

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЗАГОТОВОК И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТИТАНОВЫХ ПОПЛАВКОВ УРОВНЕМЕРОВ МЕТОДОМ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ФОРМОВКИ

COMPUTERIZATION OF MANUFACTURING THE TITANIUM FLOATS BY MEANS OF SUPERPLASTIC FORMING OF ELLIPTIC ENVELOPES

Рассмотрен технологический процесс изготовления титановых поплавков методом сверхпластической формовки сварных листовых пакетов, представляющих собой два листа, сваренных герметичным швом по замкнутому эллиптическому контуру. Объектом управления является установка для сверхпластической формовки, управляемым параметром – величина приложенного к заготовке давления инертного газа. Разработана математическая модель процесса, позволяющая рассчитывать геометрические размеры пакета по известным (заданным) размерам готового поплавка. Предложен алгоритм расчета закона подачи давления инертного газа, обеспечивающего деформирование оболочки с постоянной интенсивностью скоростей деформаций в течение всего цикла формовки. Практическая реализация осуществлена на примере промышленных титановых сплавов марок OT-4-1 и VT6 толщиной 1 и 1,5 мм. Это позволило получить сферические поплавки диаметром 90 мм и эллипсоидальные поплавки размерами 90x90x160 мм. На основе полученных результатов разработано программное средство, позволяющее использовать его специалистами, не имеющими навыков программирования на языках высокого уровня.

Superplastic forming of envelopes consisting of two titanium sheets welded along their common elliptic perimeter is considered. The technological object to be controlled is the installation for superplastic forming. The technological parameter to be regulated is the pressure of the inertia gas applied. The analytical model of the process involved is developed. The approach suggested enables one to calculate the geometry of the initial envelope from the known geometry of the float to be produced. The algorithm to calculate the pressure-time cycle for constant strain rate forming is also suggested. Practical approbation is fulfilled by using two different commercial titanium alloys: OT 4-1 (Ti-1.8Al-1.45Mo) and VT6 (Ti-6Al-4V). Spherical floats (Ø90 mm) as well as ellipsoidal floats (90x90x160 mm) have been successfully manufactured by using the procedures suggested. The computer program has been then developed with the aim to facilitate the calculations required.

Круглов А.А., Рахимова А.Р., Загиров Т.М., Еникеев Ф.У.

Институт проблем сверхпластичности металлов ФГБОУ ВПО Уфимский государственный нефтяной технический университет ОАО АНК Башнефть

A.A. Kruglov, A.R. Rahimova, T.M. Zagirov, F.U. Enikeev, Institute for Metals Superplasticity Problems FSBEI Ufa state petroleum technical university JSC «Bashneft»

Ключевые слова: сверхпластическая формовка, уровнемер, титан, закон подачи давления, геометрия заготовки, алгоритм

Keywords: superplastic forming; fluid level control; titanium; pressure-time cycle; blank's geometry; algorithm

Поплавковые уровнемеры применяются в системах автоматизации производственных объектов нефтегазовой, нефтехимической, химической, энергетической, металлургической, пищевой и других отраслей промышленности в аппаратах с атмосферным или избыточным давлением. В ходе эксплуатации они могут подвергаться воздействию агрессивных химически активных сред при высоком избыточном давлении, что вызывает необходимость выбора коррозионно-стойких высокопрочных материалов для их изготовления. Стойкость уровнемеров к агрессивным средам ограничена применяемыми материалами, контактирующими с контролируемой средой: нержавеющая сталь 12X18H10T, фторопласт и др. В некоторых случаях уровнемеры комплектуются титановыми поплавками, стойкими к агрессивной среде и избыточному давлению. Однако титановые сплавы обладают не только высокой кор-

розионной стойкостью, но еще и повышенной удельной конструкционной прочностью и по этой причине являются труднообрабатываемыми материалами.

Сверхпластическая формовка является одним из эффективных процессов в обработке листовых материалов [1]. Так, в частности, сферические поплавки могут быть получены методом сверхпластической формовки листового проката в цилиндрическую матрицу с последующей сваркой полученных в итоге полусфер [2]. Эллипсоидальные поплавки могут быть получены методом формовки титанового листа в матрицу эллипсоидальной формы. Однако в этом случае необходимо изготавливать дорогостоящую штамповую оснастку под каждый типоразмер изготавливаемого поплавка; кроме того, процесс формовки сравнительно длительный и требует большого ресурса пластичности от обрабатываемого материала. Технологические возможности сверхпластической формовки при изготовлении подобных изделий могут быть расширены за счет использования листовых заготовок, предварительно сваренных друг с другом в пакет [3]. При этом формовка может осуществляться по схеме свободного формообразования без штампового инструмента за счет давления газа, создаваемого во внутренней полости пакета.

Готовое изделие может быть получено за один цикл формовки. Анализ показывает [4], что степень деформации, достигаемая в оболочке, полученной из круглого сварного пакета, примерно вдвое ниже по сравнению с аналогичными показателями для оболочек, получаемых по известной технологии формовки листа в цилиндрическую матрицу, причем продолжительность формовки сокращается в два раза при примерно тех же значениях приложенного давления. Применение схемы свободной формовки для изготовления цилиндрических оболочек позволяет существенно (примерно втрое) уменьшить время формовки и значение параметра поврежденности листового материала при практически тех же значениях давления газа [5]. По этой причине представляется привлекательным использование технологии свободной формовки сварного листового пакета, состоящего из двух листов, сваренных по замкнутому эллиптическому контуру, для изготовления поплавков эллипсоидальной формы, имеющих заданное рабочим чертежом сочетание размеров главных полуосей.

Особенностью свободного формообразования оболочки из листового пакета является заметное перемещение экваториального участка к центру [6]. При этом размеры по экватору оболочки оказываются существенно меньше размеров листового пакета. Аналогичная особенность присуща и процессу формовки цилиндрических оболочек из сварных листовых пакетов прямоугольной формы [7]. Процесс получения эллипсоидальных поплавков также сопровождается заметным перемещением зоны сварного соединения к центру, что вызывает необходимость в разработке метода расчета геометрии заготовки, обеспечивающей получение поплавок заданного рабочим чертежом размера. Вторая проблема, требующая решения, связана с необходимостью обеспечения высокого уровня функциональных свойств, что может быть достигнуто выбором режима нагружения, обеспечивающего деформирование оболочки в оптимальных условиях проявления эффекта сверхпластичности в течение всего цикла формовки [1].

Целью настоящей работы является разработка и программная реализация эффективных численных алгоритмов расчета геометрии заготовки и закона подачи давления, обеспечивающих получение эллипсоидальных поплавков заданного размера с высоким уровнем функциональных свойств.

1. Расчет геометрии заготовки

Сделаем предположения, аналогичные тем, которые были использованы авторами работ [4–7]: материал однороден, изотропен и несжимаем; средний размер зерен d мал по сравнению с толщиной листа; упругие деформации пренебрежимо малы; скорости деформации достаточно малы, чтобы можно было решать задачу о равновесии оболочки; процесс

деформирования изотермический; исходная толщина листа существенно меньше характерных размеров заготовки; каждый меридиан, проходящий через полюс купола, равномерно растянут в каждой своей точке; сварное соединение не влияет на процесс деформирования оболочки, поэтому в ходе формовки сварной шов уменьшается в размерах, сохраняя свою эллиптическую форму. Расчетная схема представлена на рисунке 1. Без ограничения общности предположим для определенности, что $a_n \leq b_n$.

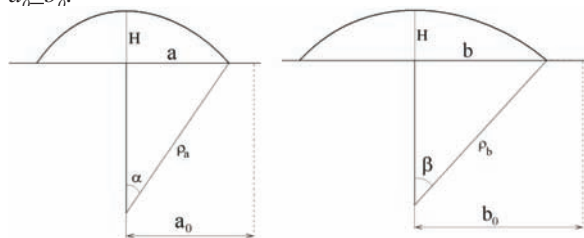


Рисунок 1. Проекция оболочки (схематически): H – высота купола, a_0, b_0 и a, b – исходные и текущие значения главных полуосей сварного шва соответственно, ρ_a, ρ_b – главные радиусы кривизны оболочки

Материальные волокна, параллельные полуосям a и b , растянуты в $\rho_a \alpha / a_0 = (a/a_0) \times \alpha / \sin \alpha$ и $\rho_b \beta / a_0 = (b/b_0) \times \beta / \sin \beta$ раз соответственно, поэтому главные логарифмические деформации равны

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ma} &= \ln \left(\frac{a}{a_0} \cdot \frac{\alpha}{\sin \alpha} \right) \\ \varepsilon_{mb} &= \ln \left(\frac{b}{b_0} \cdot \frac{\beta}{\sin \beta} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

Пусть L, L_0 – текущая и начальная длина сварного шва соответственно. Тогда имеем:

$$\begin{aligned} L &= 4b \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \omega} d\omega \\ L_0 &= 4b_0 \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - e_0^2 \sin^2 \omega} d\omega \end{aligned} \quad (2)$$

где введены следующие обозначения для эксцентриситета оболочки

$$e = \sqrt{1 - a^2 / b^2}, \quad e_0 = \sqrt{1 - a_0^2 / b_0^2}.$$

Таким образом, длина сварного соединения в ходе формовки уменьшается благодаря тому, что уменьшаются значения a и b . В результате появляется отличная от нуля окружная деформация (вдоль сварного соединения): $\varepsilon_t = \ln(L/L_0)$. Поскольку сварное соединение не оказывает влияния на процесс формовки, толщина оболочки вблизи сварного шва не изменяется в ходе формовки: $s = s_0 = \text{const}$. Отсюда следует, что меридиональная деформация вблизи сварного шва также отлична от нуля в силу несжимаемости: $\varepsilon_m + \varepsilon_t + \varepsilon_n = 0$, где $\varepsilon_n = \ln(s/s_0) = 0$ (т.к. $s = s_0 = \text{const}$). Тогда имеем $\varepsilon_{ma} = \varepsilon_{mb} = -\varepsilon_t$ и в силу (1), (2)

$$\frac{a}{a_0} \cdot \frac{\alpha}{\sin \alpha} = \frac{b}{b_0} \cdot \frac{\beta}{\sin \beta} = \frac{L_0}{L} = \frac{b_0}{b} \cdot \left(\int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - e_0^2 \sin^2 \omega} d\omega \right) \cdot \left(\int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \omega} d\omega \right)^{-1} \quad (3)$$

Из очевидных геометрических соображений следует, что:

$$H = a \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = b \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \quad (4)$$

Комбинируя (3), (4) находим:

$$\frac{a}{b} = \frac{a_0}{b_0} \cdot \frac{\sin \alpha}{\alpha} \cdot \frac{\beta}{\sin \beta} = \frac{\operatorname{tg}(\beta/2)}{\operatorname{tg}(\alpha/2)} \quad (5)$$

Выражения (3)–(5) могут быть использованы для расчета текущих значений a, b по заданным значениям a_0 и b_0 . Обратная задача также имеет решение: можно рассчитать геометрию заготовки (a_0 и b_0) по заданным значениям готовой детали a_f и b_f . Можно показать, что в предельных случаях круглой сварной заготовки ($a_0 = b_0$) и прямоугольной сварной заготовки ($a_0/b_0 \ll 1$) выражения (3)–(5) приводят к аналогичным выражениям, полученным авторами работ [6] и [7] соответственно.

На практике обычно известны размеры готовой детали, т.е. значения главных полуосей a_f, b_f и высота оболочки H_f ($H_f \leq a_f$). По этой причине важно уметь рассчитывать геометрию заготовки (a_0 и b_0) по этим данным. На основании проведенного выше анализа, можно предложить следующий алгоритм.

Алгоритм расчета геометрии заготовки

Вычислить α_f из условия $\operatorname{tg}(\alpha_f/2) = H_f/a_f$

Вычислить β_f из условия $\operatorname{tg}(\beta_f/2) = H_f/b_f$

Вычислить значение отношения $a_0/b_0 = (a_f/b_f) \times (\alpha_f/\sin \alpha_f) \times (\sin \beta_f/\beta_f)$

Вычислить эксцентриситеты

$$e_f = \sqrt{1 - a_f^2/b_f^2}, \quad e_0 = \sqrt{1 - a_0^2/b_0^2}$$

Вычислить значения L_f и L_0 из (2)

Вычислить $b_0 = b_f \times [(\beta_f/\sin \beta_f) \times (L_f/L_0)]^{1/2}$

Вычислить $a_0 = a_f \times (\alpha_f/\sin \alpha_f) \times (\sin \beta_f/\beta_f) \times b_0/b_f$

Помимо значений главных полуосей, важно уметь также рассчитывать толщину оболочки. Наиболее опасным с точки зрения разрушения является полюс купола, в котором толщина оболочки достигает своего минимального значения, обозначим его через s_p (p – pole). Из условия несжимаемости $\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz} = 0$ и выражений (1) следует, что

$$s_p = s_0 \left(\frac{a_0}{a} \cdot \frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 = s_0 \left(\frac{b_0}{b} \cdot \frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \quad (6)$$

Выражение (6) может быть использовано для вычисления исходной толщины листа s_0 , обеспечивающего получение поплавка с заданным значением минимальной толщины s_{min} . В конечный момент вре-

мени имеем $s_p = s_{min}$ (при $\alpha = \pi/2$), тогда из (6) следует, что $s_0 = s_{min} (\pi a / 2 a_0)^2$.

На рисунке 2 приведены результаты расчетов в соответствии с описанным алгоритмом. Как видно из рисунка 2а, для низких оболочек $H_f/a_f = 0,1$ имеет место постоянство геометрии сварного соединения, т.е. $a_0/b_0 \cong a_f/b_f$. Наиболее заметно отличие в геометрии заготовки и детали для промежуточного диапазона значений a_f/b_f . Например, формовка пакета со сварным швом $a_0/b_0 \cong 0,77$ приведет к получению оболочки с $a_f/b_f = 0,6$ при $H_f/a_f = 1$. Аналогичные выводы могут быть сделаны и из рисунка 2б. Данный вывод имеет большое практическое значение, поскольку для получения оболочки с заданным эксцентриситетом, отличным от нуля, исходный пакет должен иметь другое, не равное ему значение эксцентриситета. Как следует из приведенного выше примера, отличие в значении a/b может достигать почти 30% (0,6 и 0,77).

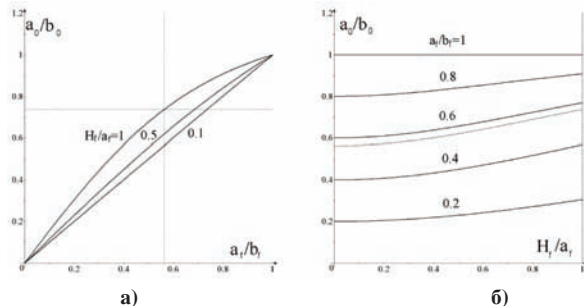


Рисунок 2. Зависимости геометрии заготовки a_0/b_0 геометрии детали a_f/b_f (а) и относительной высоты купола H_f/a_f , рассчитанные при различных значениях H_f/a_f и a_f/b_f соответственно (указаны числами у кривых). Пунктиром показаны значения, соответствующие тем, которые были использованы в экспериментах

2. Анализ напряженного состояния

Принятые выше предположения дают возможность использовать основные положения безмоментной теории оболочек, в частности, предположение о том, что отличными от нуля являются только две компоненты напряженного состояния: меридиональное (σ_m) и окружное (σ_r) напряжения. Запишем для них уравнение Лапласа:

$$\frac{\sigma_m}{\rho_a} + \frac{\sigma_r}{\rho_b} = \frac{p}{s} \quad (7)$$

где p – давление газа, s – толщина оболочки, ρ_a, ρ_b – главные радиусы кривизны оболочки.

Далее, примем гипотезу Сен-Венана о подобии девиаторов напряжений и скоростей деформаций [1]:

$$S_{ij} = \left(\frac{2\sigma_e}{3\xi_e} \right) \xi_{ij} \quad (8)$$

где σ_e, ξ_e – интенсивности напряжений и скоростей деформаций соответственно, $S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_{avr}$ – компоненты девиатора напряжений, $\sigma_{avr} = (1/3) \sigma_{ij} \delta_{ij}$ – среднее напряжение δ_{ij} символы Кронеккера ($\delta_{ij} = 1$,

если $i=j$ и $\delta_{ij}=0$, если $i \neq j$). Тогда интенсивность напряжений будет равна, по определению [1]:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij}} = \sqrt{\sigma_m^2 + \sigma_t^2} - \sigma_m \sigma_t \quad (9)$$

Из выражений (7)–(9) следует, что в полюсе купола должны выполняться следующие равенства

$$\sigma_{ep} = \sigma_{mp} = \sigma_{tp} = \frac{P}{s_p} \cdot \frac{P_a P_b}{\rho_a + \rho_b} \quad (10)$$

где s_p – толщина оболочки в полюсе купола из (6). Принимая во внимание, что $a = \rho_a \sin \alpha$ и $b = \rho_b \sin \beta$ (рисунок 1) получим с учетом (6)

$$\sigma_{ep} = \frac{p a_0}{2 s_0} \cdot \left(\frac{a}{a_0}\right)^3 \cdot \left(\frac{\alpha}{\sin \alpha}\right)^2 \cdot \frac{\operatorname{tg}(\alpha/2)}{\sin^2(\alpha/2) + \sin^2(\beta/2)} = \Phi(\xi_e, \varepsilon_e) \quad (11)$$

где $\Phi(\xi_e, \varepsilon_e)$ – модель сверхпластичного материала, в качестве которой можно использовать, например, стандартное степенное соотношение сверхпластичности [1] $\sigma = K \xi^m$, где m – показатель скоростной чувствительности и K – параметр материала, зависящий от среднего размера зерен и других структурных характеристик. В тех случаях, когда необходимо принять во внимание влияние роста зерен, можно использовать обобщение этой модели в форме $\sigma = K' \varepsilon^n \xi^{m'}$, где K' , m' , n – параметры материала.

3. Закон подачи давления

Известно [1], что явление сверхпластичности наблюдается в узком интервале изменения скорости деформации, что вызывает необходимость регулирования закона подачи давления газа, обеспечивающего деформирование оболочки с постоянной скоростью деформации в наиболее опасном с точки зрения разрушения участке – полюсе купола. Для того чтобы рассчитать эту зависимость, можно использовать следующие условия:

$$\xi_e = \xi_{opt} = \text{const} \quad \sigma_e = \sigma_{opt} = \text{const} \quad (12a, b)$$

где σ_{opt} , ξ_{opt} – значения напряжения течения и скорости деформации, соответствующие точке перегиба сигмоидальной кривой сверхпластичности [1], σ_e , ξ_e – интенсивности напряжений и скоростей деформаций соответственно. В тех случаях, когда напряжение течения не зависит от степени деформации, условия (12a) и (12b) эквивалентны.

Перепишем выражение (11) в следующем виде:

$$p = \frac{2 s_0}{a_0} \sigma_{opt} \left(\frac{a_0}{a}\right)^3 \cdot \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha}\right)^2 \cdot \frac{\sin^2(\alpha/2) + \sin^2(\beta/2)}{\operatorname{tg}(\alpha/2)} \quad (13)$$

В частности, для случая формовки круглой сварной листовой заготовки $a_0 = b_0$, $a = b$, $\alpha = \beta$, и $(a_0/a)^2 = \sin \alpha / \alpha$. Подставляя эти равенства в (13), получим:

$$p = \frac{2 s_0}{a_0} \sigma_{opt} \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha}\right)^{3/2} \quad (14a)$$

что совпадает с аналогичным выражением, приведенным в работе [6]. В другом предельном случае формовки прямоугольной сварной листовой заготовки $a_0/b_0 \rightarrow 0$, $\beta \rightarrow 0$, $b \rightarrow b_0$ и выражение (13) приобретает вид

$$p = \frac{2 s_0}{a_0} \alpha \sigma_{opt} \quad (14b)$$

В то же время, в работе [7] было получено следующее выражение:

$$p = \frac{4 s_0}{a_0} \cdot \frac{\alpha}{\sqrt{3 + (\sin 2\alpha / 2\alpha)^2}} \quad (14c)$$

Сравнение выражений (14b) и (14c) показывает, что расхождение между ними невелико и не превышает 13%. Причина появления расхождения вызвана тем обстоятельством, что в данной работе при выводе соотношения (13) использованы уравнение Лапласа (7) и условие Сен-Венана (8). Авторы работы [7] использовали то же самое уравнение Лапласа (7) и второе уравнение равновесия, которое известно в теории безмоментных оболочек. В то же время, можно показать, что в рамках принятых упрощений не удастся удовлетворить одновременно обоим уравнениям равновесия безмоментной теории оболочек и условию Сен-Венана (8). Более подробный анализ выявленных расхождений выходит за рамки настоящей работы.

Выражение (13) наряду с выражением для высоты купола (4) может рассматриваться как параметрическое задание оптимального закона изменения давления $p(H)$, обеспечивающего деформирование листа при постоянной интенсивности напряжений, т.е., обеспечивающей выполнение условия (12b). Для того чтобы провести теоретический анализ этой параметрической зависимости, удобно ввести в рассмотрение относительные давление $p' = (p a_0 / 2 s_0 \sigma_{opt})$ и высоту купола $H' = (a / a_0) \times \operatorname{tg}(\alpha/2)$. На рисунке 3 представлены расчетные зависимости $p'(\alpha)$ и $p'(H')$, вычисленные для различных исходных конфигураций сварной листовой заготовки, определяемых соотношением ее главных полуосей a_0/b_0 .

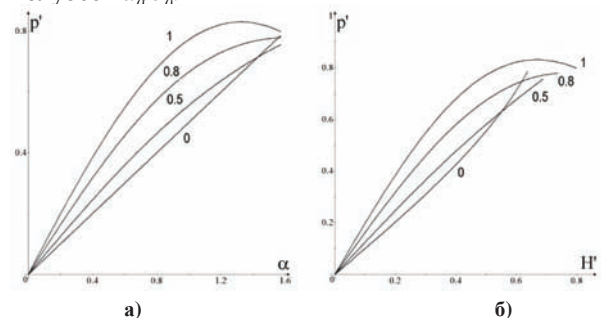


Рисунок 3. Зависимости относительного давления $p' = p a_0 / 2 s_0 \sigma_{opt}$ от α (а) и от относительной высоты купола $H' = (a / a_0) \times \operatorname{tg}(\alpha/2)$ (б), вычисленные в соответствии с выражением (13) при различных значениях a_0/b_0 (указаны цифрами у кривых)

Как видно на рисунке 3, с уменьшением параметра a_0/b_0 локальный максимум на кривой давления постепенно исчезает. Заметим, что авторами работы [7] сделан вывод о том, что зависимость давления от времени процесса формовки прямоугольной сварной листовой заготовки качественно отличается от характера этих зависимостей для традиционных схем сверхпластической формовки в матрицы прямоугольной и цилиндрической формы [1], а также для процесса свободной формовки круглой сварной заготовки. Это отличие, как указано в работе [7], заключается в отсутствии максимума на кривой давления, что хорошо согласуется с результатами, представленными на рисунке 3. В результате анализа результатов расчетов, представленных на рисунке 3, можно сделать следующий важный в практическом отношении вывод: в том случае, если значение отношения главных полуосей исходного сварного листового пакета a_0/b_0 меньше, чем $\sim 0,5$, можно использовать линейный закон подачи давления, т.е. давление газа может увеличиваться прямо пропорционально высоте купола. Это обстоятельство может быть использовано при организации систем автоматического управления в цепях обратной связи.

Для того чтобы перестроить зависимости, показанные на рисунке 3, в координатах “давление – время”, проинтегрируем соотношение (12а) по времени, в результате получим, что $\xi_{opt} t = \varepsilon_e$, где ε_e – интенсивность деформаций. С учетом (1) получим, что для расчета зависимости давления газа от времени соотношение (13) может быть дополнено следующим выражением:

$$\xi_{opt} t = \varepsilon_{ep} = 2\varepsilon_{ma} = 2\varepsilon_{mb} = 2 \ln \left(\frac{a}{a_0} \cdot \frac{\alpha}{\sin \alpha} \right) = 2 \ln \left(\frac{b}{b_0} \cdot \frac{\beta}{\sin \beta} \right) \quad (15)$$

Отсюда следует, что продолжительность формовки в оптимальном режиме может быть рассчитана из условия

$$t_f = \frac{2}{\xi_{opt}} \cdot \ln \left(\frac{a}{a_0} \cdot \frac{\alpha_f}{\sin \alpha_f} \right) \quad (16)$$

где α_f – конечное значение параметра конфигурации α , соответствующее максимальной высоте отформованного купола. На практике, как правило, формовку проводят до значения $\alpha_f = \pi/2$, что соответствует, получению сферической оболочки из круглого пакета [6], а также изготовлению цилиндрической оболочки из прямоугольного пакета [7]. Пусть $\tau_f = \xi_{opt} t$ – безразмерная продолжительность формовки для оптимального режима нагружения. На рисунке 4 представлены расчетные зависимости значений τ_f от исходной (a_0/b_0) и конечной (a_f/b_f) геометрии оболочки. Как следует из результатов расчетов, представленных на рисунке 3, продолжительность формовки монотонно возрастает с увеличением геометрического фактора a_0/b_0 (или a_f/b_f).

Другими словами, по мере перехода от прямоугольных заготовок к круглым сварным заготовкам продолжительность формовки увеличивается.

Необходимо отметить, что в частных случаях поплавок сферической и цилиндрической формы модель позволяет получать результаты, совпадающие с известными из литературы [6,7].

4. Методики определения реологических параметров

Для того чтобы проводить расчеты по приведенным выше формулам, необходимо знать параметры точки перегиба сигмоидальной кривой сверхпластичности: оптимальные значения напряжения течения σ_{opt} и скорости деформации ξ_{opt} . Этого достаточно чтобы рассчитать закон подачи давления, однако недостаточно для того, чтобы рассчитать временные характеристики процесса при других режимах нагружения, например, при постоянном давлении инертного газа. Для этого необходимо знать конкретные значения реологических параметров, входящих в выбранную модель материала. С другой стороны, значения реологических параметров необходимо знать и для того, чтобы можно было проводить численные расчеты в среде специализированных программных комплексов, таких как ANSYS, ABAQUS, MARC и т.п. Проведение этих расчетов необходимо для обоснования предложенного выше аналитического подхода к моделированию процесса сверхпластической формовки эллиптических сварных листовых пакетов, основанного на использовании упрощенной безмоментной теории оболочек.

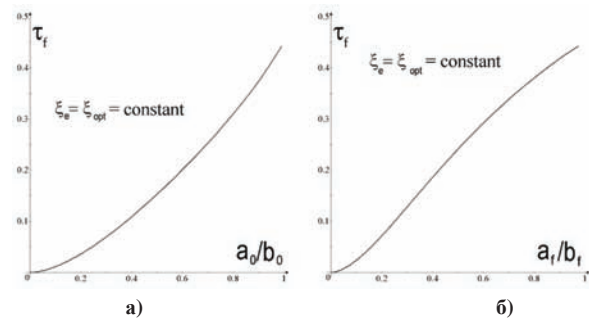


Рисунок 4. Зависимость продолжительности формовки τ_f от начальной конфигурации заготовки a_0/b_0 (а) и от конечной конфигурации поплавок a_f/b_f (б) в оптимальном режиме сверхпластичности (с постоянной в полюсе купола скоростью деформации)

Как уже отмечено выше, в рамках настоящего исследования рассматриваются следующие две феноменологические модели сверхпластичности:

$$\sigma = K \xi^m, \quad \sigma = K' \varepsilon^n \xi^{m'} \quad (17a,b)$$

где m , K и K' , m' , n – реологические параметры материала, которые необходимо определить по результатам механических испытаний. Проблема заключается в том, что на сегодняшний день не существует справочников, в которых приводились

бы значения этих параметров даже для самых распространенных материалов, включая промышленные титановые сплавы. По этой причине в рамках настоящего исследования были разработаны специальные методики экспериментального определения значений реологических параметров по результатам тестовых формовок при постоянном давлении инертного газа круглых и прямоугольных мембран в цилиндрическую и прямоугольную матрицы соответственно.

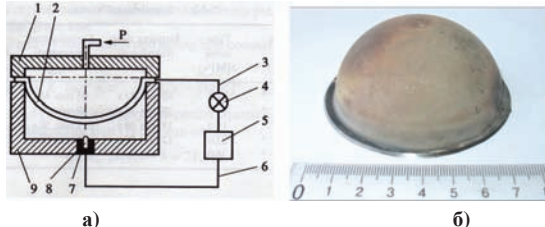


Рисунок 5. Схема проведения технологических экспериментов (а) и отформованный образец (б)

На рисунке 5 представлена общая схема проведения испытаний, в результате которых измерялась продолжительность формовки полусфер t_i при постоянном давлении инертного газа p_i ($i=1,2,\dots,N$), где N – количество измерений. Эксперименты проводились на штамповой оснастке с устройством контроля формообразования. Устройство контроля (рисунок 5, а) содержит закрепленную на дне матрицы (9) центрирующую втулку (8), охватывающую стержень (7), с рабочим торцом, обращенным к формируемой заготовке (2), прижатой к матрице крышкой (1), и узел индикации. Стержень выполнен с коническим рабочим торцом и изготовлен из материала, обладающего хорошей электропроводностью и достаточной жаростойкостью (в данном случае нихром). Втулка выполнена из керамики. Узел индикации включает сигнальный элемент (4) и источник электрической энергии (5), электрически связанные между собой. Сигнальный элемент соединен электрическим проводником (3) с формируемой заготовкой. Источник электрической энергии соединен электрическим проводником (6) со стержнем.

Для обработки полученного входного набора экспериментальных данных $\{p_i, t_i\}$ ($i=1,2,\dots,N$) была разработана и реализована специальная методика идентификации модели материала, подробно описанная в работе [8]. Применение данной методики позволяет однозначно определять значения реологических параметров m, K для модели материала (17а) по полному набору входных данных $\{p_i, t_i\}$ ($i=1,2,\dots,N$). Кроме того, были разработаны и практически реализованы методики определения значений реологических параметров K', m', n для модели материала (17б) по результатам тестовых формовок листового материала в цилиндрическую [9] и прямоугольную [10] матрицы.

5. Обоснование предлагаемого подхода

Для обоснования применимости предлагаемого подхода, основанного на принятии ряда кинематических гипотез о характере деформированного состояния в очаге деформации и использовании основных предположений безмоментной теории оболочек, целесообразно провести сопоставление предсказаний аналитического подхода не только с экспериментальными данными, но и с численными решениями соответствующей краевой задачи механики деформируемого твердого тела. В данной работе для проведения компьютерного моделирования выбран пакет программ ANSYS. В расчетах с использованием феноменологической модели сверхпластичности (17а) использовался вариант постановки краевой задачи теории ползучести [11]. Для включения в постановку краевой задачи модели материала (17б) предложена методика, подробно описанная в работе [12]. Она была применена авторами работы [13] для моделирования процесса формообразования сварного листового пакета из промышленного титанового сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V) с исходной толщиной $s_0=5$ мм и радиусом $R_0=100$ мм.

Результаты расчетов в среде ANSYS представлены на рисунок 6 (сплошные линии). Для сравнения пунктирными линиями показаны приближенные решения, полученные в рамках упрощенной модели, основанной на использовании основных уравнений безмоментной теории оболочек.

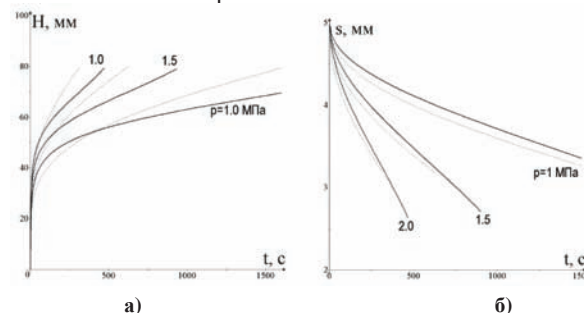


Рисунок 6. Зависимости от времени t высоты купола H (а) и толщины в полюсе s (б) для режима деформирования сварного листового пакета из сплава ВТ6 при постоянном давлении газа (указано цифрами у кривых) [13]

Как видно из рисунка 6, упрощенная модель качественно верно ухватывает основные закономерности деформирования круглого сварного листового пакета. Вместе с тем, следует подчеркнуть, что в том случае, когда стоит задача более точного количественного описания основных технологических параметров процесса (например, временных зависимостей или толщины оболочки в полюсе купола), более предпочтительным представляется проведение численных расчетов с использованием программного комплекса ANSYS или подобного ему.

На первый взгляд может показаться, что из полученных результатов можно сделать вывод о том, что в разработке аналитического подхода нет необходи-

мости, поскольку на сегодняшний день на рынке имеется ряд хорошо зарекомендовавших себя программных продуктов, специально предназначенных для решения краевых задач механики деформируемого твердого тела. Почему бы сразу не применить их к расчету геометрии заготовки и оптимального закона подачи давления, что является целью настоящего исследования? Во-первых, для того чтобы использовать такого рода “тяжелые” программные продукты, необходимо не только иметь их лицензионные версии, но еще и обученный персонал, способный квалифицированно работать с ними. Очевидно, что все это не может не отразиться на цене готовых деталей, поскольку требует соответствующих дополнительных расходов. Во-вторых, даже если эти проблемы решены, возникает другая, не менее, а возможно, даже и более серьезная. Проблема заключается в том, что имеющиеся на рынке программные продукты предназначены, вообще говоря, для решения прямых задач. В данном случае это означает, что их применение позволит получить решение задачи для случая, когда геометрия заготовки (пакета) известна заранее и, кроме того, заранее известен и закон подачи давления. Для решения обратной задачи (например, подбора геометрии исходного пакета) необходимо, вообще говоря, проведение обширных серий вычислительных экспериментов, требующих больших затрат времени, поскольку типичное время счета одного варианта может занимать время от минут до часа, а для эллипсоидальных оболочек (3D постановка) – и того более. На порядок больше времени занимает обработка и анализ полученных результатов. Это не только (и даже не столько) машинное время, сколько рабочее время высококвалифицированного персонала. По этой причине область применимости упрощенного аналитического подхода, развитого в настоящей работе, видится в следующем. Проведение расчетов по полученным выше аналитическим формулам позволит получить первую инженерную прикидку как геометрии исходного пакета, так и закона подачи давления. На втором этапе (при необходимости достижения более точного результата моделирования) можно применять “тяжелые” программные продукты, но уже не для решения обратной задачи, а уточнения готовых аналитических решений.

6. Экспериментальная апробация

Экспериментальная апробация проведена в Учреждении Российской академии наук Институт проблем сверхпластичности металлов (ИПСМ). Для экспериментов были выбраны промышленные титановые сплавы марок ВТ6 (Ti-6Al-4V) и ОТ-4-1

(Ti-1.8Al-1.45Mo) толщиной 1 и 1,5 мм¹. Результаты расчетов, проведенных в соответствии с предложенным выше алгоритмом расчета геометрии сварного листового пакета, сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Результаты расчета геометрии сварных листовых пакетов

Параметр	Сферические поплавки	Эллипсоидальные поплавки
Требования заказчика		
Давление*	5,0 МПа	10,5 МПа
a_p , мм	45	45
b_p , мм	45	80
H_p , мм	45	45
a_f/b_f	1	0,5625
e_f		0,676
Геометрия сварного листового пакета		
a_o , мм	56,4	61,6
b_o , мм	56,4	83,7
E_o	0	0,827
a_o/b_o	1	0,737
a_f/a_o	0,798	0,730
a_o/a_f	1,253	1,37
b_f/b_o	0,798	0,956
b_o/b_f	1,253	1,05

Примечание. * Указано внешнее давление, которое должны выдерживать полавки контакторов уровня

Оптимальные условия для выбранных титановых сплавов выбраны по литературным данным [14] и сведены в таблицу 2. На основании данных, приведенных в таблице 2, рассчитаны оптимальные законы подачи давления, они представлены на рисунках 7 и 8.

Таблица 2. Параметры точки перегиба кривой сверхпластичности

Сплав	Хим. состав	σ_{opt} , МПа	ξ_{opt} , с ⁻¹
ВТ6	Ti-6Al-4V	15	2×10^{-4}
ОТ-4-1	Ti-1.8Al-1.45Mo	20	5×10^{-4}

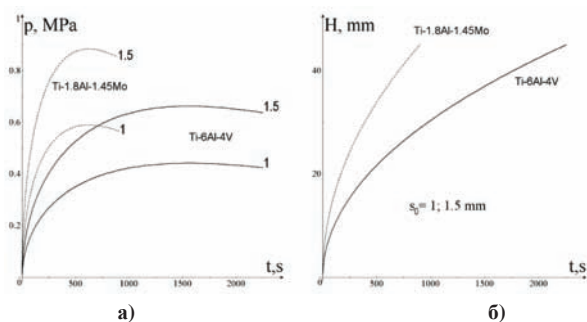


Рисунок 7. Законы подачи давления (а) и зависимости высоты купола от времени (б), вычисленные для процесса сверхпластической формовки круглых пакетов из сплавов ВТ6 (сплошные линии) и ОТ-4-1 (пунктирные линии) для двух значений исходной толщины листа s_0 (указаны цифрами у кривых)

¹ Эксперименты выполнены в Институте проблем сверхпластичности металлов под руководством старшего научного сотрудника, кандидата технических наук Круглова А.А.

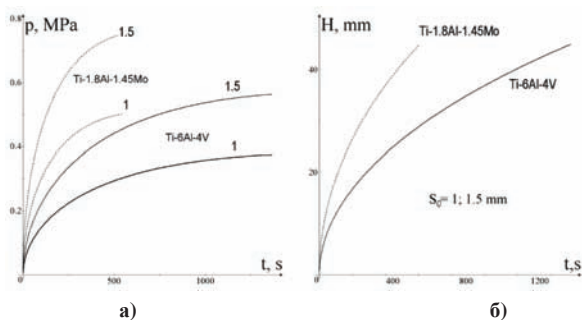


Рисунок 8. Законы подачи давления (а) и зависимости высоты купола от времени (б), вычисленные для процесса сверхпластической формовки эллиптических пакетов из сплавов ВТ6 (сплошные линии) и ОТ-4-1 (пунктирные линии) для двух значений исходной толщины листа s_0 (указаны цифрами у кривых)

Результаты расчетов оптимальных режимов нагружения для пакетов с размерами $a_0=b_0=56,4$ мм, из которой получены сферические поплавки с размерами $a_f=b_f=H_f=45$ мм, представлены на рисунке 7. Как видно на рисунке 7, получены типичные зависимости, имеющие локальный максимум. На рисунке 8 приведены оптимальные режимы нагружения для эллиптических пакетов с размерами $a_0=61,6$ мм, $b_0=83,7$ мм, из которых получены эллипсоидальные поплавки $90 \times 90 \times 160$ мм. Как видно из рисунка 8, зависимости давления от времени не имеют локальных максимумов. На рисунках 9, 10 приведены фотографии отформованных сферических и эллипсоидальных поплавков указанных выше размеров.



Рисунок 9. Сферический поплавок диаметром 90 мм из промышленного титанового сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V), отформованный из круглого пакета в состоянии сверхпластичности. В этом случае $a_f=b_f=H_f=45$ мм, $\alpha_f=\beta_f=\pi/2$, $a_f/b_f=a_0/b_0=1$, $a_0=b_0=56,4$ мм



Рисунок 10. Эллипсоидальный поплавок из промышленного титанового сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V), отформованный из эллиптического пакета в состоянии сверхпластичности. Геометрические размеры $90 \times 90 \times 160$ мм. В этом случае $a_f=H_f=45$ мм, $b_f=80$ мм, $\alpha_f=\pi/2$, $\beta_f=1,0248$, $a_f/b_f=0,5625$, $a_0/b_0=0,737$, $a_0=61,6$ мм, $b_0=83,7$ мм

Всего было изготовлено 75 поплавков. Все изготовленные поплавки подверглись испытаниям внешним давлением 5 и 10,5 МПа для поплавков изготовленных из листов толщиной 1 и 1,5 мм соответственно. Результаты гидравлических испытаний подтвердили высокое качество поплавков и их соответствие установленным заказчиком требований.

Проведено сопоставление разработанной в ИПСМ технологии изготовления поплавков контакторов уровня со стандартным методом сверхпластической формовки в цилиндрическую матрицу. Установлено, что коэффициент использования металла по разработанной технологии достигает 75%, при этом энергопотребление снижается в 1,6 раза. Объем требуемых капитальных вложений сокращается в 2,5 раза. Емкость рынка невелика, при этом заказчиков интересуют поплавки различной геометрии. По этой причине представляется нецелесообразным изготовление отдельной дорогостоящей штамповой оснастки под каждый типоразмер поплавок. Предлагаемая технология обладает большой гибкостью и быстрой окупаемостью затрат, она может быть быстро внедрена на различных предприятиях отрасли.

7. Программная реализация

Полученные в ходе проведения теоретических и экспериментальных исследований результаты положены в основу разработки специализированного программного средства для компьютерного моделирования процесса свободного формообразования листовых промышленных титановых сплавов в состоянии сверхпластичности, позволяющего рассчитывать геометрию заготовки и оптимизировать процесс нагружения сварного пакета из листовых заготовок, сваренных герметичным швом по замкнутому эллиптическому контуру. Структурно-функциональная модель программного средства разработана в рамках стандарта моделирования

IDEF0. В качестве инструментов разработки использованы Visual C#, Microsoft Visual Studio 2008, Платформа СУБД Microsoft SQL 2005 [15]. Программный продукт снабжен дружественным интерфейсом, позволяющим использовать его специалистами, не имеющими навыков программирования на языках высокого уровня (рисунок 11).

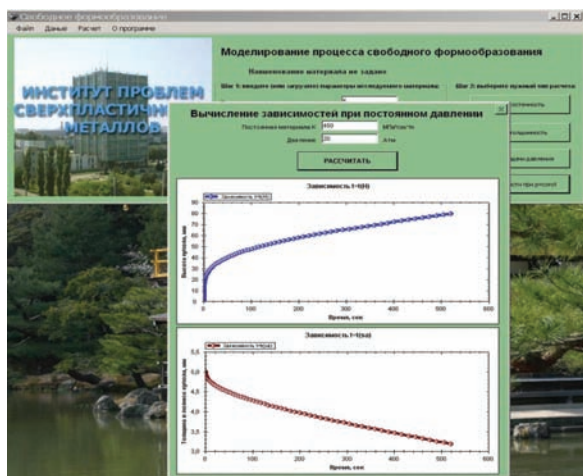


Рисунок 11. Интерфейс программного средства для компьютерного моделирования процесса свободного формообразования листовых промышленных титановых сплавов в состоянии сверхпластичности [15]

Разработанное программное средство позволяет осуществлять автоматический расчет геометрических параметров заготовки, режима нагружения, оптимизирующего процесс, а также временные параметры процесса. Необходимость в разработке специализированного программного средства вызвана тем обстоятельством, что, несмотря на упрощенный характер развитого в настоящей работе подхода, проведение расчетов по полученным аналитическим формулам вызывает необходимость в проведении довольно громоздких вычислений. Применение на практике программного средства позволяет минимизировать время, затрачиваемое персоналом на проведение расчетов, а также сужает коридор для действия фактора человеческих ошибок при планировании процесса свободного формообразования. В результате снижается вероятность необоснованных экономических потерь и повышается эффективность управления технологическим про-

цессом сверхпластической формовки сварных листовых пакетов из промышленных титановых сплавов.

Заключение

Предлагается математическая модель процесса свободной формовки сварного листового пакета, состоящего из двух титановых листов, сваренных герметичным швом по замкнутому эллиптическому контуру. Предложен алгоритм расчета геометрии заготовки по известным (заданным) размерам готового поплавка. Алгоритм предназначен для рационального выбора размеров исходного сварного листового пакета с целью обеспечения возможности изготовления оболочки заданного рабочим чертежом размера.

Установлен закон подачи давления, обеспечивающий деформирование оболочки в оптимальных условиях сверхпластичности на протяжении всего процесса формовки. В том случае, если значение отношения главных полуосей исходного сварного листового пакета a_0/b_0 меньше, чем $\sim 0,5$, можно использовать линейный закон подачи давления, т.е. давление газа может увеличиваться прямо пропорционально высоте купола. Это обстоятельство может быть использовано при организации систем автоматического управления в цепях обратной связи.

Проведено экспериментально-теоретическое обоснование применимости предлагаемого подхода. Сопоставление результатов конечноэлементного моделирования с предсказаниями предлагаемого подхода показывает удовлетворительное согласие между ними. Практическая реализация предложенных алгоритмов позволила получить титановые полавки сферической формы диаметром 90 мм и эллипсоидальные полавки размерами 90x90x160 мм.

Предлагаемые алгоритмы расчета практически реализованы в специализированных программных средствах компьютерного моделирования процесса свободного формообразования листовых промышленных титановых сплавов в состоянии сверхпластичности, разработанных в среде разработки Microsoft Visual Studio 2008 с использованием платформы СУБД Microsoft SQL 2005 и Case-средств BPWin и ERWin.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов О.М. Обработка металлов давлением в состоянии сверхпластичности. М.: Машиностроение. 1979. 184 С.
2. Huang J.C., Chuang T.H. Progress on superplasticity and superplastic forming in Tai-wan during 1987-1997. Review // Materials Chemistry and Physics. 57 (1999) P.195-206
3. Свободная формовка сферических оболочек из сверхпластичных листовых материалов / Кайбышев О.А. и др. // Кузнечно-штамповочное производство. 1991. №8. С.19-20.
4. Загиров Т.М., Круглов А.А., Еникеев Ф.У. Изготовление сферических оболочек из сварных листовых заготовок методом сверхпластической формовки // Кузнечно-штамповочное производство. 2010. №4. С.31-38.
5. Загиров Т.М., Круглов А.А., Еникеев Ф.У. Изготовление цилиндрических оболочек из сварных листовых заготовок методом сверхпластической формовки // Известия ВУЗов, Цветная металлургия. 2011. №2. С.43-49.
6. Круглов А.А., Еникеев Ф.У., Лутфуллин Р.Я. Расчетная модель процесса сверхпластической формовки сферической оболочки из листового проката //

Кузнечно-штамповочное производство 2000. №10. С.6-9.

7. Круглов А.А., Еникеев Ф.У. Сверхпластическая формовка цилиндрических оболочек. // Изв. Тульского гос. ун-та, сер. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. 2005. Вып. 2. С.41-49.

8. Загиров Т.М., Круглов А.А., Еникеев Ф.У. Идентификация реологических параметров сверхпластичности по результатам тестовых формовок листовых материалов при постоянном давлении // Заводская лаборатория. Диагностика материалов 2010.Т. 76. №9. С.48-56

9. Методика экспериментального определения реологических свойств микрокристаллических материалов по результатам технологических экспериментов / Загиров Т.М.и др. //Проблемы машиностроения и автоматизации. 2010. №2. С.65-74.

10. Определение сверхпластических свойств по результатам тестовых формовок прямоугольных мембран при постоянном давлении / Жеребцов Ю.В.и др.// Вестн. Магнитогорского гос. техн. ун-та им Г.И. Носова. 2011. №1. С.46-51.

11. Еникеев Ф.У. Математическое моделирование процессов обработки давлением промышленных титановых сплавов в состоянии сверхпластичности // Изв. Вузов; Цветная металлургия. 2008. №1. С.43-50.

12. Методика учета влияния роста зерен при конечноэлементном моделировании процессов сверхпластического формования перспективных конструкционных материалов / Загиров Т.М. и др. // Известия ВУЗов. Цветная металлургия. 2011. №1. С.41-45.

13. Никитин М. С., Загиров Т.М., Еникеев Ф.У. Расчет режимов нагружения сварных листовых заготовок в режиме сверхпластичности с учетом влияния роста зерен на реологическое поведение перспективных конструкционных материалов // Технология Машиностроения. 2010. №8. С.5-10.

14. Kruglov A.A., Enikeev F.U., Lutfullin R.Ya. Superplastic forming of a spherical shell out a welded envelope // Materials Science and Engineering: 2002. Vol. A323. P.416-426.

15. Загиров Т.М., Никитин М.С. Оптимизация процесса свободного формования осесимметричных изделий из микрокристаллических материалов //

Актуал. пробл. науки и техники: тез. I международ. конф. мол. учен. Уфа: УГНТУ. 2009. С.43-44.

Круглов А.А., канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ИПСМ

A.A. Kruglov, cand.tech.sci., senior researcher, IMSP

e - mail: alweld@go.ru

Рахимова А.Р., магистрант кафедры «Вычислительная техника и инженерная кибернетика», ФГБОУ ВПО УГНТУ

A.R. Rakhimova, undergraduate student of chair «Computer facilities and engineering cybernetics», FSBEI USPTU

e - mail: sima-beta@mail.ru

Загиров Т.М., оператор т/у, ОАО АНК Башнефть «Башнефть-УНИТЗ».

T.M. Zagirov, operator of technical installations, JSC «Bashneft».

Еникеев Ф.У. д. т. н., профессор, заведующий кафедрой вычислительной техники и инженерной кибернетики ФГБОУ ВПО УГНТУ

F.U. Enikeev, dr. sci. tech., professor, head of Department of Computer Science and Engineering Cybernetics FSBEI USPTU.

E-mail: kobros@narod.ru