

УДК 621.78.1

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ РАСКАТКЕ ТРУБ

Хейн Вин Зо

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

Процессы раскатки реализуются в условиях внешнего сжатия элементов заготовки в очаге деформации, однако во внутренних слоях заготовки могут возникать и растягивающие напряжения. Из теории прокатки известно, что растягивающие напряжения в срединных слоях заготовки могут достигать значительной величины, поэтому важны такие схемы и режимы обработки, которые бы приводили к снижению этих растягивающих напряжений. В теоретическом плане основы расчетов напряженно-деформированного состояния и технологических параметров в процессах локального деформирования заложены в работах российских и зарубежных ученых, в том числе В.И. Ершова, Е.А. Унксова, А.И. Целикова, В.С. Смирнова, А.Г. Овчинниковым, В.Г. Кононенко, Н.И. Могильного, Л.Г. Юдина, С.П. Яковлева, Колпакчиогли, Кобаяси, Томсена и других. Наиболее близким к исследуемому процессу раскатки труб является хорошо изученный процесс продольной прокатки, однако процесс раскатки отличается от него замкнутым контуром заготовки и многопереходностью обработки со значительным упрочнением материала. Однако не все процессы ротационного деформирования в настоящее время являются достаточно изученными. Это в полной мере относится к перспективному процессу изготовления осесимметричных деталей летательных аппаратов раскаткой труб. Поэтому исследования в этом направлении являются актуальными.

Ключевые слова: раскатка труб, напряженно-деформированное состояние, очаг деформации при раскатке труб

RESEARCH ON STRESS-STRAIN STATE OF THE MATERIAL IN THE DEFORMATION OF ROLLING-OFF PROCESS OF PIPES

Hein Win Zaw

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

Rotary expansion processes are implemented in terms of external compression elements work-piece deformation zone, but in the inner layers of the work-piece may occur and tensile stresses. From the theory of rolling known that the tensile stress in the medial layers of the preform may reach considerable values, such schemes are therefore important and modes of processing that would have led to a reduction of the tensile stress. In theoretical terms basis of calculations of the stress-strain state and the technological parameters in the local deformation processes laid by Russian and foreign scientists, including V.I. Yershov, E.A. Unksovym, A.I. Tselikov, V.S. Smirnov, A. Ovchinnikov, V.G. Kononenko, N.I. Grave, L.G. Yudin, S.P. Yakovlev Kolpakchiogli Kobayashi, Thomsen and others. Closest to the test tube rolling process is a well-studied process of longitudinal rolling, but the process of rolling it differs from the closed loop harvesting and processing of multijunction a significant hardening of the material. However, not all rotational deformation processes are currently studied sufficiently. This fully applies to the manufacturing process perspective axisymmetric parts of aircraft pipe expansion. Therefore, research in this field are relevant.

Keywords: rotary pipe expansion, the stress-strain state, the deformation zone at the pipe expansion

Работа выполнена в «МАТИ» – Российском государственном технологическом университете им. К.Э. Циолковского. При раскатке (рис. 1, а) элемент трубчатой заготовки помещают между двумя роликами, которые под действием усилия P деформируют стенку заготовки, увеличивая ее диаметр. Известна раскатка заготовок, когда взамен наружного ролика используется вращающееся кольцо или матрица (рис. 1, б) [1, 2]. В последнем случае исходная заготовка имеет первоначально меньший диаметр и раскатывается до внутреннего диаметра кольца (матрицы), что повышает точность изготовления детали.

Недостатком приведенных схем, изображенных на рис. 1, является то, что они предназначены для деформирования элементов трубчатых заготовок.

Для деформирования концевых участков длинномерных труб перспективными являются процессы раскатки, изображенные на рис. 2–3 [5, 6].

Эти процессы раскатки дают принципиальную возможность получать детали типа переходник в условиях сжатия материала в очаге деформации, что, как известно, значительно повышает предельные возможности формоизменения концевой участка трубы. Кроме того, они могут применяться после традиционного процесса раздачи труб на жестком пуансоне, что даст возможность получать переходники с большим суммарным перепадом диаметров. Однако процессы, приведенные на рис. 2 и 3, еще не достаточно исследованы в технологическом плане.

Таким образом, проведенный литературный анализ технологии получения

деталей типа переходник показал, что наибольшее распространение получили процессы раздачи труб на жестком пуансоне. Процессы локального деформирования, включая раскатку труб, в настоящее время практически не использу-

ются. Не используются также процессы последовательного совмещения раздачи и раскатки труб.

Исходные уравнения равновесия для решения плоской задачи в цилиндрических координатах имеют вид (рис. 4).

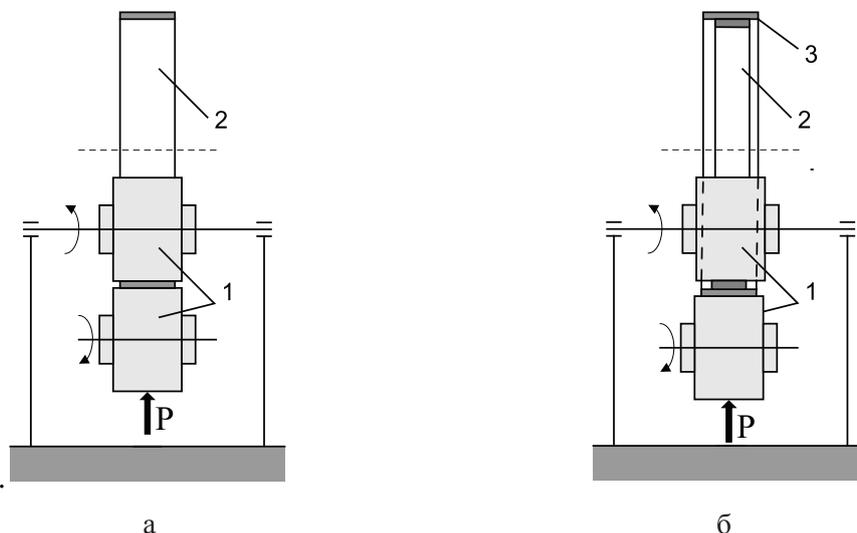


Рис. 1. Схема раскатки кольцевых заготовок:
а – между двумя роликами; б – между кольцом и роликом;
1 – ролики; 2 – заготовка; 3 – кольцо (матрица)

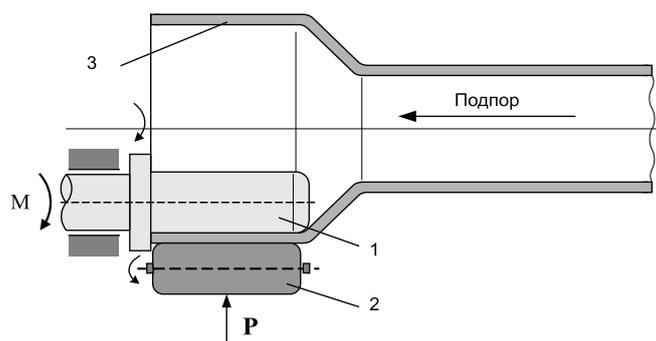


Рис. 2. Схема перспективного процесса раскатки труб с подпором кромки по патенту РФ № 2104112:
1 – ведущая оправка; 2 – ведомая давящая оправка; 3 – деформируемая заготовка

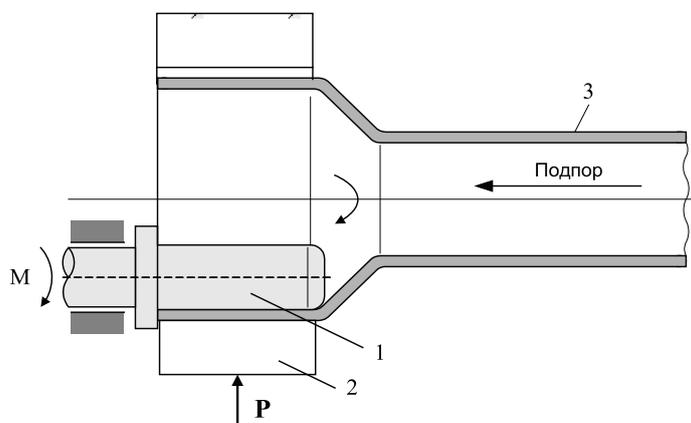


Рис. 3. Схема перспективного процесса раскатки труб с подпором кромки и давящим кольцом:
1 – ведущая оправка; 2 – ведомое давящее кольцо; 3 – деформируемая заготовка

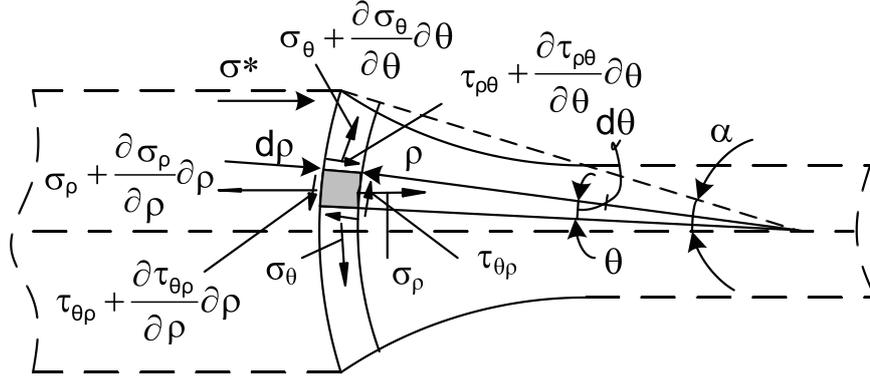


Рис. 4. К расчету напряженно-деформированного состояния

$$\rho \frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \theta} + \sigma_\rho - \sigma_\theta = 0; \quad \rho \frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \theta} = -\sigma_s; \quad (3)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \rho} + 2 \frac{\tau_{\rho\theta}}{\rho} = 0. \quad (1) \quad \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \rho} + 2 \frac{\tau_{\rho\theta}}{\rho} = 0. \quad (4)$$

Приближенное условие пластичности для зон отставания и опережения запишем в виде

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = \sigma_s. \quad (2)$$

Поставим (2) в первое уравнение системы (1), получим расчетные выражения для расчета напряженного состояния внутренних слоев заготовки в виде

Совместное решение (3) и (4) может быть приведено к виду [2]:

$$\rho^2 \frac{\partial^2 \tau_{\rho\theta}}{\partial \rho^2} + 3\rho \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \rho} - \frac{\partial^2 \tau_{\rho\theta}}{\partial \theta^2} = 0. \quad (5)$$

Решение уравнения (5) относительно $\tau_{\rho\theta}$ приводится к выражениям:

$$\begin{aligned} \tau_{\rho\theta} &= (C_1 \rho^{n1} + C_2 \rho^{n2}) (C_3 e^{m\theta} + C_4 e^{-m\theta}); \\ \sigma_\rho &= -m \left(\frac{C_1}{n1} \rho^{n1} + C_2 \frac{C_2}{n2} \rho^{n2} \right) (C_3 e^{m\theta} - C_4 e^{-m\theta}) + \sigma_s \ln \frac{R}{\rho} + \sigma^*; \\ \sigma_\theta &= -m \left(\frac{C_1}{n1} \rho^{n1} + C_2 \frac{C_2}{n2} \rho^{n2} \right) (C_3 e^{m\theta} - C_4 e^{-m\theta}) + \sigma_s \left(\ln \frac{R}{\rho} - 1 \right) + \sigma^*, \end{aligned} \quad (6)$$

где C_1, C_2 – произвольные постоянные, определяемые из граничных условий по ρ ; C_3, C_4 – произвольные постоянные, определяемые из граничных условий по θ ; $n1, n2, m$ – коэффициенты, причем $m = \pm \sqrt{n1(n1+2)} = \pm \sqrt{n2(n2+2)}$; σ^* – напряжение подпора при $\rho = R$, причем $\sigma^* = \sigma^*(\theta)$.

Точное аналитическое решение системы (6) практически не представляется возможным из-за большого числа произвольных постоянных, включая неизвестную функцию подпора $\sigma^* = \sigma^*(\theta)$.

В ряде работ систему (6) решают, вводя дополнительные допущения. Поэтому решим исходную систему уравнений (3) и (4)

применительно к плоскости симметрии заготовки, допуская различный линейный закон изменения $\tau_{\rho\theta}$ по координатам.

Допустим, что для заготовок, когда длина очага деформации «а» соизмерима с толщиной стенки S , величина $\tau_{\rho\theta}$ по толщине (по θ) и по радиусу ρ не меняется в середине очага деформации. Тогда уравнения (1) и (2) запишутся в виде

$$\rho \frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta = 0; \quad (7)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + 2 \frac{\tau_{\rho\theta}}{\rho} = 0; \quad (8)$$

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = \sigma_s. \quad (9)$$

Совместное решение (7) и (9) приводит к виду

$$\sigma_p = \sigma_s \ln\left(\frac{R}{\rho}\right) + \sigma^*, \quad (10)$$

где σ^* – напряжение подпора на входе в середине очага деформации.

Заметим, что из условия равновесия величина напряжения подпора σ^* в середине очага деформации и на свободных поверхностях при линейном распределении σ^* будет отличаться знаком (рис. 5).

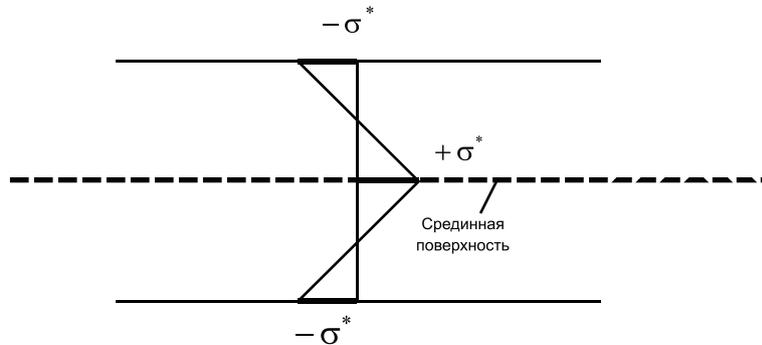


Рис. 5

Уравнение (8) используем как оценочное. Пусть величина $\tau_{p\theta}$ близка к максимальному значению, тогда (8) будет иметь вид $\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} = \pm \sigma_s$. То есть для малых углов θ , лежащих в пределе 0–0,15 радиан, изменение

σ_θ от величины $\tau_{p\theta}$ будет незначительным (до $\pm 15\%$ от σ_s).

Решение (10), приведенное совместно с распределением напряжений на контактных поверхностях, показано на рис. 6–8.

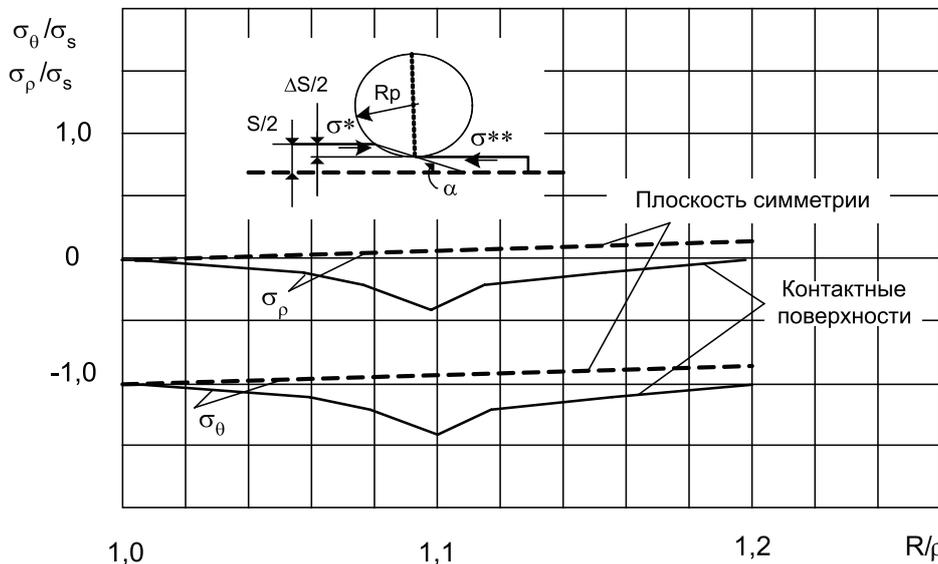


Рис. 6. Распределение напряжений по зонам очага деформации зависимости от напряжений подпора ($\alpha/\mu = 0,225$; $S/2 = 1,0$ мм; $\Delta S/2 = 0,2$ мм; $R_p = 12$ мм; $\sigma^*/\sigma_s = \sigma^{**}/\sigma_s = 0$)

Вывод

Из приведенных графиков распределения напряжений видно, что напряженное состояние в срединной части заготовки отличается от распределения напряжений на поверхностях контакта главным образом

тем, что в срединной части заготовки возникают растягивающие радиальные напряжения, величина которых увеличивается как по направлению к выходу заготовки из очага деформации, так и с увеличением напряжений подпора перед входом в очаг деформации σ^* и выходом из него σ^{**} .

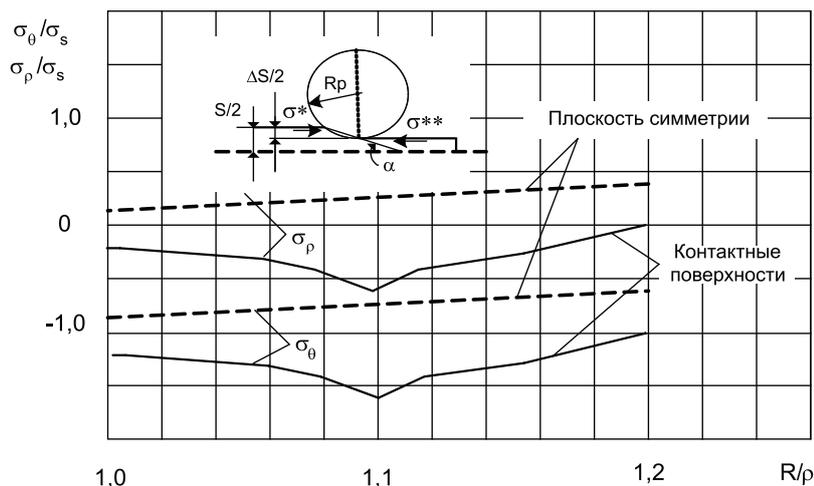


Рис. 7. Распределение напряжений по зонам очага деформации зависимости от напряжений подпора ($\alpha/\mu = 0,225$; $S/2 = 1,0$ мм; $\Delta S/2 = 0,2$ мм; $R_p = 12$ мм; $\sigma^*/\sigma_s = -0,2$; $\sigma^{**}/\sigma_s = 0$)

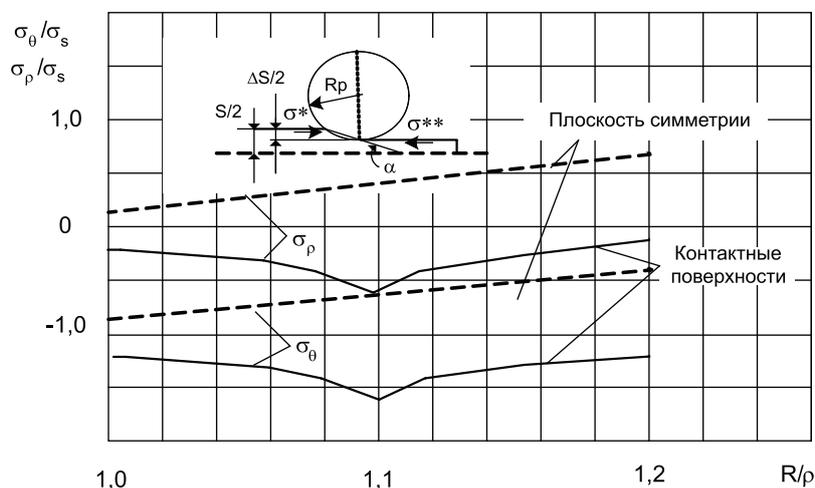


Рис. 8. Распределение напряжений по зонам очага деформации зависимости от напряжений подпора ($\alpha/\mu = 0,225$; $S/2 = 1,0$ мм; $\Delta S/2 = 0,2$ мм; $R_p = 12$ мм; $\sigma^*/\sigma_s = \sigma^{**}/\sigma_s = -0,2$)

Список литературы

1. 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.
2. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. – М.: Изд-во «Наука», 1972. – 544 с.
3. Листовая штамповка. Расчет технологических параметров: справочник / В.И. Ершов, О.В. Попов, А.С. Чумадин и др. – М.: Изд-во МАИ, 1999. – 516 с.
4. Смирнов В.С. Теория обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1973. – 496 с.
5. Киселев А.И., Горюшина М.В. Ротационно-давяльная обработка в листовой штамповке // Металл, оборудование, инструмент. – 2004. – № 3.
6. Чумадин А.С., Бурштейн Н.М., Архипов В.Н. Способ изменения диаметра концевой участка трубы. Патент РФ № 2104112, 1998.

References

1. Popov E.A., Kovalev V.G., Shubin I.N. Technology and automation stamping. – Moscow: Publishing House of the MSTU. NE Bauman, 2003. pp. 480.

2. Feodosyev V. I resistance materials. Moscow: Nauka, 1972. pp. 544.
3. Stamping. Calculation of process parameters. Directory / V.I. Ershov, O.V. Popov, A.S. Chumadin etc. M.: Publishing house MAI, 1999. pp. 516.
4. Smirnov V.S. Theory of metal forming. M.: Metallurgy, 1973. pp. 496.
5. Kiselev A.I., Goryushin M.V. Rotary-spinning in sheet forming // Metal, machinery, tools number 3, 2004.
6. Chumadin A.S., Burstein N.M., Arkhipov V. The method of changing the diameter of the pipe end portion. RF patent number 2104112, 1998.

Рецензенты:

Гагарина Л.Г., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Информатика и программное обеспечение вычислительных систем» Национального исследовательского университета МИЭТ, г. Москва;
 Симаранов С.Ю., д.т.н., профессор, генеральный директор ЗАО «Техноконсалт», г. Москва.

Работа поступила в редакцию 18.04.2014.