

УДК 621.774

Сосенушкин Е. Н.
Яновская Е. А.
Хачатрян Д. В.
Смолович И. Е.
Киндеров В. Ю.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РАЗДАЧИ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК ПРИ ШТАМПОВКЕ ИЗДЕЛИЙ С КОНИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

Наметившаяся в последние годы тенденция разукрупнения машиностроительных предприятий и развитие малого бизнеса приводит к тому, что основным типом производства становится производство продукции мелкими сериями под требования конкретного заказчика. Достаточно быстрая сменяемость номенклатуры объектов производства приводит к необходимости сокращения сроков их проектирования, подготовки производства и изготовления. Кроме того, в создавшихся условиях необходимо осваивать новые инновационные технологические процессы, отвечающие требованиям энерго- и ресурсосбережения, а также экологичности и безопасности [1]. И кузнечно-штамповочное производство не исключение.

Одной из развивающихся в новых условиях отраслей является арматуростроение, снабжающее конкурентоспособной продукцией ряд отраслей, при этом немалый вклад в повышение качества изделий и сокращение затрат на их производство вносят технологии пластического деформирования [2–6].

Увеличение потребности в штампованных деталях трубопроводной арматуры связано с наращиванием объемов добычи нефти и газа и необходимостью транспортировки этих продуктов по магистральным трубопроводам. Другой отраслью потребления деталей трубопроводной арматуры является строительная индустрия [7], достигшая в последнее время небывалого размаха. Большая номенклатура полых деталей, изготавливаемых из трубных заготовок, используется и в машиностроении. Примерами такой продукции являются приварные конические переходники; сопловые устройства; изделия с плоскими фланцами [4–6]. Распространенным технологическим процессом штамповки, обеспечивающим увеличение диаметра трубных заготовок, является раздача. В качестве формообразующего инструмента наиболее часто используются жесткие конические пуансоны с разными углами конусности. Для деталей с плоскими фланцами раздача на конус является предварительным переходом. Особенность операции раздачи – наличие окружных растягивающих напряжений, которые достигают максимальных значений на кромке деформируемой трубной заготовки. Поэтому возможности раздачи ограничиваются утонением стенки, а степень деформации не превышает 15–20 % за один переход [6, 7].

Целью работы является обеспечение стабильности протекания операции раздачи на основе теоретического анализа напряженно-деформированного состояния заготовки при пластическом формоизменении и обоснованного выбора основных технологических параметров.

Традиционно распределение напряжений в стенке деформируемой трубной заготовки при раздаче определяется совместным решением дифференциального уравнения равновесия и условия пластичности [8, 9]. При решении этой классической задачи в зависимости от учета технологических факторов, таких как трение, упрочнение, анизотропия, изменение толщины стенки, влияние изгиба и спрямления стенки результаты будут отличаться [10–12].

В общей постановке задачи уравнение равновесия при реализации раздачи криволинейным пуансоном имеет вид [8, 9]:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} - \sigma_\rho \left(1 + \frac{\rho dS}{Sd\rho} \right) - \sigma_\theta - \frac{\mu\rho}{\sin \alpha} \left(\frac{\sigma_\rho}{R_\rho} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} \right) = 0, \quad (1)$$

где σ_ρ , σ_θ , и R_ρ , R_θ – меридиональные и окружные напряжения и радиусы кривизны в меридиональном и окружном сечениях соответственно;

μ – коэффициент трения по Кулону;

α – угол конусности пуансона.

Поскольку интегрирование уравнения (1) вызывает математические трудности, учет изменения толщины стенки трубной заготовки проведем в дальнейших расчетах, кроме того, при раздате на конус $R_\rho = \infty$, $R_\theta = \frac{\rho}{\cos \alpha}$, уравнение равновесия примет известный вид [8–11]:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} - \sigma_\rho - \sigma_\theta (1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha) = 0. \quad (2)$$

Привлечем условие пластичности Треска – Сен-Венана для раздачи [9, 12]:

$$\sigma_\theta - \sigma_\rho = \beta \sigma_S. \quad (3)$$

Для учета упрочнения металла заготовки примем степенной закон деформационного упрочнения в виде [13]:

$$\sigma_S = \sigma_{S0} + B \varepsilon_i^m, \quad (4)$$

где σ_{S0} , B – постоянные материала;

m – показатель деформационного упрочнения;

$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_\rho - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_\rho)^2}$ – интенсивность деформаций.

С учетом условия несжимаемости $\varepsilon_\rho = -\varepsilon_\theta - \varepsilon_z$:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_\theta^2 + \varepsilon_z^2 + \varepsilon_\theta \varepsilon_z}.$$

Согласно [12] $\sigma_{S0} = \sigma_{0,2}$, и для интенсивности деформации с учетом коэффициента нормальной анизотропии R имеем выражение:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{R^2 + R + 1}}{R + 1} \varepsilon_\theta.$$

При допущении об однородности деформации по толщине трубной заготовки приращение деформаций выделенного элемента (рис. 1) при его смещении на малую величину $d\rho$ составят [12]:

$$d\varepsilon_z = \frac{ds}{s}; d\varepsilon_\theta = \frac{d\rho}{\rho}; d\varepsilon_z = \frac{d(\delta H)}{\delta H_0}, \quad (5)$$

где ds и $d(\delta H)$ – изменение толщины и длины выделенного кольцевого элемента.

После интегрирования получим конечные деформации:

$$\varepsilon_z = \ln \frac{s}{s_0}; \varepsilon_\theta = \ln \frac{\rho}{R_0}; \varepsilon_\rho = \ln \frac{d(\delta H)}{\delta H_0} = -\ln \frac{s}{s_0} - \ln \frac{\rho}{R_0}. \quad (6)$$

Тогда закон упрочнения примет вид:

$$\sigma_s = \sigma_{0,2} + B^* \left[\ln \left(\frac{\rho}{R_0} \right) \right]^m, \quad (7)$$

где $B^* = B \left(\frac{2 \sqrt{R^2 + R + 1}}{\sqrt{3} R + 1} \right)^m$.

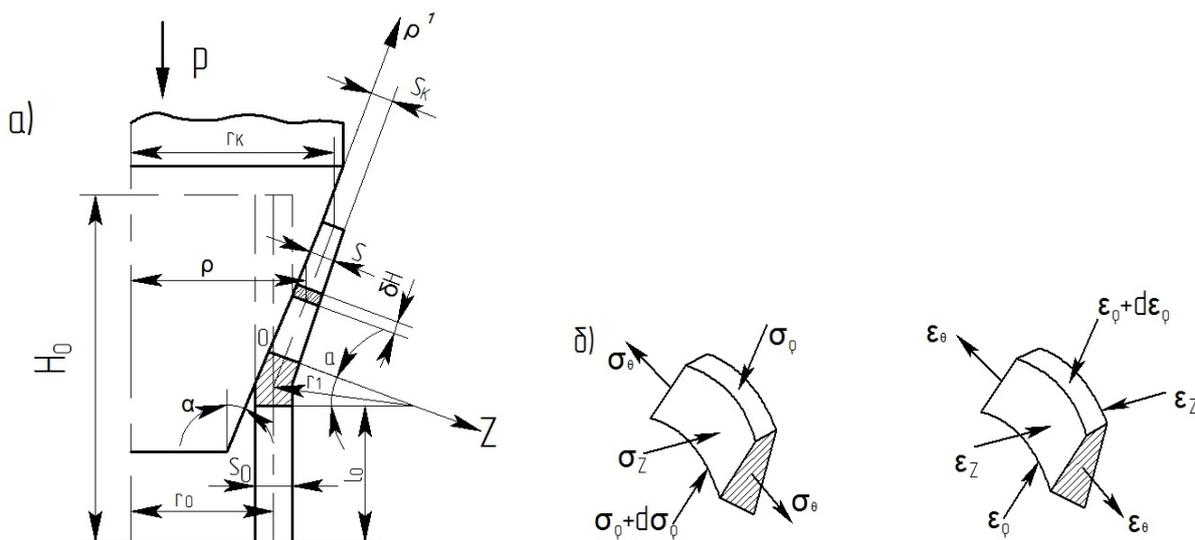


Рис. 1. Раздача трубной заготовки:

а – схема формоизменения коническим пуансоном; б – действующие напряжения и вызванные ими деформации в выделенном элементе

Подставляя известные величины в дифференциальное уравнение равновесия (2), получим:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} - \sigma_\rho (2 + \mu \operatorname{ctg} \alpha) - \beta \left[\sigma_{0,2} + B^* \left(\ln \frac{\rho}{R_0} \right)^m \right] (1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha) = 0. \quad (8)$$

Интегрирование проведем методом вариаций с заменой логарифмической функции $\left[\ln \left(\frac{\rho}{R_0} \right) \right]^m$ первым членом степенного ряда $\left(\frac{\rho}{R_0} - 1 \right)^m$, который, в свою очередь, разложим в сходящийся ряд [14]:

$$\sigma_\rho = - \frac{\beta \sigma_{0,2} (1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha)}{2 + \mu \operatorname{ctg} \alpha} - \frac{\beta B^* (1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha) (-1)^m}{2 + \mu \operatorname{ctg} \alpha} \times \\ \times \beta B^* (1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha) \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{m(m-1) \dots (m-n+1) (-1)^{m+n}}{n! R_0^n} \frac{\rho^n}{n - (2 + \mu \operatorname{ctg} \alpha)} \right) + C \rho^{(2 + \mu \operatorname{ctg} \alpha)}. \quad (9)$$

Для определения постоянной интегрирования C воспользуемся граничным условием $\sigma_\rho = 0$ при $\rho = r_k$ и после ее подстановки в (9) получим:

$$\sigma_{\rho} = \beta \left[\begin{array}{l} -\frac{(1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha)}{(2 + \mu \operatorname{ctg} \alpha)} \left(1 + \left(\frac{\rho}{r_k} \right)^{2 + \mu \operatorname{ctg} \alpha} \right) (\sigma_{0,2} + (-1)^m B^*) + \\ + B^* ((1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha)) \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\rho^n}{R_0^n} + \left(\frac{r_k}{R_0} \right)^n \left(\frac{\rho}{r_k} \right)^{(2 + \mu \operatorname{ctg} \alpha)} \right] \frac{m(m-1) \dots (m-n+1)}{n!} \frac{(-1)^{m+n}}{n - (2 + \mu \operatorname{ctg} \alpha)} \end{array} \right]. \quad (10)$$

Окружные напряжения σ_{θ} определим из условия пластичности (3):

$$\sigma_{\theta} = \sigma_{\rho} + \beta \sigma_s. \quad (11)$$

Контактное напряжение $\sigma_k = \sigma_z$ при $z = 0$ по уравнению Лапласа [8, 9, 12] имеет вид:

$$\sigma_k = -s \left(\frac{\sigma_{\rho}}{R_{\rho}} + \frac{\sigma_{\theta}}{R_{\theta}} \right). \quad (12)$$

При раздаче коническим пуансоном с учетом того, что на внешней свободной поверхности заготовки $\sigma_z = 0$, необходимо принять среднее контактное напряжение, равное его значению на срединной поверхности заготовки:

$$\sigma_z = -\frac{1}{2} \frac{s}{\rho} \sigma_{\theta} \cos \alpha. \quad (13)$$

Таким образом, напряжения в выделенном элементе конической формы определяются в соответствии с уравнениями (10), (11) и (13).

Поле деформаций найдем из совместного решения уравнений связи и условия несжимаемости.

Согласно теории пластического течения скорости деформаций определяются через известные напряжения при условии подобия диаграмм Мора для напряжений и скоростей деформаций и коаксиальности соответствующих девиаторов [9, 12]:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{\rho} &= \frac{3}{2} \frac{1}{R+2} \frac{\dot{\varepsilon}_i}{\sigma_i} [(R+1)\sigma_{\rho} - R\sigma_{\theta} - \sigma_z]; \\ \dot{\varepsilon}_{\theta} &= \frac{3}{2} \frac{1}{R+2} \frac{\dot{\varepsilon}_i}{\sigma_i} [(R+1)\sigma_{\theta} - R\sigma_{\rho} - \sigma_z]; \\ \dot{\varepsilon}_z &= \frac{3}{2} \frac{1}{R+2} \frac{\dot{\varepsilon}_i}{\sigma_i} [2\sigma_z - \sigma_{\rho} - \sigma_{\theta}], \end{aligned} \quad (14)$$

где $\dot{\varepsilon}_{\rho}, \dot{\varepsilon}_{\theta}, \dot{\varepsilon}_z$ – скорости деформации;

$\dot{\varepsilon}_i, \sigma_i$ – интенсивности скоростей деформаций и напряжений.

Проанализируем отношение скоростей деформаций из (14):

$$\frac{\dot{\varepsilon}_z}{\dot{\varepsilon}_\theta} = \frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\theta} = \frac{ds/s}{d\rho/\rho} = \frac{2\sigma_z - \sigma_\rho - \sigma_\theta}{(R+1)\sigma_\theta - R\sigma_\rho - \sigma_z}, \quad (15)$$

которое, при коэффициенте трансверсальной анизотропии $R = 1$, приводит к известному соотношению Леви – Мизеса [15]:

$$\frac{ds}{s} = \frac{\sigma_z - \sigma_{cp}}{\sigma_\theta - \sigma_{cp}} \times \frac{d\rho}{\rho}, \quad (16)$$

где $\sigma_{cp} = \frac{1}{3}(\sigma_\rho + \sigma_\theta + \sigma_z)$ – среднее нормальное напряжение.

После интегрирования соотношения (15):

$$\ln\left(\frac{s}{s_0}\right) = \frac{2\sigma_z - \sigma_\rho - \sigma_\theta}{(R+1)\sigma_\theta - R\sigma_\rho - \sigma_z} \ln\left(\frac{\rho}{R_0}\right), \text{ отсюда потенцированием получим:}$$

$$\frac{s}{s_0} = \left(\frac{\rho}{R_0}\right)^{\left[\frac{2\sigma_z - \sigma_\rho - \sigma_\theta}{(R+1)\sigma_\theta - R\sigma_\rho - \sigma_z}\right]}.$$

Текущая толщина трубной заготовки при раздаче определится соотношением:

$$s = s_0 \left(\frac{\rho}{R_0}\right)^{\left[\frac{2\sigma_z - \sigma_\rho - \sigma_\theta}{(R+1)\sigma_\theta - R\sigma_\rho - \sigma_z}\right]}. \quad (17)$$

Анализ уравнения (17) показывает, что характер изменения толщины трубной заготовки зависит от напряженного состояния с учетом коэффициента трансверсальной анизотропии и будет изменяться при изменении радиуса ρ .

Для расчета длины исходной трубной заготовки введем допущение о линейном характере изменения толщины заготовки при раздаче, что, по утверждению автора работы [16], не дает большой ошибки. Составим уравнения необходимых отрезков прямых, ограничивающих контур изделия, по известным координатам их начальных и конечных точек.

Длину заготовки для формирования конического участка с помощью раздачи найдем из условия постоянства объемов исходной заготовки V_0 и деформированного тела на конечном этапе технологической операции V_m . Объем участка трубы после деформации составлен из объемов тел, полученных вращением отрезков прямых, ограничивающих контур изделия.

$$\begin{aligned} V_m = & 2\pi \left(\frac{1}{3} s_k R_k \cos \alpha + \frac{1}{6} s_k R_0 \cos \alpha + \frac{1}{6} s_0 R_k + \frac{1}{3} s_0 R_0 \right) h + \\ & + 2\pi \left(\frac{1}{3} R_k^2 s_k \sin \alpha - \frac{1}{6} R_0 R_k s_k \sin \alpha - \frac{1}{6} R_0^2 s_k \cos \alpha \right) + \\ & + 2\pi \left(\frac{1}{12} s_k^3 \sin \alpha \cos^2 \alpha - \frac{1}{24} s_0 s_k^2 \sin \alpha \cos \alpha - \frac{1}{24} s_k s_0^2 \sin \alpha \right); \end{aligned} \quad (18)$$

$$V_3 = 2\pi l_0 s_0 R_0;$$

$$l_0 = \frac{V_m}{2\pi s_0 R_0}. \quad (19)$$

В качестве исходных данных для операции раздачи приняты: диаметр трубы 63 мм; толщина стенки 1,5 мм; коническая часть – длина 40 мм; диаметр 70 мм, $\mu = 0,15$; $\alpha = 15^\circ$; материал сталь 12X18H10T – $\sigma_{0,2} = 225$ МПа; $B = 170$ МПа; $n = 0,342$.

График на рис. 2 отображает поле напряжений, действующих в стенке трубы, при раздаче коническим пуансоном в зависимости от коэффициента трения. Рис. 3 иллюстрирует изменение напряжений в зависимости от изменения угла конусности пуансона.

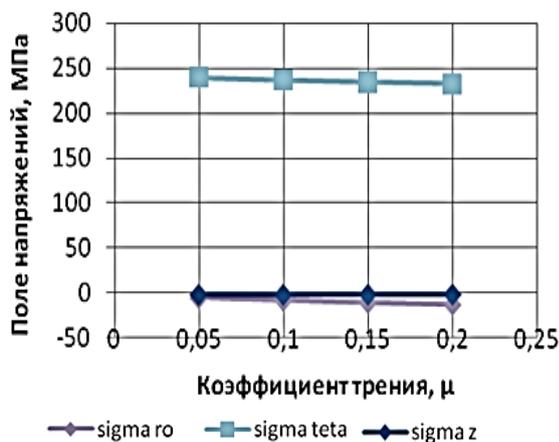


Рис. 2. Напряжения в стенке трубной заготовки в зависимости от коэффициента трения

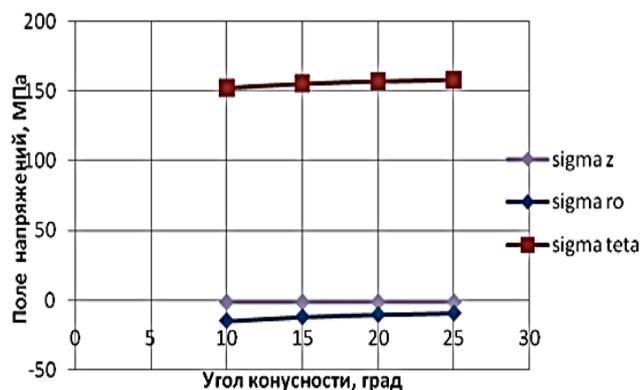


Рис. 3. Влияние угла конусности пуансона на изменение напряжений в стенке трубной заготовки

Из приведенных графиков видно, что преобладающими напряжениями являются тангенциальные растягивающие напряжения, уменьшающиеся с увеличением коэффициента трения и увеличивающиеся с увеличением угла конусности пуансона.

Изменение толщины стенки в соответствии с формулой (17) показано на рис. 4. С увеличением коэффициента раздачи толщина стенки убывает.

На рис. 5 показано изменение длины участка заготовки, необходимого для формоизменения трубы на конус, в зависимости от коэффициента раздачи.



Рис. 4. График изменения толщины стенки трубной заготовки при раздаче коническим пуансоном



Рис. 5. Влияние коэффициента раздачи на изменение длины участка трубной заготовки, необходимого для раздачи на конус

ВЫВОДЫ

Приведен теоретический анализ процесса раздачи трубной заготовки коническим пуансоном, позволяющий оценить напряженно-деформированное состояние деформируемого участка заготовки, изменение толщины стенки в процессе формоизменения и рассчитать длину заготовки для оформления конического участка.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев С. Н. МГТУ «Станкин» : курс на технологическое перевооружение отечественного машиностроения / С. Н. Григорьев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2010. – № 6. – С. 3–6.
2. Совершенствование технологии штамповки деталей промышленной арматуры / Артес А. Э., Рогозников П. А., Лыжников Е. И., Филочкин Д. В., Гольшиев Н. А. // Арматуростроение. – 2005. – № 3. – С. 26–28.
3. Разработка инновационных технологий горячей объемной штамповки / Володин А. М., Сорокин В. А., Петров Н. П., Артес А. Э., Сосенушкин Е. Н., Третьюхин В. В. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2010. – № 7. – С. 11–15.
4. Сосенушкин Е. Н. Ресурсосберегающие технологии изготовления деталей трубопроводной арматуры / Е. Н. Сосенушкин // Технология машиностроения. – 2010. – № 3. – С. 14–16.
5. Групповые технологические процессы штамповки трубных переходов в мелкосерийном и серийном производстве / Е. Н. Сосенушкин, А. Э. Артес, В. В. Третьюхин, А. Махдиян // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2007. – № 7. – С. 18–24.
6. Экспериментальные исследования формоизменения стальных труб / Е. Н. Сосенушкин, В. Н. Климов, Е. А. Яновская, Е. А. Кутьшикина // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2010. – № 6. – С. 39–43.
7. Трубные заготовки: технологический аспект раздачи и обжима / Е. Н. Сосенушкин, А. Э. Артес, Е. А. Яновская, Д. В. Хачатрян // Вестник МГТУ «Станкин». – 2010. – № 4(12). – С. 36–41.
8. Теорияковки штамповки / Е. П. Унксов, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров и др. ; под общ. ред. Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова. – М. : Машиностроение, 1992. – 720 с.
9. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки / Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1977. – 278 с.
10. Неперишин Р. И. Раздача тонкостенной трубы криволинейным жестким пуансоном / Р. И. Неперишин // Вестник МГТУ «Станкин». – 2009. – № 4(8). – С. 54–60.
11. Сосенушкин Е. Н. Определение полей напряжений при пластическом деформировании элементов оболочек / Е. Н. Сосенушкин, Е. И. Третьякова, Е. А. Яновская // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 1 (22). – С. 49–54.
12. Аверкиев А. Ю. Формоизменение трубной заготовки при раздаче и обжиге / А. Ю. Аверкиев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2000. – № 1. – С. 6–9.
13. Степанский Л. Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением / Л. Г. Степанский. – М. : Машиностроение, 1979. – 215 с.
14. Яновская Е. А. Моделирование процессов формоизменения трубных заготовок / Е. А. Яновская // Современные металлические материалы и технологии. Труды IX международной научно-технической конференции. – С-Пб. : Изд. С-Пб. государственного политехнического научно-исследовательского университета. – 2010. – С. 72–73.
15. Калюжний О. В. Аналіз інженерним методом процесу обтиску з диференційованим протитиском в конічній матриці / О. В. Калюжний // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 2 (31). – С. 15–21.
16. Попов О. В. Изготовление цельноштампованных тонкостенных деталей переменного сечения / О. В. Попов. – М. : Машиностроение, 1974. – 120 с.

Сосенушкин Е. Н. – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой МГТУ «СТАНКИН»;

Яновская Е. А. – доц. МГТУ «СТАНКИН»;

Хачатрян Д. В. – аспирант МГТУ «СТАНКИН»;

Смолович И. Е. – аспирант МГТУ «СТАНКИН»;

Киндеров В. Ю. – инженер-технолог ООО «Калипсо».

МГТУ «СТАНКИН» – Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва, Россия.

E-mail: sen@stankin.ru

Статья поступила в редакцию 06.03.2013 г.