

**УДК 621.7.04**

**05. 07. 02 - Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов**

**Хейн Вин Зо**

«МАТИ» - Российский государственный технологический университет им. К.Э.Циолковского  
Россия, Москва

Кандидат технических наук

Докторант кафедры Технология Производства Летательных Аппаратов «ТПЛА»

E-Mail: [taryar4ever@gmail.com](mailto:taryar4ever@gmail.com)

## **Теоретические исследования контактных давлений в очаге деформации при раскатке труб**

**Аннотация:** Процессы локального деформирования (ротационная вытяжка, раскатка, ротационный обжим и другие) по сравнению с традиционными операциями обработки металлов давлением обладают рядом достоинств: меньше 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**.

Работа связана с совершенствованием методов расчета напряженно-деформированного состояния в операциях штамповки при изготовлении деталей летательных аппаратов, основы которых были заложены российскими и зарубежными учеными.

**Ключевые слова:** Контактные давления в очаге деформации в зонах отставания; торможения; ускорения и опережения.

Идентификационный номер статьи в журнале 23TVN114

**Hein Win Zaw**  
«MATI – Russian State Technological University named after K.E. Tsiolkovsky»  
Russia, Moscow  
E-Mail: [taryar4ever@gmail.com](mailto:taryar4ever@gmail.com)

## **Theoretical studies of the contact pressure in the deformation zones of rotary pipe expansion**

**Abstract:** Processes of local deformation (rotary expansion, forming, rotary crimp and others) compared to traditional metal forming operations have a number of advantages: less deforming force, simple tooling, forming large extent workpiece.

A large volume of work for technological production preparation stage in aircraft to a certain extent connected with the fact that the possibility of the manufacture of components of plastic deformation of the original billet is always limited, so theoretically and in practice are important processing methods that increase the limiting 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.

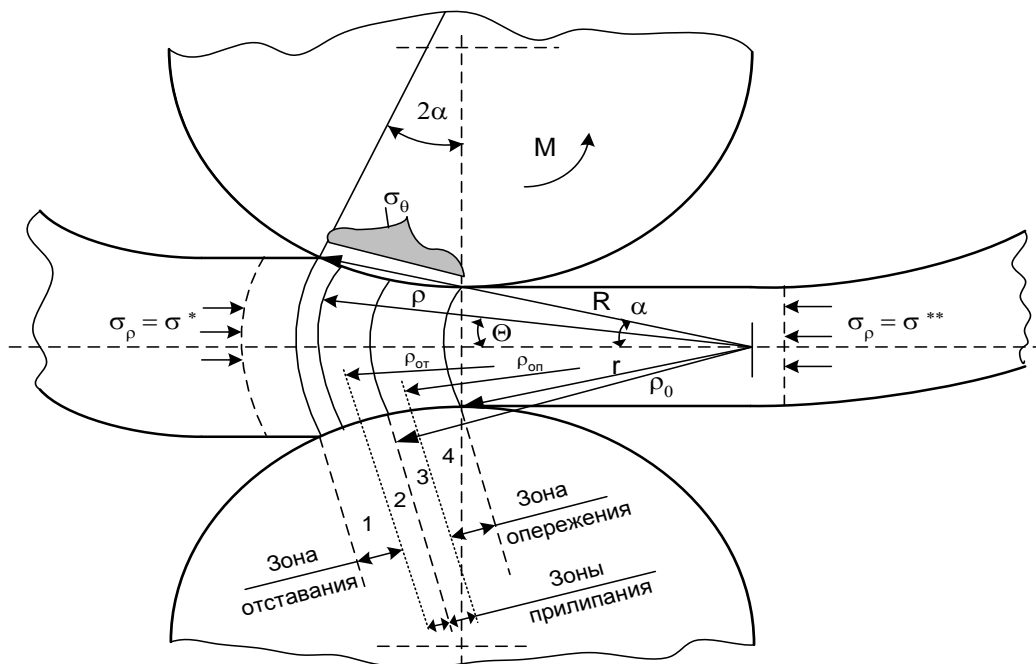
This article is concerned with the improvement of methods of stress-strain state in stamping operations in the manufacture of aircraft parts, whose foundations were laid by Russian and foreign scientists.

**Keywords:** Contact pressures in the deformation: the backlog; the braking the acceleration and timing zones.

Identification number of article 23TVN114

Примем основные предположения и допущения применительно к симметричному процессу раскатки в следующем виде [1, 2,3,4 и 11]:

- деформированное состояние плоское ( $\varepsilon_z=0$ );
- кривизна заготовки много меньше кривизны деформируемых оправок;
- очаг деформации симметричный относительно срединной поверхности заготовки;
- напряжения  $\sigma_\rho$  за границами очага деформации отличны от нуля;
- контактное трение (рис. 1) подчиняется закону Амонтона – Кулона в зонах отставания и опережения и равно максимальной величине в зонах прилипания (торможения и ускорения).



**Рис. 1.** Расчетная схема раскатки для определения контактных давлений  $\sigma_\theta$

Решим указанную задачу следующим образом.

Разобьем длину контакта заготовки и инструмента на 4 зоны: зону отставания 1; зону торможения 2; зону ускорения 3 и зону опережения 4. В зонах 1 и 4 будем использовать закон Амонтона-Кулона; в зонах 2 и 3 будем считать трение максимальным.

Для зоны 1 - зоны отставания (рис. 2) имеем следующую систему уравнений.

Уравнение равновесия, которое применительно к решаемой задаче запишется в виде:

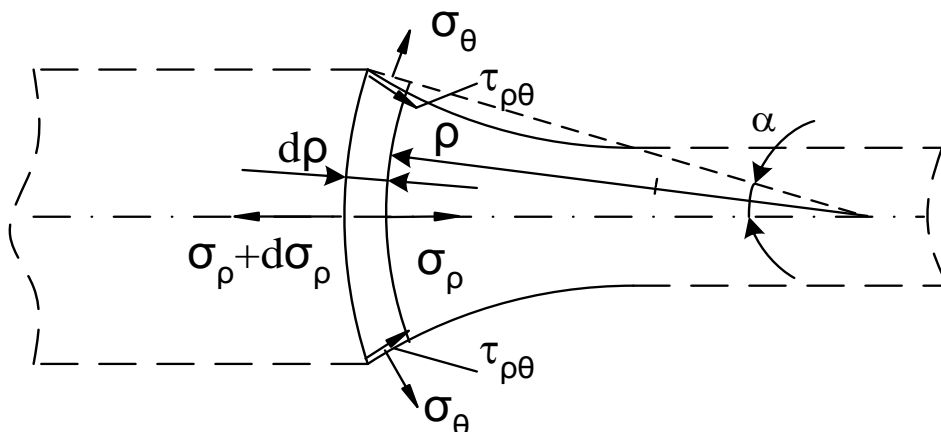
$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta - \frac{\mu}{\alpha} |\sigma_\theta| = 0. \quad (1)$$

Условие пластичности для этой зоны запишем в приближенном виде:

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

Касательные напряжения от сил контактного трения запишутся в виде:

$$\tau_k = \tau_{\rho\theta} = -\mu|\sigma_\theta|. \quad (3)$$



**Рис. 2.** Расчет контактных давлений в зоне отставания 1

Контактное давление  $\sigma_\theta$  определим путем совместного решения уравнений (1) и (2). Последовательно получим.

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_s - \frac{\mu}{\alpha} |\sigma_\theta| = 0, \text{ где } |\sigma_\theta| = \sigma_s - \sigma_\rho \quad (4)$$

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{\sigma_s}{\rho} - \frac{\mu}{\rho\alpha} (\sigma_s - \sigma_\rho) = 0.$$

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{\sigma_s}{\rho} - \frac{\mu\sigma_s}{\rho\alpha} + \frac{\mu\sigma_\rho}{\rho\alpha} = 0.$$

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{\mu\sigma_\rho}{\rho\alpha} = \frac{\sigma_s}{\rho} \left( \frac{\mu}{\alpha} - 1 \right). \quad (5)$$

Последнее выражение (5) есть дифференциальное уравнение типа:

$y' + P(x)y = Q(x)$ , решение которого выражается формулой

$$y = \left[ \int dx Q(x) e^{\int P(x) dx} + C1 \right] e^{-\int P(x) dx}. \quad (6)$$

Поэтому общее решение уравнения (5) имеет вид:

$$\sigma_\rho = \left[ \int d\rho \frac{\sigma_s}{\rho} \left( \frac{\mu}{\alpha} - 1 \right) e^{\int \frac{\mu d\rho}{\rho\alpha}} + C1 \right] e^{-\int \frac{\mu d\rho}{\rho\alpha}};$$

$$\sigma_\rho = \left[ \int d\rho \frac{\sigma_s}{\rho} \left( \frac{\mu}{\alpha} - 1 \right) \rho^{\frac{\mu}{\alpha}} + C1 \right] \rho^{-\frac{\mu}{\alpha}};$$

$$\sigma_\rho = \left[ \sigma_s \left( \frac{\mu}{\alpha} - 1 \right) \int^{\frac{\mu}{\alpha}-1} \rho d\rho + C1 \right] \rho^{-\frac{\mu}{\alpha}};$$

$$\sigma_p = \left[ \sigma_s \left( \frac{\mu}{\alpha} - 1 \right) \frac{\rho^{\frac{\mu}{\alpha}}}{\frac{\mu}{\alpha}} + C1 \right] \rho^{-\frac{\mu}{\alpha}};$$

$$\sigma_p = \sigma_s \left( \frac{\mu}{\alpha} - 1 \right) \frac{1}{\frac{\mu}{\alpha}} + C1 \rho^{-\frac{\mu}{\alpha}};$$

$$\sigma_p = \sigma_s \left( 1 - \frac{\alpha}{\mu} \right) + C1 \rho^{-\frac{\mu}{\alpha}}. \quad (7)$$

Определим C1 из граничных условий:  $\sigma_p = \sigma^*$  при  $\rho = R$  (рис. 1). Имеем:

$$C1 = \sigma^* R^{\frac{\mu}{\alpha}} - \sigma_s \left( 1 - \frac{\alpha}{\mu} \right) R^{\frac{\mu}{\alpha}}. \quad (8)$$

Подставим C1 в (7), последовательно получим

$$\sigma_p = \sigma_s \left( 1 - \frac{\alpha}{\mu} \right) + \left[ \sigma^* R^{\frac{\mu}{\alpha}} - \sigma_s \left( 1 - \frac{\alpha}{\mu} \right) R^{\frac{\mu}{\alpha}} \right] \rho^{-\frac{\mu}{\alpha}};$$

$$\sigma_p = \sigma_s \left( 1 - \frac{\alpha}{\mu} \right) + \sigma^* \left( \frac{R}{\rho} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} - \sigma_s \left( 1 - \frac{\alpha}{\mu} \right) \left( \frac{R}{\rho} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}};$$

$$\sigma_p = \sigma_s \left( 1 - \frac{\alpha}{\mu} \right) \left[ 1 - \left( \frac{R}{\rho} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} \right] + \sigma^* \left( \frac{R}{\rho} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}}. \quad (9)$$

Из последнего выражения (9) и условия пластичности (2) получим искомую величину :  
 $\sigma_\theta = \sigma_p - \sigma_s$  или:

$$\sigma_\theta = \sigma_s \left( 1 - \frac{\alpha}{\mu} \right) \left[ 1 - \left( \frac{R}{\rho} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} \right] - \sigma_s + \sigma^* \left( \frac{R}{\rho} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}}.$$

Окончательно имеем выражение для расчета контактного давления  $\sigma_\theta$  в зоне 1 в виде:

$$\sigma_\theta = \sigma_s \left\{ \left( 1 - \frac{\alpha}{\mu} \right) \left[ 1 - \left( \frac{R}{\rho} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} \right] - 1 \right\} + \sigma^* \left( \frac{R}{\rho} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}}, \quad (10)$$

где  $\sigma_s = \text{const}$  (как средняя подынтегральная величина);  $\sigma^*$  - величина подпора со стороны входа заготовки в очаг деформации.

Для зоны 2 - зоны прилипания-торможения (рис. 3) считаем величину контактного трения максимальным. В результате имеем следующую систему уравнений.

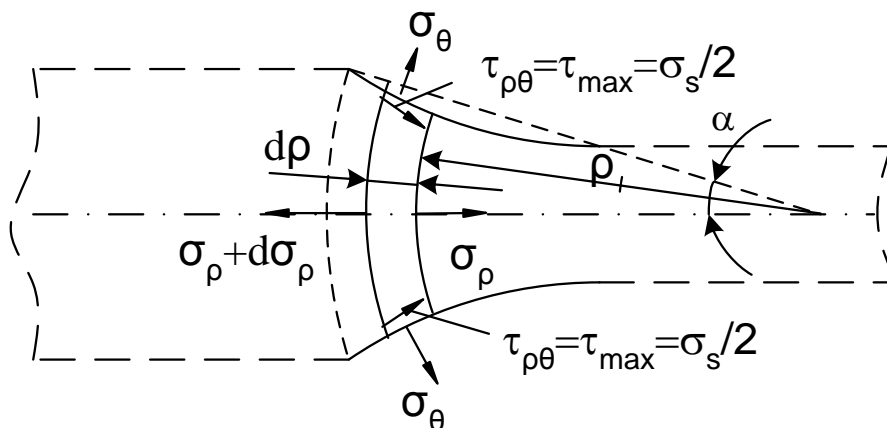


Рис. 3. Расчет контактных давлений в зоне 2

Уравнение равновесия для зоны 2 имеет вид:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta - \frac{\tau_{\max}}{\alpha} = 0. \quad (11)$$

Здесь условие пластичности записывается в виде [1]:

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = 0, \quad (12)$$

Последнее условие (12) следует из выражения  $(\sigma_\rho - \sigma_\theta)^2 + 4\tau_{\rho\theta}^2 = \sigma_s^2$ ,

если  $\tau_{\rho\theta} \rightarrow \tau_{\max} = \frac{\sigma_s}{2}$ .

Из (11) и (12) имеем  $\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} - \frac{\tau_{\max}}{\alpha} = 0$ , где  $\tau_{\max} = \frac{\sigma_s}{2}$ .

Далее последовательно получим:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} - \frac{\sigma_s}{2\alpha} = 0;$$

$$\int_{\sigma_{\rho_{от}}}^{\sigma_\rho} d\sigma_\rho = \frac{\sigma_s}{2\alpha} \int_{\rho_{от}}^{\rho} \frac{d\rho}{\rho};$$

$$\sigma_\rho - \sigma_{\rho_{от}} = \frac{\sigma_s}{2\alpha} \ln \frac{\rho}{\rho_{от}}.$$

Окончательно распределение радиальных напряжений имеет вид

$$\sigma_\rho = -\frac{\sigma_s}{2\alpha} \ln \left( \frac{\rho_{от}}{\rho} \right) + \sigma_{\rho_{от}}, \quad (13)$$

Из условия (12) следует  $\sigma_\theta = \sigma_\rho$  и, соответственно, величина контактных давлений равна

$$\sigma_\theta = -\frac{\sigma_s}{2\alpha} \ln\left(\frac{\rho_{от}}{\rho}\right) + \sigma_{\rho_{от}}, \quad (14)$$

где, в соответствии с (14),  $\sigma_{\rho_{от}} = \sigma_s \left(1 - \frac{\alpha}{\mu}\right) \left[1 - \left(\frac{R}{\rho_{от}}\right)^{\frac{\mu}{\alpha}}\right] - \sigma_s + \sigma^* \left(\frac{R}{\rho_{от}}\right)^{\frac{\mu}{\alpha}}$ .

Для зоны 3 - зоны прилипания-ускорения (рис. 4) также считаем величину контактного трения максимальным. В результате имеем следующую систему уравнений.

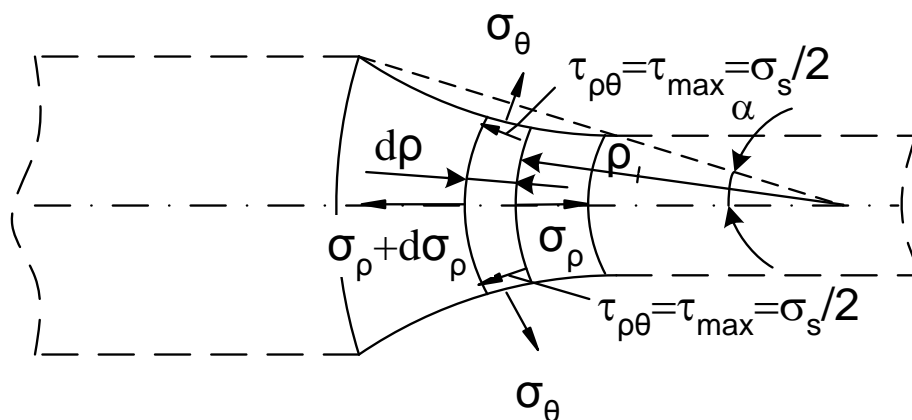


Рис. 4. Расчет контактных давлений в зоне ускорения 3

Уравнение равновесия имеет вид

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta + \frac{\tau_{\max}}{\alpha} = 0, \quad (15)$$

где  $\tau_{\max} = \frac{\sigma_s}{2}$ .

Условия пластичности в форме (17):  $\sigma_\rho - \sigma_\theta = 0$ .

Совместное решение (15) и (12) имеет вид

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{\tau_{\max}}{\alpha} = 0;$$

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{\sigma_s}{\rho 2\alpha} = 0;$$

$$\int_{\sigma_{\rho_{от}}}^{\sigma_\rho} d\sigma_\rho = \frac{\sigma_s}{2\alpha} \int_{\rho_{от}}^{\rho} \frac{d\rho}{\rho};$$

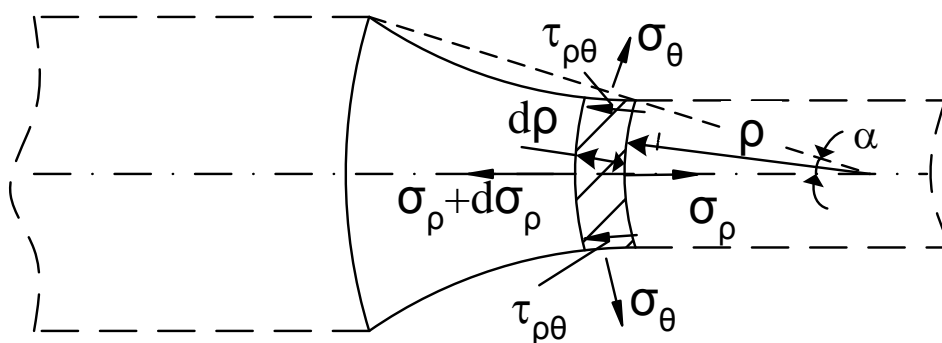
$$\sigma_\rho - \sigma_{\rho_{оп}} = -\frac{\sigma_s}{2\alpha} \ln \frac{\rho}{\rho_{оп}};$$

$$\sigma_\rho = -\frac{\sigma_s}{2\alpha} \ln \left( \frac{\rho}{\rho_{оп}} \right) + \sigma_{\rho_{оп}}$$

Окончательно (из условия:  $\sigma_\theta = \sigma_\rho$ ) получим

$$\sigma_\theta = -\frac{\sigma_s}{2\alpha} \ln \left( \frac{\rho}{\rho_{оп}} \right) + \sigma_{\rho_{оп}}, \quad (16)$$

где, согласно (9),  $\sigma_{\rho_{оп}} = \sigma_s \left( \frac{\alpha}{\mu} + 1 \right) \left[ 1 - \left( \frac{\rho_{оп}}{r} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} \right] - \sigma_s + \sigma^{**} \left( \frac{\rho_{оп}}{r} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}}$



**Рис. 5.** Расчет контактных давлений в зоне опережения 4

Для зоны 4 - зоны опережения (рис. 5) имеем следующую систему уравнений.

Уравнение равновесия

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta - \frac{\mu}{\alpha} |\sigma_\theta| = 0. \quad (17)$$

Условие пластичности

$$\sigma_s = \sigma_\rho - \sigma_\theta. \quad (18)$$

Касательные напряжения от сил контактного трения равны

$$\tau_k = \tau_{\rho\theta} = +\mu |\sigma_\theta|. \quad (19)$$

По аналогии с решением, приведенным для зоны 1, получим. Совместное решение (18) и (19) имеет вид

$$\sigma_\rho = \sigma_s \left( \frac{\alpha}{\mu} + 1 \right) + C1 \rho^{\frac{\mu}{\alpha}}. \quad (20)$$

Произвольную постоянную C1 определим из граничных условий:  $\sigma_\rho = \sigma^{**}$  при  $\rho = r$

(рис. 1). Имеем:  $\sigma^{**} = \sigma_s \left( \frac{\alpha}{\mu} + 1 \right) + C1 r^{\frac{\mu}{\alpha}};$



$$C1 = \sigma^{**} r^{\frac{\mu}{\alpha}} - \sigma_s \left( \frac{\alpha}{\mu} + 1 \right) r^{\frac{\mu}{\alpha}}. \quad (21)$$

Подставим (21) в (20), окончательно получим

$$\sigma_\rho = \sigma_s \left( \frac{\alpha}{\mu} + 1 \right) \left[ 1 - \left( \frac{\rho}{r} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} \right] + \sigma^{**} \left( \frac{\rho}{r} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}}. \quad (22)$$

Из условия пластичности и последнего выражения (22) получим искомую величину  $\sigma_\theta$  в зоне 4 (зоне опережения).

$$\sigma_\theta = \sigma_s \left\{ \left( \frac{\alpha}{\mu} + 1 \right) \left[ 1 - \left( \frac{\rho}{r} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} \right] - 1 \right\} + \sigma^{**} \left( \frac{\rho}{r} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}}, \quad (23)$$

где  $\sigma_s = \text{const}$  (как средняя подинтегральная величина)  $\sigma^{**}$  - величина подпора со стороны выхода заготовки из очага деформации.

Таким образом, контактные давления в очаге деформации в зонах 1, 2, 3, и 4 определены. Определим теперь внутренние границы указанных зон.

Из условия, что на границе зон отставания 1 (рис. 1) и прилипания-торможения 2, где  $\rho = \rho_{\text{от}}$ , условия контактного трения одинаковые, имеем  $|\sigma_\theta| \mu = \frac{\sigma_s}{2}$ . Поставив соответствующее значение  $\sigma_\theta$ , получим

$$\left| \sigma_s \left\{ \left( 1 - \frac{\alpha}{\mu} \right) \left[ 1 - \left( \frac{R}{\rho_{\text{от}}} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} \right] - 1 \right\} + \sigma^{**} \left( \frac{R}{\rho_{\text{от}}} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} \right| \mu = \frac{\sigma_s}{2} \quad (24)$$

или с учетом отрицательного значения  $\sigma_\theta$ :

$$\left\{ \left( 1 - \frac{\alpha}{\mu} \right) \left[ 1 - \left( \frac{R}{\rho_{\text{от}}} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} \right] - 1 \right\} + \frac{\sigma^{**}}{\sigma_s} \left( \frac{R}{\rho_{\text{от}}} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} = \frac{-1}{2\mu}. \quad (25)$$

После преобразований выражения (25) окончательно будем иметь следующее соотношение радиусов зоны 1:

$$\left( \frac{R}{\rho_{\text{от}}} \right) = \left( \frac{1 - 2\alpha}{2\mu} \frac{\sigma_s}{1 - \frac{\alpha}{\mu} - \frac{\sigma^{**}}{\sigma_s}} \right)^{\frac{\alpha}{\mu}}. \quad (26)$$

Например:

1) если  $\sigma^* / \sigma_s = 0$ ;  $\alpha = 0,1$ ;  $\mu = 0,3$  получим

$$\left( \frac{R}{\rho_{от}} \right) = \left( \frac{1-2\alpha}{2\mu} \right)^{\frac{\alpha}{\mu}} = \left( \frac{1-2 \cdot 0,1}{2 \cdot 0,3} \right)^{\frac{0,1}{0,3}} = \left( \frac{1-0,2}{0,6} \right)^{0,33} = 1,25.$$

2) если  $\sigma^* / \sigma_s = -0,2$ ;  $\alpha = 0,1$ ;  $\mu = 0,3$  получим

$$\left( \frac{R}{\rho_{от}} \right) = \left( \frac{1-0,2}{0,6} \right)^{0,33} = 1,15.$$

Из приведенного примера видно влияние напряжения  $\sigma_p = \sigma^* \neq 0$ , действующего на границе входа материала заготовки в очаг деформации, на размер зоны 1. И это влияние существенное.

Определим размер зоны 4 (рис. 1) из тех же условий. Имеем:

$$\left| \sigma_s \left\{ \left( \frac{\alpha}{\mu} + 1 \right) \left[ 1 - \left( \frac{\rho_{оп}}{r} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} \right] - 1 \right\} + \sigma^{**} \left( \frac{\rho_{оп}}{r} \right)^{\frac{\mu}{\alpha}} \right| \mu = \frac{\sigma_s}{2}. \quad (27)$$

Окончательно получим

$$\left( \frac{\rho_{оп}}{r} \right) = \left[ \frac{1+2\alpha}{2\mu} \right]^{\frac{\alpha}{\mu}} \cdot \left[ \left( \frac{\alpha}{\mu} + 1 \right) - \frac{\sigma^{**}}{\sigma_s} \right]. \quad (28)$$

Влияние величины подпора  $\sigma^{**}$  на размеры зоны опережения 4 (рис. 1) определим на примере:

1) если  $\sigma^{**} / \sigma_s = 0$ ,  $\alpha = 0,1$ ;  $\mu = 0,3$  из (28) получим  $\left( \frac{\rho_{оп}}{r} \right) = 1,145$ ;

2) если  $\sigma^{**} / \sigma_s = -0,2$ ,  $\alpha = 0,1$ ;  $\mu = 0,3$ , то  $\left( \frac{\rho_{оп}}{r} \right) = 1,09$ .

Из приведенных расчетов видно, что влияние подпора со стороны выхода заготовки меньше, чем со стороны входа, примерно в 2,0 раза.

Радиус нейтрального сечения  $\rho_0$  определим из условия равенства на этом радиусе величины контактного давления одному и тому же значению, определяемому в зонах 2 и 3 соответственно по выражениям (21) и (23).

Получим

$$\begin{aligned}
 & -\frac{\sigma_s}{2\alpha} \ln\left(\frac{\rho_{от}}{\rho_0}\right) + \sigma_s \left(1 - \frac{\alpha}{\mu}\right) \left[1 - \left(\frac{R}{\rho_{от}}\right)^{\frac{\mu}{\alpha}}\right] - \sigma_s + \sigma^* \left(\frac{R}{\rho_{от}}\right) = \\
 & = -\frac{\sigma_s}{2\alpha} \ln\left(\frac{\rho_0}{\rho_{он}}\right) + \sigma_s \left(\frac{\alpha}{\mu} + 1\right) \left[1 - \left(\frac{\rho_{он}}{r}\right)^{\frac{\mu}{\alpha}}\right] - \sigma_s + \sigma^{**} \left(\frac{\rho_{он}}{r}\right). \quad (29)
 \end{aligned}$$

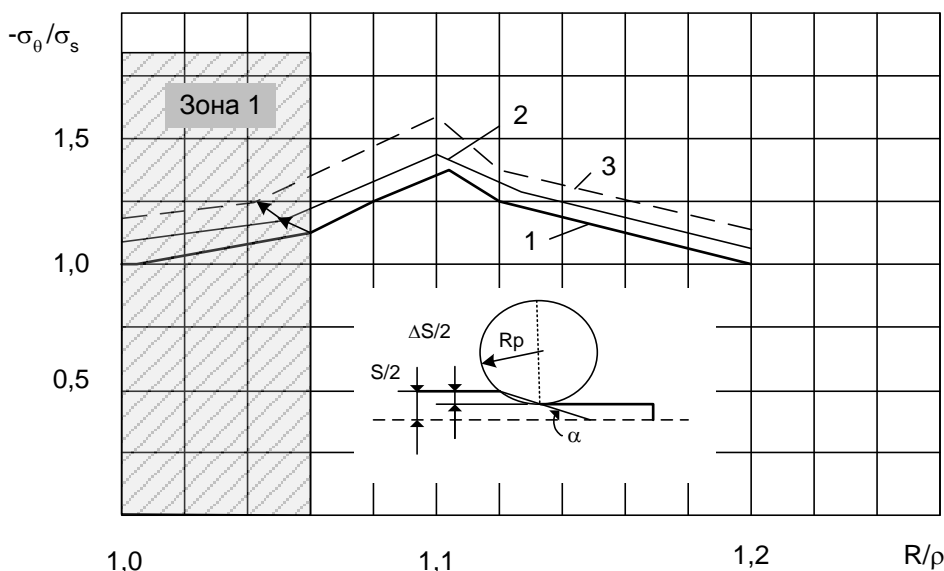
После преобразований уравнения (29) будет окончательно иметь следующий вид:

$$\rho_0 = \sqrt{\frac{\rho_{от} \rho_{он}}{\exp(A)}}, \quad (30)$$

где  $A = 2\alpha \frac{\sigma^*}{\sigma_s} \left(\frac{R}{\rho_{от}}\right)^{\frac{\mu}{\alpha}} - 2\alpha \frac{\sigma^{**}}{\sigma_s} \left(\frac{\rho_{он}}{r}\right)^{\frac{\mu}{\alpha}}$ .

Если подпор отсутствует  $\sigma^* = \sigma^{**} = 0$ , то из выражения (30) следует, что нейтральный радиус равен  $\rho_0 = \sqrt{\rho_{от} \rho_{он}}$ , что совпадает с известными решениями [43 и др.].

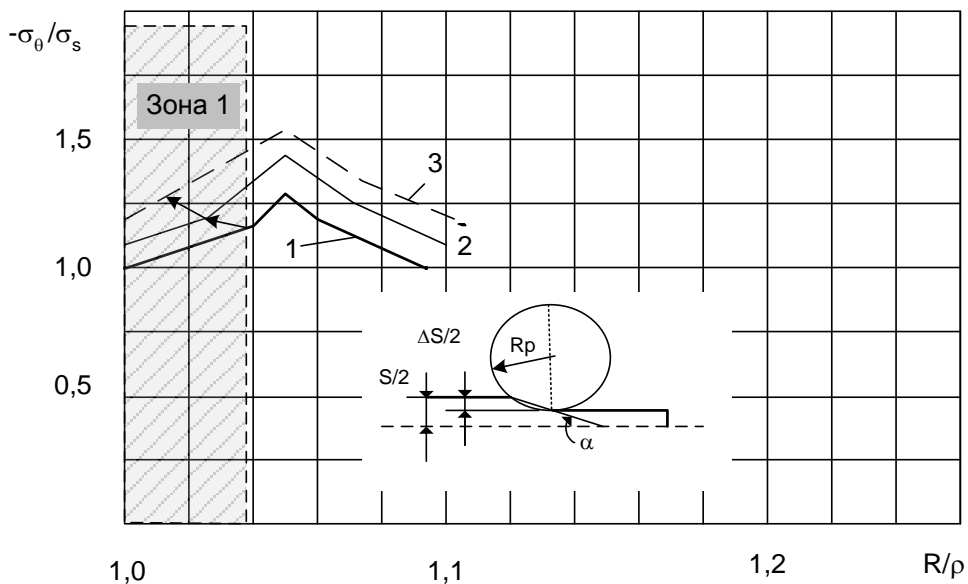
Расчеты контактных давлений в зависимости от величины напряжений подпора приведены на рис. 6 и 9. Программа расчета и результаты расчета приведены в Приложении 1.



**Рис. 6.** Распределение контактных давлений в зависимости от режимов обработки

( $\alpha/\mu = 0,225$ ;  $S/2 = 1,0$  мм,  $\Delta S/2 = 0,2$  мм,  $R_p = 12$  мм):

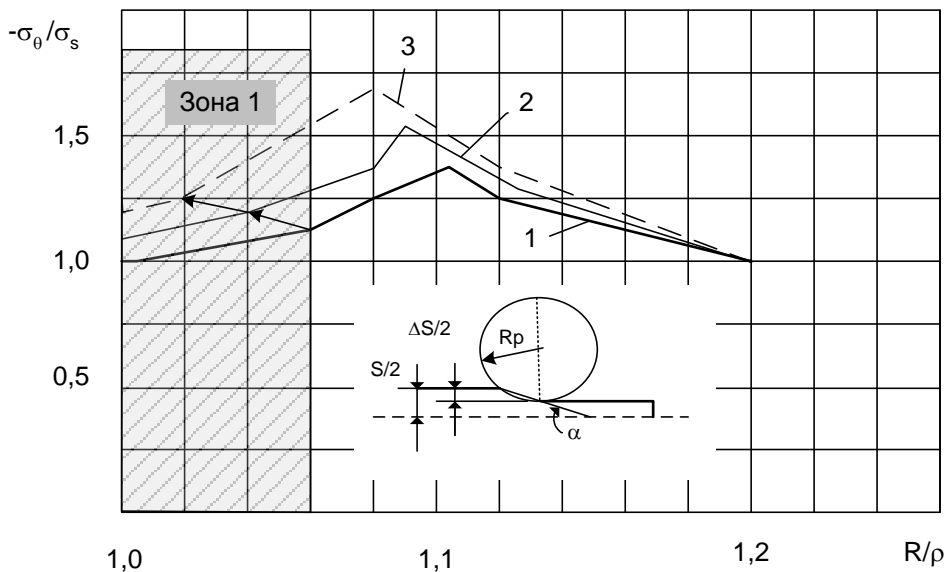
1 -  $\sigma^* = \sigma^{**} = 0$ ; 2 -  $\sigma^* / \sigma_s = \sigma^{**} / \sigma_s = -0,1$ ; 3 -  $\sigma^* / \sigma_s = \sigma^{**} / \sigma_s = -0,2$



**Рис. 7.** Распределение контактных давлений в зависимости от режимов обработки

( $\alpha/\mu = 0,1625$ ;  $S/2 = 1,0$  мм,  $\Delta S/2 = 0,1$  мм,  $R\rho = 12$  мм):

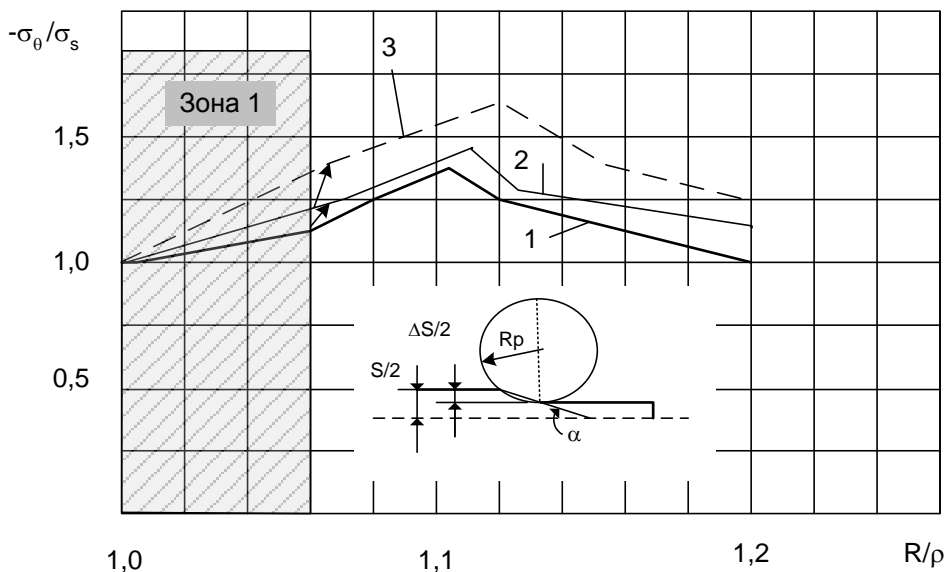
1 -  $\sigma^* = \sigma^{**} = 0$ ; 2 -  $\sigma^* / \sigma_s = \sigma^{**} / \sigma_s = -0,1$ ; 3 -  $\sigma^* / \sigma_s = \sigma^{**} / \sigma_s = -0,2$



**Рис. 8.** Распределение контактных давлений в зависимости от режимов обработки

( $\alpha/\mu = 0,225$ ;  $S/2 = 1,0$  мм,  $\Delta S/2 = 0,2$  мм,  $R\rho = 12$  мм):

1 -  $\sigma^* = \sigma^{**} = 0$ ; 2 -  $\sigma^* / \sigma_s = -0,1$ ; 3 -  $\sigma^* / \sigma_s = -0,2$



**Рис. 9.** Распределение контактных давлений в зависимости от режимов обработки

( $\alpha/\mu = 0,225$ ;  $S/2 = 1,0$  мм,  $\Delta S/2 = 0,2$  мм,  $R_p = 12$  мм):

1 -  $\sigma^* = \sigma^{**} = 0$ ; 2 -  $\sigma^{**}/\sigma_s = -0,1$ ; 3 -  $\sigma^{**}/\sigma_s = -0,2$

### Вывод

Из рис. 6 –9 видно, что величина контактного давления увеличивается до 30-50% к нейтральному радиусу в зависимости от геометрических параметров очага деформации и условий контактного трения. Кроме того, сжимающие напряжения подпора  $\sigma^*$  и  $\sigma^{**}$  также увеличивают контактные давления в очаге деформации.

Контактное давление в геометрическом очаге деформации величина непостоянная и больше, чем напряжение текучести материала (в среднем на 30-40%), что необходимо учитывать в расчетах технологических параметров.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Глазков В.И. Исследование процесса раздачи тонкостенных трубчатых заготовок с осевым подпором. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. М., МАТИ, 1968, 24 с.
2. Чумадин А.С., Хейн Вин Зо, Бондаренко М.В. Раскатка концевых участков труб. / Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Новые материалы и технологии». Москва, 21-23 ноября 2006 г. В 3 томах. Т2 –М.: ИЦ МАТИ, 2006г, с.46-47.
3. Сторожев М.В., Попов А.Е. Теория обработки металлов давлением. –М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
4. Феодосьев В.И Соппротивление материалов. М.: Изд-во «Наука», 1972, 544 стр.
5. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. –Л.: Машиностроение, 1971. -782 с.
6. Гредитор М.А. Давильные работы и ротационное выдавливание. – М.: Машиностроение, 1971. – 239 с.
7. Хейн Вин Зо Экспериментальные исследования процесса раскатки труб // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. № 12, 2007, с. 11-14.
8. Чумадин А.С., Бурштейн Н.М., Архипов В.Н. Способ изменения диаметра концевого участка трубы. Патент РФ №2104112, 1998.
9. Абибов А.Л., Бирюков Н.М., Бойцов В.В. и др. Технология самолетостроения. – М.: Машиностроение, 1970. – 499 с.
10. Листовая штамповка. Расчет технологических параметров. Справочник / В.И. Ершов, О.В. Попов, А.С. Чумадин и др. – М.: Изд-во МАИ, 1999. -516 с.
11. Хейн Вин Зо Экспериментальные исследования процесса раскатки труб // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. № 12, 2007, с. 11-14.

**Рецензент:** Симаранов. С. Ю., Генеральный директор ЗАО «Техноконсалт», доктор технических наук, профессор.

## REFERENCES

1. Glazkov VI Investigation of the process of distribution of thin-walled tubular blanks with axial inlet pressure. Abstract of the thesis for the degree of Ph.D. M., MATI, 1968, 24 p.
2. Chumadin AS, Hein Win Zaw, Bondarenko MV Unrolling the end portions of the tubes. / Proceedings of the All-Russian Conference "New materials and technologies." Moscow, November 21-23, 2006 3 volumes. T2-M.: IC MATI, 2006, pp.46-47.
3. Storoyev MV Popov, AE Theory of metal forming. -M.: Mechanical Engineering, 1977. - 423.4. Feodosyev VI resistance materials. Moscow: "Nauka", 1972, 544 pp.
5. Romanovsky V.P., Reference on cold stamping. – L. : Mechanical engineering, 1971. -782 pages.
6. Greditor M. A. Pressing works and rotational expression. – M: Mechanical engineering, 1971. – 239 pages.
7. Hein Win Zaw., The studies of process of expansion of pipes//Forge and forming production. Processing of materials by pressure. No. 12, 2007, page 11-14.
8. 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.
9. Abibov A.L., unsociable persons of H.M., Fighters of B.B., etc. Technology of aircraft construction. – M: Mechanical engineering, 1970. – 499 pages.
10. Sheet stamping. Calculation of technological parameters. Directory / Century. I.Ershov, O.V.Popov, A.S.Chumadin, etc. – M: MAI publishing house, 1999. -516 pages.
11. Hein Win Zaw Experimental studies of the process rolling tubes / / Forging and stamping production. Materials processing pressure. Number 12, 2007, p. 11-14.