

УДК 621.983; 539.374

Грязев М. В.
Ларин С. Н.
Пасынков А. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЗАГОТОВКИ ПРИ РАЗДАЧЕ ТРУБЫ КОНИЧЕСКИМ ПУАНСОНОМ

В точном машиностроении, автомобиле-, судо-, самолето-, ракетостроении, тракторном и сельскохозяйственном машиностроении и в других отраслях получили широкое распространение различного рода трубопроводные системы. К важнейшим элементам таких конструкций относятся концентрические осесимметричные переходники, позволяющие осуществлять стыковку труб разного диаметра. К ним предъявляются повышенные требования по механическим характеристикам, размерной точности и качеству поверхности. Значительной экономии металла в штамповочном производстве, при их изготовлении, можно добиться за счет применения трубной заготовки вместо листовой заготовки. При этом коэффициент использования металла повышается в несколько раз и, соответственно, уменьшается обработка резанием [1–3].

Цель работы – теоретические исследования процесса раздачи трубной заготовки в целях установления влияния механических свойств исходного материала, геометрических параметров инструмента на напряженное и деформированное состояние.

При рассмотрении операции раздачи трубной заготовки коническими пуансонами с углом конусности α (рис. 1), коэффициент раздачи определяется соотношением $K_p = r_k / r_0$.

В основе анализа используем метод расчета энергетических параметров операции, базирующийся на решении приближенного дифференциального уравнения равновесия совместно с условием текучести с учетом сопряжений на границах участков, а также поворотом направления течения материала на угол α [1].

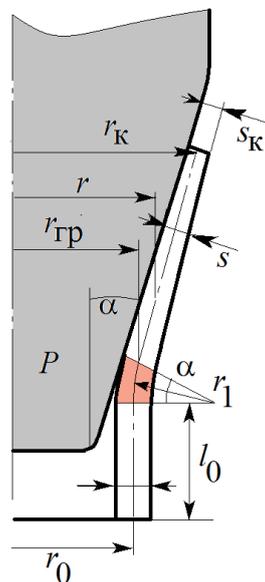


Рис. 1. Напряженно-деформированное состояние трубной заготовки при раздаче

Допустим, что операция раздачи трубной заготовки реализуется в условиях плоского напряженного состояния, на контактных границах заготовки и инструмента реализуется закон трения Кулона. Принимаем, что материал заготовки несжимаем, изотропно упрочняющийся, обладает цилиндрической анизотропией механических свойств, для которого применимо условие текучести Мизеса-Хилла [2] и ассоциированный закон пластического течения, связывающий компоненты тензора напряжений с компонентами приращения тензора деформаций, посредством коэффициента пропорциональности

$$2f(\sigma_{ij}) \equiv F\sigma_\theta^2 + G\sigma_\rho^2 + H(\sigma_\rho - \sigma_\theta)^2 = 1 \quad (1)$$

$$d\varepsilon_\rho = d\lambda[H(\sigma_\rho - \sigma_\theta) + G\sigma_\rho]; \quad d\gamma_{\theta z} = 0;$$

$$d\varepsilon_\theta = d\lambda[F\sigma_\theta + H(\sigma_\theta - \sigma_\rho)]; \quad d\gamma_{z\rho} = 0; \quad (2)$$

$$d\varepsilon_z = -d\lambda[G\sigma_\rho + F\sigma_\theta]; \quad d\gamma_{\rho\theta} = 0,$$

где F, G, H – параметры анизотропии, характеризующие текущее состояние материала заготовки; σ_{ij} – компоненты тензора напряжений вдоль главных осей анизотропии; $d\varepsilon_\rho, d\varepsilon_\theta, d\varepsilon_z, d\gamma_{\theta z}, d\gamma_{\rho\theta}, d\gamma_{z\rho}$ – компоненты приращения тензора деформаций; $d\lambda$ – коэффициент пропорциональности; x, y, z – главные оси анизотропии.

С учетом связи параметров анизотропии F, G, H со значениями коэффициентов анизотропии R_ρ и R_θ вида [2]

$$\frac{H}{F} = R_{90} = R_\theta; \quad \frac{G}{F} = \frac{R_{90}}{R_0} = \frac{R_\theta}{R_\rho}, \quad F = \frac{1}{\sigma_{s\theta}^2(1+R_\theta)}. \quad (3)$$

выражение для условия текучести материала, при наличии цилиндрической анизотропии механических свойств, в главных напряжениях приобретет вид:

$$\sigma_\rho^2 + \frac{R_\rho(1+R_\theta)}{R_\theta(1+R_\rho)}\sigma_\theta^2 - 2\frac{R_\rho}{(1+R_\rho)}\sigma_\rho\sigma_\theta = \frac{R_\rho(1+R_\theta)}{R_\theta(1+R_\rho)}\sigma_{s\theta}^2, \quad (4)$$

где $\sigma_{s\theta}$ – напряжения сопротивления материала пластической деформации вдоль оси θ , которая зависима от интенсивности напряжений σ_i и определяется по известному выражению [3]

$$\sigma_{s\theta} = \sigma_i \sqrt{\frac{2(R_\rho + R_\rho R_\theta + R_\theta)}{3R_\rho(R_\theta + 1)}}. \quad (5)$$

С учетом соотношения (5), перепишем условие текучести (4) в следующем виде

$$\sigma_\rho^2 + \sigma_\theta^2 \frac{R_\rho(1+R_\theta)}{R_\theta(1+R_\rho)} - 2\frac{R_\rho R_\theta}{R_\theta(1+R_\rho)}\sigma_\rho\sigma_\theta = \sigma_i^2 \left[\frac{2(R_\rho + R_\rho R_\theta + R_\theta)}{3R_\theta(1+R_\rho)} \right]. \quad (6)$$

Используя соотношения (2) и определив отношение $d\varepsilon_\rho/d\varepsilon_\theta$, приняв во внимание выражения (3), получаем

$$d\varepsilon_\rho = d\varepsilon_\theta \frac{R_\theta[\sigma_\rho + R_\rho(\sigma_\rho - \sigma_\theta)]}{R_\rho[\sigma_\theta + R_\theta(\sigma_\theta - \sigma_\rho)]}, \quad (7)$$

где $d\varepsilon_\theta = d\rho/\rho$; ρ – полярная координата рассматриваемого бесконечно малого элемента на конической поверхности.

Используем соотношение, которое позволяет определить приращение интенсивности деформации $d\varepsilon_i$ для рассматриваемой операции формоизменения [4]:

$$d\varepsilon_i = \sqrt{\frac{2}{3}(F+G+H)} \left[F \left(\frac{Gd\varepsilon_\theta - Hd\varepsilon_z}{FG+GH+HF} \right)^2 + G \left(\frac{Hd\varepsilon_z - Fd\varepsilon_\rho}{FG+GH+HF} \right)^2 + H \left(\frac{Fd\varepsilon_\rho - Gd\varepsilon_\theta}{FG+GH+HF} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (8)$$

с учетом условия несжимаемости материала $d\varepsilon_\rho + d\varepsilon_\theta + d\varepsilon_z = 0$, а также выражений (3), получим

$$d\varepsilon_i = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{2\beta R_\rho R_\theta + R_\theta(R_\rho + 1)}{R_\rho R_\theta(1 + R_\rho + R_\theta)}} d\varepsilon_\theta + \sqrt{\frac{2}{3} \frac{(R_\rho + R_\theta + R_\rho R_\theta) \left[\frac{R_\theta[\sigma_\rho + R_\rho(\sigma_\rho - \sigma_\theta)]}{R_\rho[\sigma_\theta + R_\theta(\sigma_\theta - \sigma_\rho)]} \right]^2 R_\rho(R_\theta + 1)}{R_\rho R_\theta(1 + R_\rho + R_\theta)}} d\varepsilon_\theta. \quad (9)$$

Принимаем, что упрочнение материала заготовки определяется выражением:

$$\sigma_i = \sigma_{i0} + A \left(\int_{\rho_0}^{\rho} d\varepsilon_i \right)^n, \quad (10)$$

где σ_{i0} , A , n – константы материала, определяемые экспериментальными методами.

Определим деформированное состояние материала заготовки в очаге пластической деформации. Используя соотношения (2) и определив отношение $d\varepsilon_z/d\varepsilon_\theta$ с учетом выражений (3), получаем

$$\frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\theta} = \frac{R_\theta \sigma_\rho + R_\rho \sigma_\theta}{R_\rho [R_\theta \sigma_\rho - (1 + R_\theta) \sigma_\theta]}. \quad (11)$$

Имея в виду, что $d\varepsilon_z = ds/s$, и используя условие несжимаемости $d\varepsilon_\theta + d\varepsilon_\rho + d\varepsilon_z = 0$ и соотношения (3), получаем

$$\frac{ds}{s} = \frac{R_\theta \sigma_\rho + R_\rho \sigma_\theta}{R_\rho [R_\theta \sigma_\rho - (1 + R_\theta) \sigma_\theta]} \frac{d\rho}{\rho}. \quad (12)$$

Определим меридиональные σ_ρ и окружные σ_θ напряжения, решив систему из выражений для приближенного уравнения равновесия [4]

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho \left(1 + \frac{\rho}{d\rho} \frac{ds}{s} \right) - \sigma_\theta - \frac{\mu \sigma_\theta}{\operatorname{tg} \alpha} = 0 \quad (13)$$

и условия пластичности (4) при наложении граничных условий

$$\text{при } \rho = \rho_k = r_k / \sin \alpha, \quad \sigma_\rho \Big|_{\rho = \rho_k} = 0, \quad (14)$$

где μ – коэффициент трения Кулона при взаимодействии поверхности контакта инструмента и цилиндрической заготовки.

Граничные условия (14) дают возможность определить величины окружных σ_θ напряжений из условия текучести (6) из следующего выражения

$$\sigma_\theta = \sigma_i \sqrt{\frac{2(R_\rho + R_\rho R_\theta + R_\theta)}{3R_\rho(1 + R_\theta)}}. \quad (15)$$

Используя выражения (12), можно преобразовать уравнение равновесия (13) к виду:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho (1 + f) - \sigma_\theta - \frac{\mu \sigma_\theta}{\operatorname{tg} \alpha} = 0. \quad (16)$$

Выполним интегрирование этого уравнения численным методом конечных разностей, перемещаясь от краевой части цилиндрической заготовки, где определены все входящие в уравнение величины

$$\sigma_{\rho_n} = \sigma_{\rho_{n-1}} + \frac{\rho_n - \rho_{n-1}}{\rho_n} \left[\sigma_{\theta_{n-1}} \left(1 + \frac{\mu}{\operatorname{tg} \alpha} \right) - \sigma_{\rho_{n-1}} (1 + f_{n-1}) \right]. \quad (17)$$

Определив напряжения σ_{ρ_n} , найдем σ_{θ_n} , воспользовавшись условием текучести (6)

$$\sigma_{\theta} = \frac{R_{\theta}}{1+R_{\theta}}\sigma_{\rho} + \sigma_i \sqrt{\left(-\frac{R_{\theta}}{1+R_{\theta}}\right)^2 \left(\frac{\sigma_{\rho}}{\sigma_i}\right)^2 - \frac{1}{R_{\rho}(1+R_{\theta})} \left[R_{\theta}(1+R_{\rho}) \left(\frac{\sigma_{\rho}}{\sigma_i}\right)^2 - \frac{2(R_{\rho} + R_{\rho}R_{\theta} + R_{\theta})}{3} \right]}.$$

Сжимающие меридиональные напряжения σ_{ρ} имеют наибольшие по абсолютной величине значения при $\rho = \rho_0 = r_0 / \sin \alpha$. Эти величины напряжений можно определить как сумму напряжений, вытекающих из уравнения (17) и приращения напряжений $2\Delta\sigma_{\rho}$ от изгиба и спрямления [4] в следующем виде:

$$|\sigma_{\rho}|_{\max} = \sigma_{\rho}|_{\rho=\rho_{zp}} + 2\Delta\sigma_{\rho}|_{\rho=\rho_{zp}} = \sigma_{\rho}|_{\rho=\rho_{zp}} + 2\sigma_{\rho}|_{\rho=\rho_{zp}}(1 - \cos \alpha) = \sigma_{\rho}|_{\rho=\rho_{zp}}(3 - 2\cos \alpha), \quad (18)$$

где $(3 - 2\cos \alpha)$ – коэффициент, учитывающий изгиб и спрямление осесимметричной заготовки в момент перехода от конического участка к недеформированному цилиндрическому; $\rho_{zp} = r_{zp} / \sin \alpha$.

В тех случаях, когда при раздаче формируется цилиндрический элемент нового диаметра (рис. 2), определив меридиональные напряжения σ_{ρ} на коническом участке, следует учесть влияние изгиба и спрямления между этими участками. Допускаем, что изгиб и спрямление элементов на границе участка свободного изгиба увеличивает меридиональные напряжения σ_{ρ} на величину $2\Delta\sigma_{\rho}$. Значение величины $\Delta\sigma_{\rho}$ находим по выражению [4]:

$$\Delta\sigma_{\rho} = \frac{\sigma_s \theta^s}{4r_2},$$

где r_2 – радиус кривизны; определяемый по следующей зависимости:

$$r_2 = \sqrt{r_k s} / (\sqrt{2} \sin \alpha).$$

Значение меридионального напряжения σ_{ρ} для рассматриваемого условия формоизменения определяется формулой:

$$\sigma_{\rho} = 2\Delta\sigma_{\rho}|_{\rho=r_k} = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\sigma_s \theta^s \sin \alpha}{\sqrt{r_k s}}. \quad (19)$$

Меридиональные σ_{ρ} и окружные σ_{θ} напряжения определяются путем совместного решения приближенного уравнения равновесия (13) и условия пластичности (6) при граничных условиях

$$\text{при } \rho = \rho_k, \quad \sigma_{\rho}|_{\rho=\rho_k} = 2\Delta\sigma_{\rho}|_{\rho=\rho_k} = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\sigma_s \theta^s \sin \alpha}{\sqrt{r_k s}}, \quad (20)$$

где $\sigma_s \theta^s$ определяется из выражения (5) при $\rho = \rho_k$.

На рис. 3 приведены графические зависимости изменения относительных величин меридионального $|\bar{\sigma}_{\rho}| = |\sigma_{\rho}| / \sigma_{0,2\theta}$ и окружного $\bar{\sigma}_{\theta} = \sigma_{\theta} / \sigma_{0,2\theta}$ напряжений на коническом участке заготовки от относительного радиуса $\bar{\rho} = \rho / \rho_0$ (при $r_0 = 50$ мм; $s_0 = 4$ мм; $\mu = 0,05$). Расчеты выполнены для трубной заготовки из стали 08кп и алюминиевого сплава АМг6 со следующими механическими характеристиками и геометрическими размерами трубной заготовки: сталь 08кп – $\sigma_{i0} = 377,15$ МПа; $A = 488,9$ МПа; $n = 0,48$; $R_{\rho} = 0,817$, $R_{\theta} = 0,783$; алюминиевый сплав АМг6 – $\sigma_{i0} = 194,19$ МПа; $A = 275,11$ МПа; $n = 0,256$; $R_{\rho} = 0,67$; $R_{\theta} = 0,54$ [3–4].

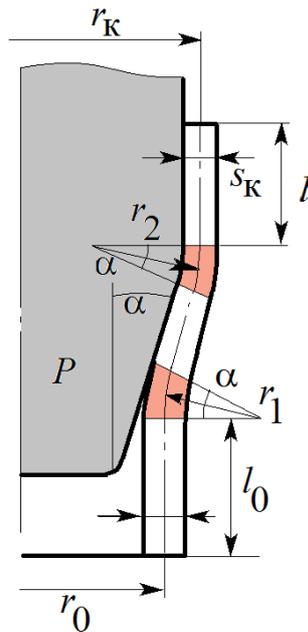


Рис. 2. Схема раздачи коническим пуансоном с образованием цилиндрической части

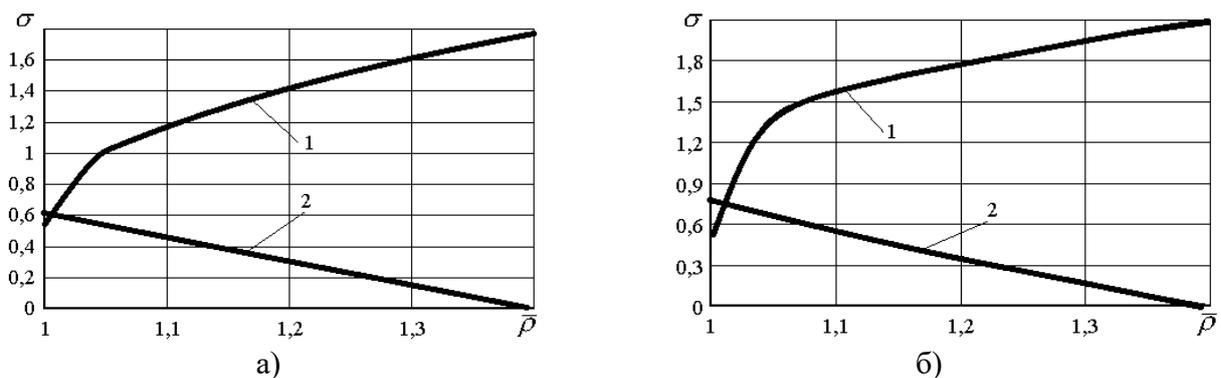


Рис. 3. Графические зависимости изменения относительных величин напряжений $|\bar{\sigma}_\rho|$ и $\bar{\sigma}_\theta$ от $\bar{\rho}$ ($K_p = 1,4$; $\alpha = 20^\circ$): а – сталь 08кп; б – алюминиевый сплав АМг6; 1 – $\bar{\sigma}_\theta$; 2 – $|\bar{\sigma}_\rho|$

Анализ графических зависимостей показывает, что с увеличением относительного радиуса $\bar{\rho}$ относительное окружное напряжение $\bar{\sigma}_\theta$ увеличивается. Меридиональное напряжение $|\bar{\sigma}_\rho|$ уменьшается от наибольшего значения при $\bar{\rho}=1$ до нуля на кромке заготовки.

На рис. 4 приведены графические зависимости изменения относительных величин меридионального $|\bar{\sigma}_\rho| = |\sigma_\rho|/\sigma_{0,2\theta}$ и окружного $\bar{\sigma}_\theta = \sigma_\theta/\sigma_{0,2\theta}$ напряжений на коническом участке заготовки от относительного радиуса $\bar{\rho} = \rho/\rho_0$ (при $r_0 = 50$ мм; $s_0 = 4$ мм; $\mu = 0,05$). Расчеты выполнены для трубных заготовок со следующими механическими характеристиками: $\sigma_{i0} = 377,15$ МПа; $A = 488,9$ МПа; $n = 0,48$ [1–4].

Анализ графических зависимостей показывает, что с увеличением относительного радиуса $\bar{\rho}$ относительное окружное напряжение $\bar{\sigma}_\theta$ увеличивается. Меридиональное напряжение $|\bar{\sigma}_\rho|$ уменьшается от наибольшего значения при $\bar{\rho}=1$ до нуля на кромке заготовки. С увеличением коэффициента анизотропии R_θ с 0,2 до 2 при фиксированном значении R_ρ возрастает величина относительного радиального напряжения $|\bar{\sigma}_\rho|$ в 2 раза при $\bar{\rho}=1$.

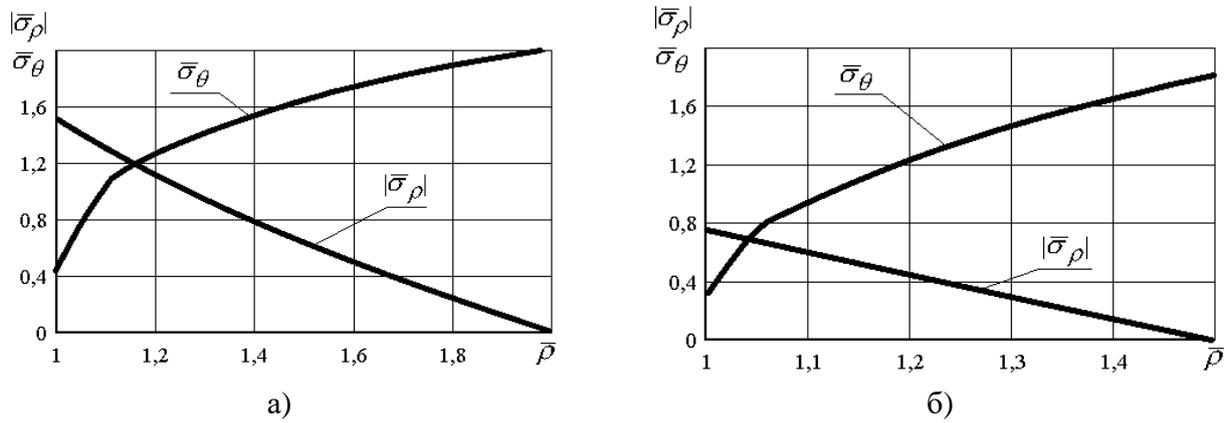


Рис. 4. Графические зависимости изменения относительных величин напряжений $|\bar{\sigma}_\rho|$ и $\bar{\sigma}_\theta$ от $\bar{\rho}$ ($\alpha = 20^\circ$; $\mu = 0,05$): а – $K_p = 1,5$; $R_p = 2$; $R_\theta = 0,2$; б – $K_p = 1,5$; $R_p = 2$; $R_\theta = 2$

На рис. 5 приведены графические зависимости изменения относительных величин меридионального $|\bar{\sigma}_\rho| = |\sigma_\rho|/\sigma_{0,2\theta}$ и окружного $\bar{\sigma}_\theta = \sigma_\theta/\sigma_{0,2\theta}$ напряжений на коническом участке заготовки от относительного радиуса $\bar{\rho} = \rho/\rho_0$ (при $r_0 = 50$ мм; $s_0 = 4$ мм; $\mu = 0,05$). Расчеты выполнены для трубных заготовок со следующими механическими характеристиками: $\sigma_{i0} = 377,2$ МПа; $A = 488,9$ МПа; $n = 0,48$ [1].

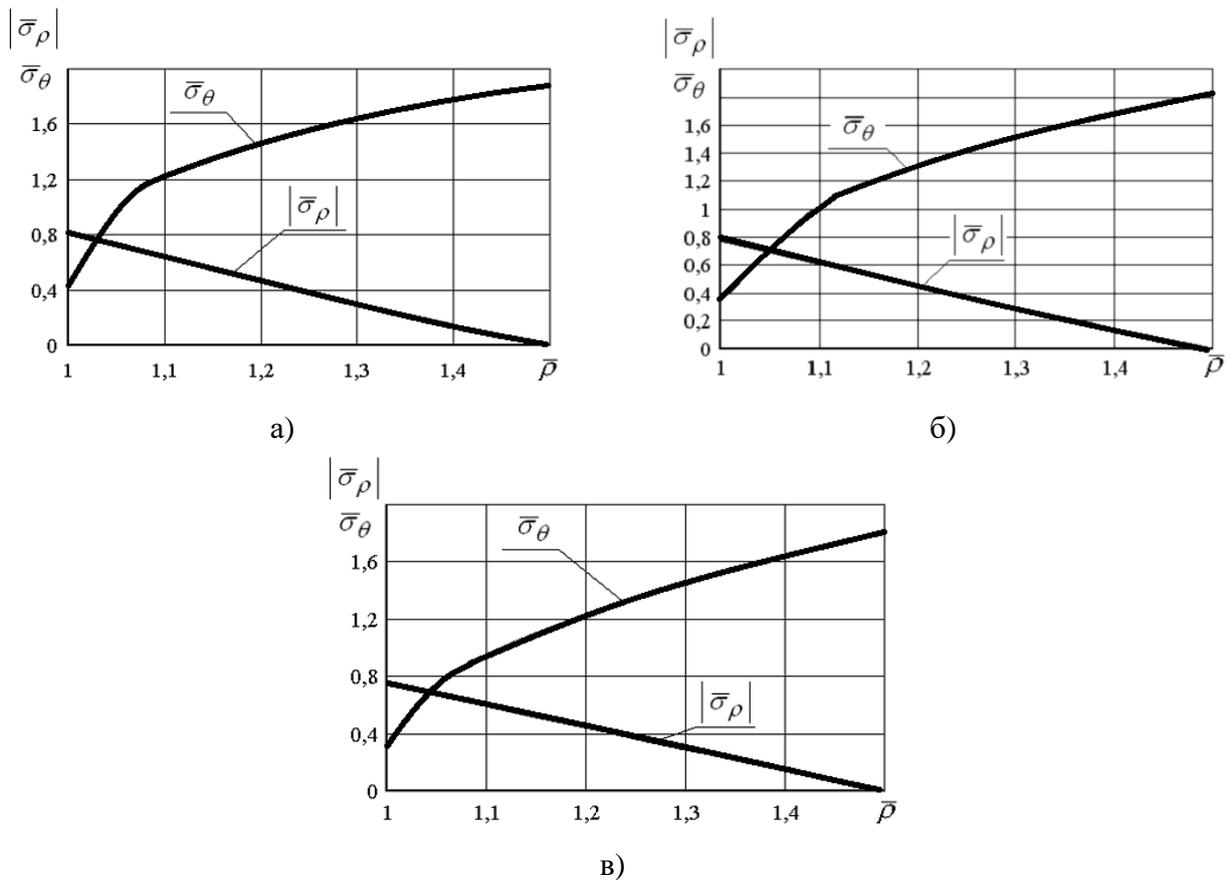


Рис. 5. Графические зависимости изменения относительных величин напряжений $|\bar{\sigma}_\rho|$ и $\bar{\sigma}_\theta$ от $\bar{\rho}$ ($\alpha = 20^\circ$; $\mu = 0,05$): а - $K_p = 1,5$; $R = 0,2$; б - $K_p = 1,5$; $R = 1$; в - $K_p = 1,5$; $R = 2$

Анализ графических зависимостей показывает, что с увеличением относительного радиуса $\bar{\rho}$ относительное окружное напряжение $\bar{\sigma}_\theta$ увеличивается. Меридиональное напряжение $|\bar{\sigma}_\rho|$ уменьшается от наибольшего значения при $\bar{\rho} = 1$ до нуля на кромке заготовки.

ВЫВОДЫ

Выполнены теоретические исследования процесса раздачи трубной заготовки в целях установления влияния механических свойств исходного материала, геометрических параметров инструмента на напряженное и деформированное состояния и силовые режимы. Установлено влияние геометрических параметров пуансона на напряженное состояние.

Работа выполнена в рамках грантов РФФИ № 16-48-710014 и гранта администрации Тульской области.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сторожев М.В. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.*
2. *Яковлев С.П. Обработка давлением анизотропных материалов / С.П. Яковлев, С.С. Яковлев, В.А. Андрейченко. – Кишинев: Квант, 1997. – 331 с.*
3. *Нечепуренко Ю.Г. Глубокая вытяжка цилиндрических изделий из анизотропного материала / Ю.Г. Нечепуренко, С.П. Яковлев, С.С. Яковлев. – Тула: ТулГУ, 2000. – 195 с.*
4. *Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки / Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.*

REFERENCES

1. *Storozhev M.V. Teorija obrabotki metallov davleniem / M.V. Storozhev, E.A. Popov. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 423 s.*
2. *Jakovlev S.P. Obrabotka davleniem anizotropnyh materialov / S.P. Jakovlev, S.S. Jakovlev, V.A. Andrejchenko. – Kishinev: Kvant, 1997. – 331 s.*
3. *Nechepurenko Ju.G. Glubokaja vytjazhka cilindricheskih izdelij iz anizotropnogo materiala / Ju.G. Nechepurenko, S.P. Jakovlev, S.S. Jakovlev. – Tula: TulGU, 2000. – 195 s.*
4. *Popov E.A. Osnovy teorii listovoj shtampovki / E.A. Popov. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 278 s.*

Грязев М. В. – д-р техн. наук, проф. ТулГУ
Ларин С. Н. – д-р техн. наук, проф. ТулГУ
Пасынков А. А. – канд. техн. наук, доц. ТулГУ

ТулГУ – Тульский государственный университет, г. Тула, РФ.

E-mail: mpf-tula@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 03.02.2017 г.