

УДК 621.7.04

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОМЕНТА ВНЕШНИХ СИЛ ПРИ РАСКАТКЕ ТРУБ

Хейн Вин Зо

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

Процессы локального деформирования (ротационная вытяжка, раскатка, ротационный обжим и другие) по сравнению с традиционными операциями обработки металлов давлением обладают рядом достоинств: меньшее деформирующее усилие, простота технологической оснастки, большие степени формоизменения заготовки. Большая трудоемкость работ на этапе технологической подготовки производства в самолетостроении связана в известной мере с тем, что при изготовлении деталей возможности пластического деформирования исходной заготовки всегда ограничены, поэтому и в теоретическом, и в практическом плане важное значение имеют методы обработки, которые увеличивают предельные деформации заготовки. Это ведет к уменьшению технологических операций и переходов, что в конечном итоге снижает трудоемкость изготовления деталей. Поэтому исследования в области локального деформирования являются актуальными. При раскатке 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. В последнем случае исходная заготовка имеет первоначально меньший диаметр и раскатывается до внутреннего диаметра кольца (матрицы), что повышает точность изготовления детали. 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.

**Ключевые слова:** результаты расчета и эксперимента по необходимому крутящему моменту  $M$

## THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF MOMENT OF EXTERNAL FORCES ON ROTARY EXPANSION OF PIPE

Hein Win Zaw

«МАТИ» – Moscow State Aviation Technological University, Russian University of Technology,  
Moscow, e-mail: taryar4ever@gmail.com

Processes of local deformation (rotary extractor, reeling, rotary sealer, etc.) when compared to traditional metal forming operations have a number of advantages: less deforming force, simple tooling, high degree of forming the preform. Much work on the complexity of the technological production preparation stage in the aircraft is connected to a certain extent so that the manufacture of parts possible plastic deformation of the original billet is always limited, both theoretically and in practice are important processing methods that increase the limit of deformation of the workpiece. This leads to a reduction in processing steps and transitions, which ultimately reduces the complexity of manufacturing details. Therefore, research in the field of local deformation are relevant. During rotary expansion, a tubular element preform was placed between two rollers, under the action of forces which deform the wall of the preform  $P$  by increasing its diameter. Unrolling known pieces, when instead of a rotating roller outer ring or matrix. In the latter case the initial preform initially has a smaller diameter and is rolled to the inside diameter of the ring (matrix), which improves the accuracy of manufacturing the part. Rolling processes are implemented in terms of external compression procurement elements in the deformation zone, but in the inner layers of the workpiece 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.

**Keywords:** results of calculation and experiment for the required torque  $M$

Процессы локального деформирования (ротационная вытяжка, раскатка, ротационный обжим и другие) по сравнению с традиционными операциями обработки металлов давлением обладают рядом достоинств: меньшее деформирующее усилие, простота технологической оснастки, большие степени формоизменения заготовки.

Большая трудоемкость работ на этапе технологической подготовки производства в самолетостроении связана в известной мере с тем, что при изготовлении деталей возможности пластического деформирова-

ния исходной заготовки всегда ограничены, поэтому и в теоретическом, и в практическом плане важное значение имеют методы обработки, которые увеличивают предельные деформации заготовки. Это ведет к уменьшению технологических операций и переходов, что в конечном итоге снижает трудоемкость изготовления деталей. Поэтому исследования в области локального деформирования являются актуальными.

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.

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.

Рассмотрим симметричный процесс раскатки с двумя ведущими оправками одинакового диаметра (рис. 2). Разобьем заготовку на две равные части и в силу симметрии рассмотрим только одну (верхнюю) часть.

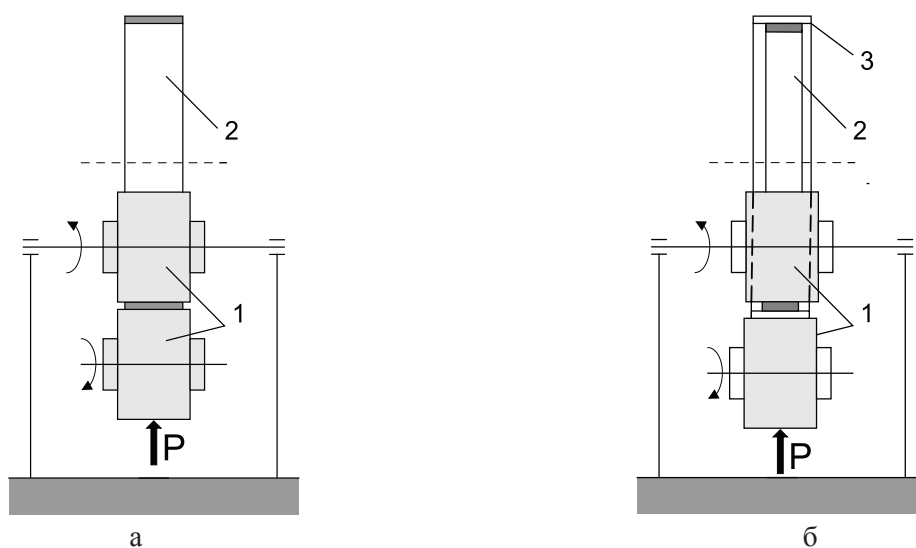


Рис. 1. Схема раскатки кольцевых заготовок:  
а – между двумя роликами; б – между кольцом и роликом  
(1 – ролики; 2 – заготовка; 3 – кольцо (матрица))

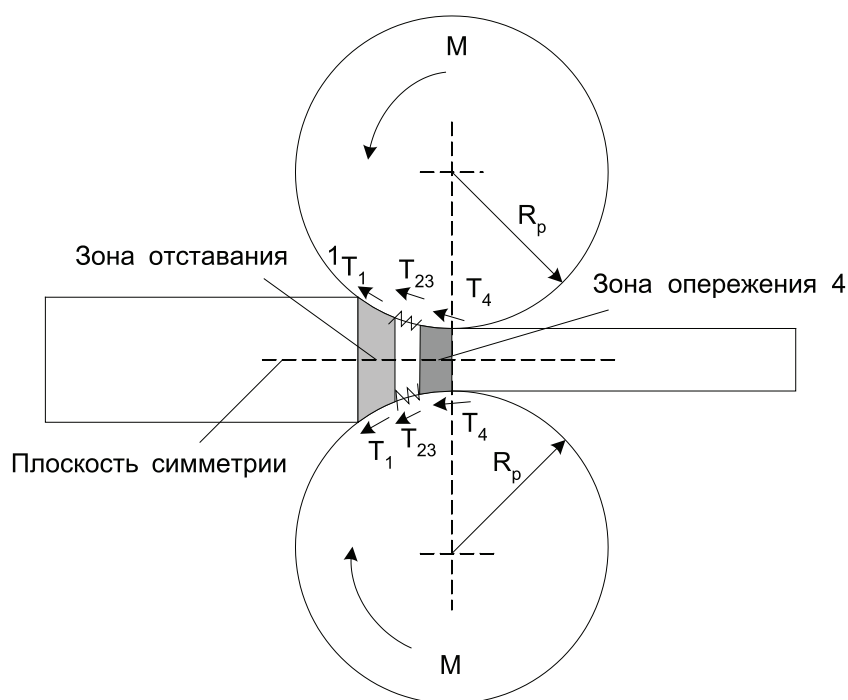


Рис. 2. К определению крутящих моментов двух ведущих оправок

Деформирование осуществляется за счет вращения оправки. Момент внешних сил  $M$ , прикладываемый к ведущей оправке, создает в зонах прилипания 2 и 3 активную силу  $T_{23}$ , которая обеспечивает перемещение заготовки и работу деформации, а также силы пассивного трения в зоне отставания  $T_1$  и в зоне опережения  $T_4$ , работы которых увеличивают величину внешнего момента  $M$ .

Относительно оси вращения верхней ведущей оправки равенство моментов указанных сил имеет вид

$$M = (T_{23} + T_1 + T_4) R_p. \quad (1)$$

Для двух ведущих оправок будем иметь

$$2M = 2(T_{23} + T_1 + T_4) R_p,$$

где  $2T_{23} R_p$  – внешний момент, который обеспечивает работу деформации  $A_{\text{деф}}$ , т.е.

$$2 T_{23} R_p = A_{\text{деф}} / \varphi,$$

где  $\varphi$  – угол поворота оправки за один оборот заготовки.

Таким образом, выражение (1) для двух ведущих оправок может быть переписано в виде

$$2M = A_{\text{деф}} / \varphi + 2(T_1 + T_4) R_p. \quad (2)$$

В уравнении (1) силы трения в зоне отставания  $T_1$  и в зоне опережения  $T_4$  равны:

$$T_1 = \int_{\rho_{ог}}^R \tau_{к1} Z d\rho; \quad T_4 = \int_r^{\rho_{он}} \tau_{к4} Z d\rho, \quad (3)$$

где  $\tau_{к1}$ ,  $\tau_{к4}$  – контактные касательные напряжения от действия сил контактного трения, рассчитываемые выражениями (1), (2) соответственно;  $Z$  – единичная ширина очага деформации ( $Z = 1$ );  $\rho$  – текущий радиус.

Аналитически расчет уравнений (3) с некоторой погрешностью может быть осуществлен через средние подынтегральные значения  $\tau_{к1}$ ,  $\tau_{к4}$ , зная размеры контактных зон.

Рассмотрим процесс раскатки с двумя оправками разного диаметра, одна из которых (верхняя) – ведущая, а вторая (нижняя) – ведомая (рис. 3).

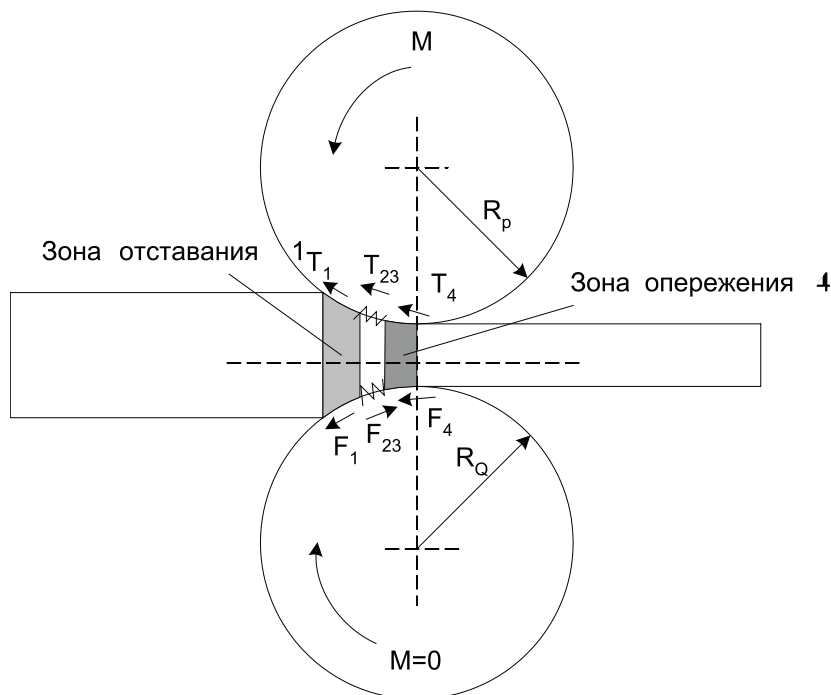


Рис. 3. К определению крутящих моментов при одной ведущей оправке

Относительно оси вращения верхней ведущей оправки равенство моментов будет иметь вид (1), где  $T_{23} R_p$  – момент активной силы, необходимый для формообразования заготовки и вращения ведомой оправки, т.е.

$$T_{23} R_p = A_{\text{деф}} / \varphi + F_{23} R_p.$$

На ведомую (нижнюю) оправку со стороны заготовки действует активная сила  $F_{23}$  и силы пассивного трения  $F_1$  и  $F_4$ , моменты которых уравновешиваются, т.е.

$$F_{23} R_Q = (F_1 + F_4) R_Q \quad (4)$$

или

$$F_{23} = (F_1 + F_4). \quad (5)$$

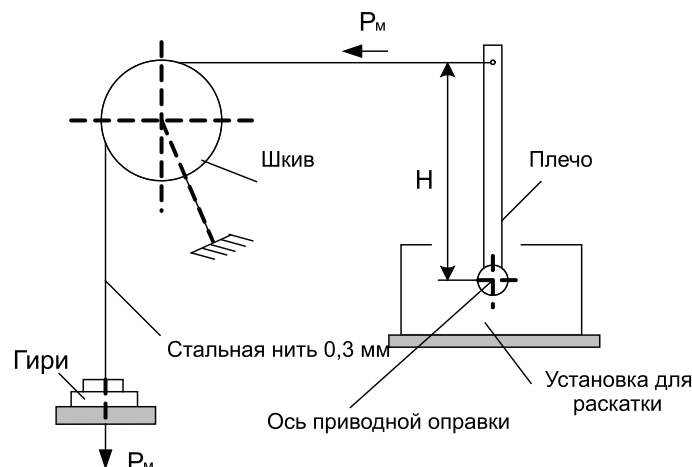


Рис. 4. Схема приспособления для определения крутящего момента

Таким образом, уравнение моментов для одной ведущей оправки (рис. 3) будет иметь вид

$$M = A_{\text{деф}} / \varphi + F_{23} R_p + (T_1 + T_4) R_p \quad (6)$$

или

$$M = A_{\text{деф}} / \varphi + (T_1 + T_4 + F_1 + F_4) R_p \quad (7)$$

Момент внешних сил (крутящий момент) определялся с использованием специального приспособления, установленного на установке для раскатки, схема которого приведена на рис. 4, а внешний вид представлен на рис. 5.

Величина момента (рис. 4) определялась по известной формуле  $M = P_M \cdot H$  в момент перемещения заготовки под заданной нагрузкой. Влияние сил трения в передачах установки (шкив, редуктор и т.д.) компенсировалось специальной установочной гирей.

Результаты экспериментов применительно к ведущей давяльной оправке  $\varnothing 24$  мм и ведомой –  $\varnothing 60$  мм приведены в табл. 1.



Рис. 5. Общий вид приспособления для определения крутящего момента

Таблица 1

Момент внешних сил при раскатке

№ п/п	Заготовка, материал, размеры	Усилие со стороны давяльной оправки, кг	Вес гирь $P_M$ , кг	Плечо $H$ , м	Толщина в зоне контакта, мм	Момент, $M$ , кгм
1	Полоса, АМг6М 20×1,95 мм	500	3,85	0,34	<b>1,93</b>	<b>1,29</b>
2		750	3,45	0,34	<b>1,90</b>	<b>1,17</b>
3		1000	6,0	0,34	<b>1,80</b>	<b>2,04</b>
4	Труба Д16Т $\varnothing 30 \times 10 \times 1,5$	500	3,2	0,34	<b>1,45</b>	<b>1,09</b>
5		1000	4,5	0,34	<b>1,40</b>	<b>1,53</b>
6		1000	4,4	0,34	<b>0,93</b>	<b>1,50</b>
7	Полоса Д16Т 20×0,95 мм	1500	6,4	0,34	<b>0,90</b>	<b>2,18</b>
8		1000	4,8	0,34	<b>2,05</b>	<b>1,63</b>
9	Труба АМг6М $\varnothing 50 \times 24 \times 2,1$	1500	6,5	0,34	<b>1,95</b>	<b>2,21</b>

В табл. 2 приведено сопоставление результатов расчета и эксперимента по необ-

ходимому крутящему моменту  $M$  для деформирования плоских и трубных заготовок.

Таблица 2

Результаты расчета и эксперимента по необходимому крутящему моменту М

№ п/п	Заготовка, материал, размеры	Погонное усилие, P/L, кг/мм	Длина очага, $a = b$ , мм (экспер)	Длина очага, $a = b$ , мм (расчет)	Толщина в зоне контакта, мм	Момент, М, кгм (экспер)	Момент, М, кгм (расчет)
1	Полоса, АМг6М 20×1,95 мм	25,0	1,0	0,6	1,93	1,29	1,15
2		37,5	1,5	0,9	1,90	1,17	2,0
3		50,0	2,0	1,6	1,80	2,04	3,4
4	Труба Д16Т Ø 30×10×1,5	50,0	1,0	0,9	1,45	1,09	1,9
5		100,0	1,8	1,3	1,40	1,53	2,7
6	Полоса Д16Т 20×0,95 мм	50	1,0	0,6	0,93	1,50	2,4
7		75	1,5	0,9	0,90	2,18	3,7
8	Труба АМг6М Ø 50×24×2,1	41,7	1,2	0,94	2,05	1,63	2,2
9		62,5	1,5	1,33	1,95	2,21	3,1

**Вывод**

Из таблицы видно, что расчетные значения крутящего момента отражают физические закономерности процесса, однако превышают экспериментальные значения примерно в 1,5–2,0 раза. Это связано с приближенной зависимостью, которую (по результатам экспериментов) можно уточнить, введя в нее корректирующий коэффициент  $K = 0,6–0,7$ . С другой стороны, повышенные расчетные значения крутящего момента удовлетворяют практическим требованиям, т.к. не требуется введение так называемого коэффициента запаса по моменту (мощности) при проектировании установок для раскатки труб.

**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. Листовая штамповка. Расчет технологических параметров. Справочник / В.И. Ершов, О.В. Попов, А.С. Чумадин и др. – М.: Изд-во МАИ, 1999. – 516 с.
3. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1996. – 420 с.
4. Чумадин А.С., Бурштейн Н.М., Архипов В.Н. Способ изменения диаметра концевой участка трубы. Патент РФ № 2104112, 1998.
5. Абибов А.Л., Бирюков Н.М., Бойцов В.В. и др. Технология самолетостроения. – М.: Машиностроение, 1970. – 499 с.
6. Листовая штамповка. Расчет технологических параметров. Справочник / В.И. Ершов, О.В. Попов, А.С. Чумадин и др. – М.: Изд-во МАИ, 1999. – 516 с.

7. Хейн Вин Зо Экспериментальные исследования процесса раскатки труб // Кузнечно-штамповочное производство // Обработка материалов давлением. – 2007. – № 12. – С. 11–14.

**References**

1. Popov E.A., Kovalev V.G., Shubin I.N. Technology and automation stamping. – Moscow: Publishing House of the MSTU. NE Bauman, 2003. 480 p.
2. Stamping. Calculation of process parameters. Directory / V.I. Ershov, O.V. Popov, A.S. Chumadin etc. M.: Publishing house MAI, 1999. 516 p.
3. LM Kachanov Fundamentals of the theory of plasticity. Moscow: Nauka, 1996. 420 p.
4. Chumadin A.S., Burstein N.M., Arhipov V.N., Way of change of diameter of a trailer site of a pipe. no. 2104112, 1998 patent Russian Federation.
5. Abibov A.L., unsociable persons of H.M., Fighters of B.B., etc. Technology of aircraft construction. M.: Mechanical engineering, 1970. 499 p.
6. Sheet stamping. Calculation of technological parameters. Directory / Century. I.Ershov, O.V. Popov, A.S. Chumadin, etc. M.: MAI publishing house, 1999. 516 p.
7. Hein Win Zaw Experimental studies of the process rolling tubes // Forging and stamping production. Materials processing pressure. Number 12, 2007, pp. 11–14.

**Рецензенты:**

Гагарина Л.Г., д.т.н., профессор, заведующая кафедрой «Информатика и программное обеспечение вычислительных систем» Национального исследовательского университета МИЭТ, г. Москва;

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

Работа поступила в редакцию 26.08.2014.