooling and equipment. An important part of any machine are piping systems. Pipelines operate under complex loading. They experience a high pressure, pulsating load and hydraulic shocks. Therefore, it's high demands on the mechanical properties of the material, the quality of the outer and inner surfaces, shape retention section, as well as the maximum thinning of the pipe wall. In the manufacture of pipes used various technological operations: distribution, crimping, bending, etc. The most widely used during manufacture ¬ SRI various connecting elements found dispensing process (and expanding) pipe end parts. In connection with the use of high-strength materials and moloplastichnyh, these traditional technologies do not allow to get quality parts, and also have low economic efficiency. Therefore, research in this field are relevant.

Keywords: mathematical modeling, rotary expansion method of tubes

При изготовлении ряда трубчатых деталей (рис. 1) применение процесса раскатки для получения раструбов на концевых участках более предпочтительно (чем, например, применение раздачи, развальцовки и др.) с точки зрения достижения больших степеней формоизменения в результате повышения пластических свойств материала заготовки под действием сжимающих напряжений.

В данной статье предлагается моделирование процесса раскатки концевых участков длинномерных трубчатых заготовок.

Процесс деформирования заключается в следующем. Исходную трубчатую заготовку l (рис. 2) помещают в зазор между оправкой 2 и давильным роликом 3. Под действием усилия P стенка заготовки сжимается, а вращающаяся оправка 2 обеспечивает бесцентровое вращение заготовки l. По мере утонения стенки заготовки в очаге деформации 4 диаметр заготовки увеличивается.

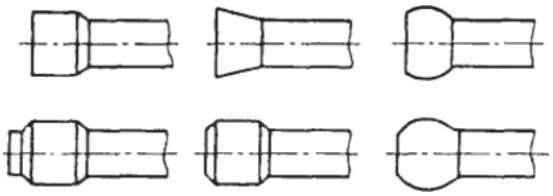

Рис. 1. Детали, получаемые раскаткой

Для разработки математической модели процесса деформирования используем метод баланса работ [3], заключающийся в равенстве работ внешних и внутренних сил (без учета сил контактного трения). Работа внешних сил равна:

$$A_{\text{внеш}} = A_p + A_M, \qquad (1)$$

где A_P – работа, связанная с утонением стенки под действием силы P; $A_м$ – работа, связанная с вращением заготовки моментом M.

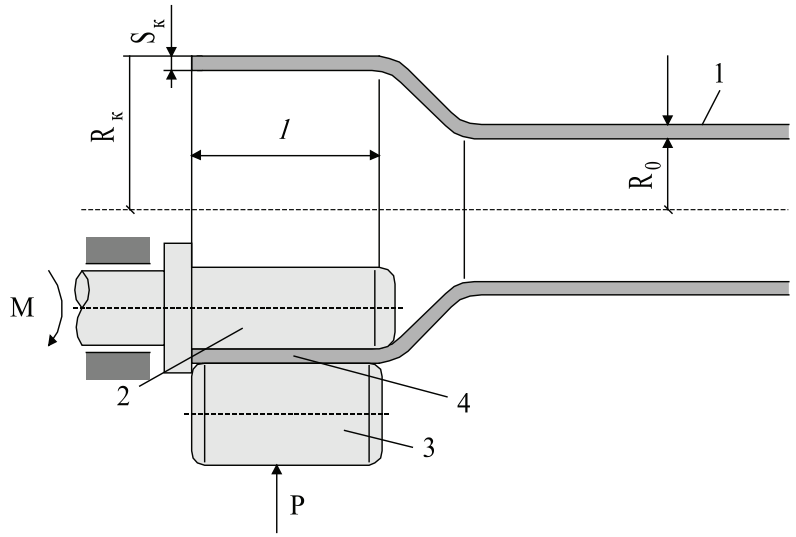

Рис. 2. Схема процесса раскатки:
1 – заготовка; 2 – приводная оправка; 3 – давильная оправка; 4 – очаг деформации

Подставив в уравнение (1) соответствующие силы P перемещения за один оборот детали, получим:

$$A_{внеш} = P\Delta s + M\varphi, \qquad (2)$$

где Δs – величина утонения стенки заготовки за один оборот детали; φ – угол поворота оправки за один оборот детали.

Работа внутренних сил равна

$$A_{внут} = \iiint\limits_{v} \sigma_S \varepsilon_i \, dV, \qquad (3)$$

где σ_S – напряжение текучести; ε_i – интенсивность деформаций; V – объем продеформированного металла.

Для одного оборота детали уравнение запишется в следующем виде (через средние подынтегральные величины):

$$A_{внут} = \sigma_S \Delta\varepsilon_i 2\pi Rls, \qquad (4)$$

где $\Delta\varepsilon_i$ – приращение интенсивности деформации за один оборот детали; l – длина очага деформации; R, s – текущие значения радиуса и толщины стенки в очаге деформации. Приравняв работу внешних и внутренних сил, получим:

$$P\Delta s + M\phi = \sigma_S \Delta\varepsilon_i 2\pi Rls. \qquad (5)$$

Выражение (5) содержит два неизвестных параметра P и M.

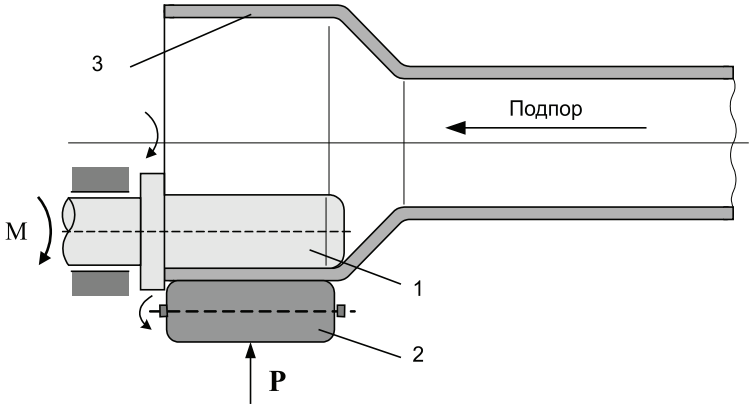

Рис. 3. Схема перспективного процесса раскатки труб с подпором кромки заготовки:
1 – ведущая оправка; 2 – ведомая давильная оправка; 3 – деформируемая заготовка

Пренебрегая внеконтактной деформацией на коническом участке, определим усилие P со стороны давильного ролика (рис. 3) в предположении его пропорциональности проекции площади контакта:

$$P = \sigma_S F, \qquad (6)$$

где F – проекция площади контакта, расположенная перпендикулярно действию радиального усилия P.

Известно, что определение площади контакта давильного инструмента с заготовкой зависит от действия многих факторов и представляет собой сложную задачу, поэтому найдем площадь приближенно.

Если принять, что размеры вращающейся оправки $r_{оп}$ и давильного ролика $r_р$ (рис. 3) соизмеримы друг с другом, т.е. $r_{оп} \approx r_р$, а радиус вращающейся заготовки R значительно больше, то проекцию ширины зоны контакта h можно определить по формуле.

$$h = \sqrt{r_p^2 - \left(r_p - \frac{\Delta s}{2}\right)^2}. \qquad (7)$$

Разницу размеров $r_{оп}$ и $r_р$ можно учесть через их среднее значение $r_{ср} = (r_{оп} + r_р)/2$, тогда

$$h = \sqrt{r_{ср}^2 - \left(r_{ср} - \frac{\Delta s}{2}\right)^2}. \qquad (8)$$

В результате получим:

$$P = \sigma_S hl. \qquad (9)$$

Величину крутящего момента найдем из уравнения (5):

$$M = \frac{\sigma_s \Delta\varepsilon_i 2\pi Rls - \sigma_s hl\Delta_s}{\phi}. \qquad (10)$$

Тангенциальное усилие P_θ (рис. 3) определим по зависимости

$$P_\theta = \frac{M}{r_{оп}}. \qquad (11)$$

Таким образом, определены основные выражения для расчета силовых параметров процесса.

Для создания компьютерной модели с графическим отражением динамической схемы процесса раскатки была разработана кинематическая модель процесса и определена общая последовательность расчета.

В начале задают исходные данные: геометрические параметры заготовки R_0, s_0, длину очага деформации l, требуемый радиус получаемой детали $R_к$, радиусы оправки $r_{оп}$ и давильного ролика $r_р$, скорость вращения оправки n, время обработки t_0, свойства материала в виде коэффициентов линейной аппроксимации кривой упрочнения $\sigma_{то}$ и П.

Затем в указанной последовательности определяют: конечные деформации – окружные ε_θ, меридиональные $\varepsilon_м$ (экспериментально) и деформации по толщине ε_n:

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_\theta &= \ln(R_к / R_0); \\ \varepsilon_m &= 0{,}1\varepsilon_\theta; \\ \varepsilon_n &= -\varepsilon_\theta - \varepsilon_m, \end{aligned}\right\} \qquad (12)$$

конечную толщину детали $s_к$ на радиус $R_к$:

$$s_к = s_0 \exp(\varepsilon_n), \qquad (13)$$

число оборотов оправки $N_{оп}$ и детали $N_д$ за время обработки t_0:

$$\left.\begin{aligned} N_{оп} &= \frac{nt_0}{60}; \\ N_n &= \frac{2N_0 r_{оп}}{R_K + R_0}; \end{aligned}\right\} \qquad (14)$$

утонение стенки заготовки за один оборот детали:

$$\Delta s = \frac{s_0 - s_к}{N_д}, \qquad (15)$$

приращение деформаций и времени обработки на один оборот детали:

$$\left.\begin{aligned} \Delta\varepsilon_n &= \ln\left(\frac{s - \Delta s}{s}\right); \\ \Delta\varepsilon_i &= -\Delta\varepsilon_n; \end{aligned}\right\} \qquad (16)$$

$$\Delta t = \frac{60}{n}\left(\frac{R}{r_{оп}}\right), \qquad (17)$$

накопленные деформации и время обработки:

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_i &= \varepsilon_i + \Delta\varepsilon_i; \\ \varepsilon_n &= -\varepsilon_i; \\ \varepsilon_\theta &= -\varepsilon_n / 1{,}1; \end{aligned}\right\} \qquad (18)$$

$$t = t + \Delta t \ (19),$$

изменение напряжения текучести:

$$\sigma_s = \sigma_{то} + \Pi\varepsilon_i; \qquad (20)$$

текущий радиус получаемой детали R и толщину стенки s:

$$R = R_0 \exp(\varepsilon_\theta); \qquad (21)$$

$$s = s - \Delta s; \qquad (22)$$

объем материала в очаге деформации:

$$V = 2\pi Rsl; \qquad (23)$$

работу внутренних сил за один оборот детали:

$$A_{внут} = \sigma_s \Delta\varepsilon_i V; \qquad 24)$$

необходимое усилие давильного ролика

$$P = K_1 \sigma_s F; \quad (25)$$

где K_1 – коэффициент запаса,

$$K_1 = 1{,}3 + 1{,}5;$$

работу внешней силы P за один оборот заготовки:

$$A_P = P\Delta s; \quad (26)$$

работу внешнего момента $A_м$ за один оборот заготовки:

$$A_м = A_{внут} - A_P; \quad (27)$$

величину момента M на оправке:

$$M = \frac{A_M}{\varphi}; \quad (28)$$

где $\varphi = \frac{2\pi R}{r_{оп}}$;

тангенциальное усилие:

$$P_\theta = \frac{M}{r_{оп}}; \quad (29)$$

необходимую мощность на оправке:

$$W = K_2 \frac{A_М}{\Delta t}; \quad (30)$$

где K_2 – коэффициент запаса, K_2 = 1,5...2,0.

Расчет по формулам (16)–(30) повторяется до тех пор, пока значение текущего радиуса R не достигает своей предельной величины $R_к$, время обработки t – соответственно значения $t_о$, а число оборотов детали – $N_д$.

Компьютерная модель процесса, составленная на языке Си++, помимо приведенной расчетной части, содержит статическую и динамическую схемы деформирования, меню ввода исходных данных, подпрограммы вывода числовой и графической информации, банк данных по основным механическим свойствам материала заготовок и головную программу управления.

Материал заготовки	Размеры, мм	Относительное усилие деформирования, Н/мм	Время обработки, с	Диаметр получаемого раструба, мм
Ст.3	60×3,5	1180/920	20	90
Ст.3	60×3,5	1280/1100	13	100
Ст.3	60×3,5	960/762	30	90
Ст.3	42,5×3,5	1026/1103	10	100
Ст.3	42,5×3,5	624/458	60	85
АМгбМ	50×2,25	1000/1010	4	80
АМгбМ	50×2,25	711/854	5	60
АМгбМ	50×2,25	510/590	12	52
АМгбМ	50×2,25	592/652	9	54

В процессе расчета выводится графическая информация о силовых параметрах процесса и геометрии получаемой детали. Предельные возможности деформирования оцениваются по результатам экспериментальных работ в области раскатки труб и прокатки листового материала.

Предлагаемая модель процесса раскатки концевого участка трубчатой заготовки была экспериментально проверена при раскатке стальных водопроводных труб из стали Ст.3 диаметром 60 и 42,5 мм с толщиной стенки 3,5 мм и труб из алюминиевого сплава АМгбМ диаметром 50 мм с толщиной стенки 2,25 мм.

Длина зоны обработки составляла 30–50 мм, число оборотов оправки в минуту – 250. В таблице приведены результаты экспериментов и теоретических расчетов при раскатке концевых участков труб.

Погрешность расчета деформирующего усилия (или времени обработки) не превышала 20–30 %. Время компьютерного расчета любого варианта процесса раскатки составляет 10–15 с.

Вывод

Применение моделирования формообразующих операций позволяет значительно сократить материальные и трудовые затраты при разработке новых технологических процессов, если разработанная модель отражает реальные закономерности процесса деформирования и все расчеты с использованием математической модели процесса полностью автоматизированы.

Список литературы

1. Чумадин А.С., Бурштейн Н.М., Архипов В.Н. Ротационно-давильный станок НИКПОС-1. Патент РФ № 2093290, 1997.

2. Бондаренко М.В., Хейн Вин Зо. Исследование возможностей раздачи и раскатки труб // Гагаринские чтения: тезисы доклада на международной студенческой конференции XXXI. – М.: МАТИ, 2006.

3. Феодосьев В.И Сопротивление материалов. – М.: Изд-во «Наука», 1972. – С. 544.

4. Горбунов М.Н. Технология заготовительно-штамповочных работ в производстве самолетов. – М.: Машиностроение, 1981. – 224 с.

5. Попов Е.А., Ковалев В.Г., Шубин И.Н. Технология и автоматизация листовой штамповки. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 480 с.

6. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. – Л.: Машиностроение, 1971. – 782 с.

References

1. Chumadin A.S., Burstein NM., Arkhipov V. Rotary spinning machine NIKPOS-1. RF patent number 2093290, 1997.

2. Bondarenko M.V., Hein Zaw Win. Feasibility study of distribution and rolling tubes. Abstracts of the international student conference XXXI «Gagarin readings». M.: MATI 2006.

3. Feodosyev V. I resistance materials. Moscow: Nauka, 1972, pp. 544.

4. Gorbunov M.N. Technology procurement and stamping operations in aircraft production. M.: Mechanical Engineering, 1981. 224.

5. Popov E.A., Kovalev V.G. Shubin, IN Technology and automation stamping. Moscow: Publishing House of the MSTU. NE Bauman, 2003. 480.

6. Romanovsky V.P. Handbook of cold forming. L.: Engineering, 1971. 782 p.

Рецензенты:

Симаранов С.Ю., д.т.н., профессор, генеральный директор ЗАО «Техноконсалт», г. Москва;

Лисов О.И., д.э.н., профессор кафедры «Информатика и программное обеспечение вычислительных систем» Национального исследовательского университета МИЭТ, г. Москва.

Работа поступила в редакцию 11.04.2014.