

УДК 621.4

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОЛЬЦЕВОЙ ЗАГОТОВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛАСТИЧНОЙ СРЕДЫ

© 2016 И.П. Попов, А.В. Демьяненко, А.Ю. Аброян, Д.А. Жестков

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 30.05.2016

Предложен способ, основанный на процессе отбортовки, с применением эластичной среды, для достижения минимальной разнотолщинности детали.

Ключевые слова: способ; отбортовка; толщина; тонкостенная; деформация; деталь; эластичная среда.

Потребность в улучшении технологий приводит к необходимости разработки новых и усовершенствованию существующих способов формообразования [1, 2, 3], поэтому актуальным и важным, как в теоретическом, так и в практическом отношении, является повышение уровня и результативности проводимых исследований. Широкое распространение тонкостенных осесимметричных деталей обусловлено постоянно нарастающим интересом к отечественному промышленному производству в авиастроении. Сложность производства сопряжена с большими трудозатратами и отладкой технологий изготовления, что оказывает существенное влияние на конечную стоимость продукции.

Представленная схема дает возможность получить коническую деталь с толщиной близкой к равномерной, т.е. к постоянному значению. Механизм этого процесса состоит в том, что на поверхности заготовки между эластичными элементами возникают силы трения, которые создают дополнительные растягивающие напряжения на периферийных участках очага деформации, утоняющих эти участки в момент касания заготовки конусной части матрицы. При этом возникающие силы трения на заготовке, уже отформованной и лежащей на конической поверхности матрицы, в дальнейшем не деформируются из-за реактивных сил трения и изгиба.

Чтобы значения толщины  $S_T$  имели постоянное значение необходимо выполнить условие минимизации:

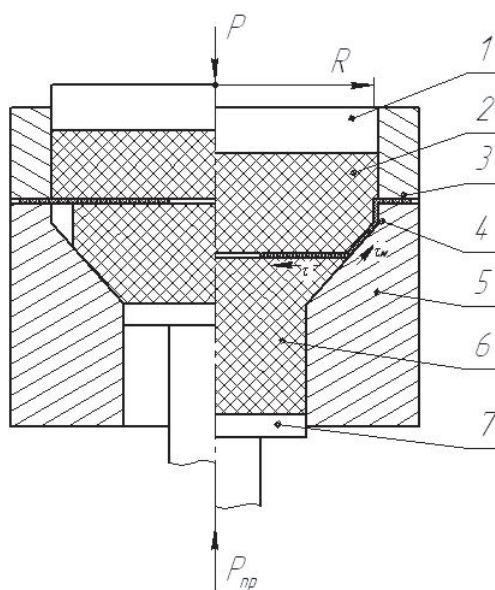


Рис. 1. Схема формообразования:  
1 – плоский пуансон; 2 – эластичный пуансон;  
3 – контейнер; 4 – заготовка; 5 – матрица;  
6 – эластичный подпор; 7 – толкатель

$$\int_{\rho_{сп}}^{\rho_k} (S_{дет} - S_T)^2 d\rho \rightarrow \min ,$$

где  $S_{дет}$  – заданная толщина детали;  
 $S_T$  – технологически возможная толщина, которая получается после формообразования заготовки.

Пределы интегрирования обусловлены тем, что утонение заготовки, максимальное, имеет место при  $\rho = \rho_k$ , т.е. когда заготовка прилегла к матрице, так как деформация на матрице блокируется силами трения от действия касательных напряжений между заготовкой и матрицей –  $\tau_m$ . Надо иметь ввиду, что наличие цилиндрического технологического участка высотой  $h$  с одной стороны при отбортовке уменьшает возможную высоту детали, но с другой позволяет получить более равномерную толщину с большей высо-

Попов Игорь Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры обработки металлов давлением.

E-mail: igr\_porov@mail.ru

Демьяненко Артём Владимирович, студент кафедры физики МГУ им. М.В. Ломоносова. E-mail: e-det@mail.ru

Аброян Артем Юрьевич, специалист АО “Металлист-Самара”. E-mail: abroyanarty@gmail.com

Жестков Дмитрий Андреевич, бакалавр.

E-mail: nissan010evx@gmail.com

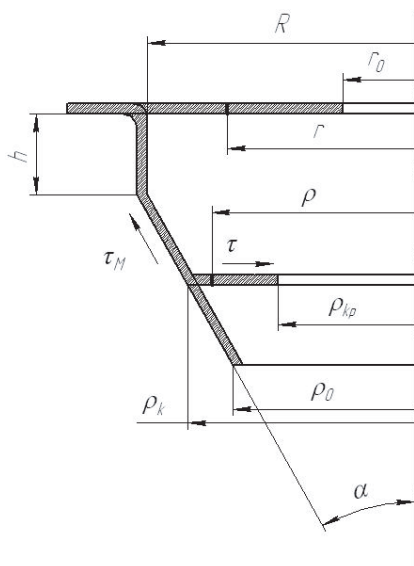


Рис. 2. Геометрическая схема:

$\rho_{kp}$  – радиус кромки детали;  $\rho_k$  – радиус контакта заготовки с матрицей детали;  $\rho$  – текущий радиус элементарного участка;  $r_0$  – радиус отверстия;  $h$  – высота цилиндрического участка;  $\rho_0$  – конечный меньший радиус детали

той детали. Найдем минимальное значение  $h$ , при котором высота конической детали в случае утонения равномерного и равного толщине утонения кромки, равно высоте конической детали при традиционном процессе отбортовки, когда толщина детали не постоянна. Анализ показывает, что толщина полученной детали после отбортовки меняется по закону близкому к линейному. Запишем уравнение связи для трансверсально-изотропного тела [4, 5]:

$$\varepsilon_S = \frac{1}{2} \frac{\sigma_\rho / \sigma_\theta + 1}{\mu \sigma_\rho / \sigma_\theta - 1} \varepsilon_\theta, \quad (1)$$

где  $\mu$  – коэффициент анизотропии трансверсально-изотропного тела;

$\sigma_\rho$  – напряжения в меридиональном направлении;

$\sigma_\theta$  – напряжения в тангенциальном направлении;

$\varepsilon_\theta$  – деформация в тангенциальном направлении.

Определим величину тангенциальной деформации элементов в момент касания с матрицей при радиусе  $\rho_{kp} = \rho$ :

$$\varepsilon_\theta = \ln \rho / \rho_k \approx 1 - r / \rho_k. \quad (2)$$

Установим связь между  $\rho_k$  и  $r$  из условия постоянства объема для конической детали при  $h = 0$ :

$$S_{заг} \pi (R^2 - r^2) = 2\pi \frac{(R^2 - \rho_k^2)}{2 \sin \alpha} S_{дет}. \quad (3)$$

Из (3) имеем:

$$\frac{r}{\rho_k} = \sqrt{\frac{\bar{R}^2 - \bar{S}_{дет} \bar{R}^2 - 1}{\sin \alpha}}, \quad (4)$$

где  $\bar{R} = \frac{R}{\rho_k}$ ,  $\bar{S}_{дет} = \frac{S_{дет}}{S_{заг}}$  – средняя толщина детали.

С учетом (4) тангенциальная деформация  $\varepsilon_\theta$  примет вид:

$$\varepsilon_\theta = 1 - \sqrt{\frac{\bar{R}^2 - \bar{S}_{дет}}{\sin \alpha} (\bar{R}^2 - 1)}, \quad (5)$$

Покажем, что в первом приближении при отбортовке тангенциальная деформация может быть задана при любом законе изменения толщины. Примем в первом случае толщину постоянной для детали, исходя из возможного максимального утонения кромки. На кромке выполняется условие [6]:

$$\varepsilon_S = -0,5 \varepsilon_\theta.$$

Приняв на кромке схему напряженного состояния линейной, будем считать  $\varepsilon_\theta \approx \delta_\rho \leq 0,36$  (для большинства металлов):

$$S_{кр} / S_{заг} = 1 - 0,5 \varepsilon_\theta = 0,82. \quad (6)$$

Во втором случае зададимся линейным законом изменения толщины при отбортовке:

$$\frac{\bar{S}_{дет}}{S_{заг}} = \frac{S_{кр} + S_{заг}}{2S_{заг}} = 0,91. \quad (7)$$

С учетом формулы (4) угол конусности детали не должен превышать:

$$\sin \alpha = \frac{\bar{R}^2 - 1}{\bar{S}_{дет} \bar{R}^2 - (1 - \delta_\rho)^2}. \quad (8)$$

Подставим значения (6, 7) в уравнение (8) и получим при изменении толщины по линейному закону  $\alpha \approx 25,5^\circ$ , при постоянной толщине

$\alpha \approx 23^\circ$ , при этом  $\frac{R}{\rho} = \frac{R}{r_{кр}} = 1,2$ ;  $\frac{r_{кр}}{r_0} = 1,49$ ;

$\frac{R}{r_0} = 1,79$ ;  $\delta_\rho = 0,36$ .

Определим соотношение напряжений. Выделим элемент в зоне отбортовки и расставим силы на бесконечно малом элементе на ось « $\hat{r}$ » с известными допущениями (см. рис. 4).

$$(\sigma_\rho + d\sigma_\rho)(f_1 + df_1) - \sigma_\rho f_1 - 2\sigma_\theta f_2 \sin \frac{d\theta}{2} - \tau \cdot f_3 = 0, \quad (9)$$

где  $\sigma_\theta$  – напряжения в тангенциальном направлении;

$\tau$  – касательные напряжения между заготовкой и эластичной средой.

Площади:

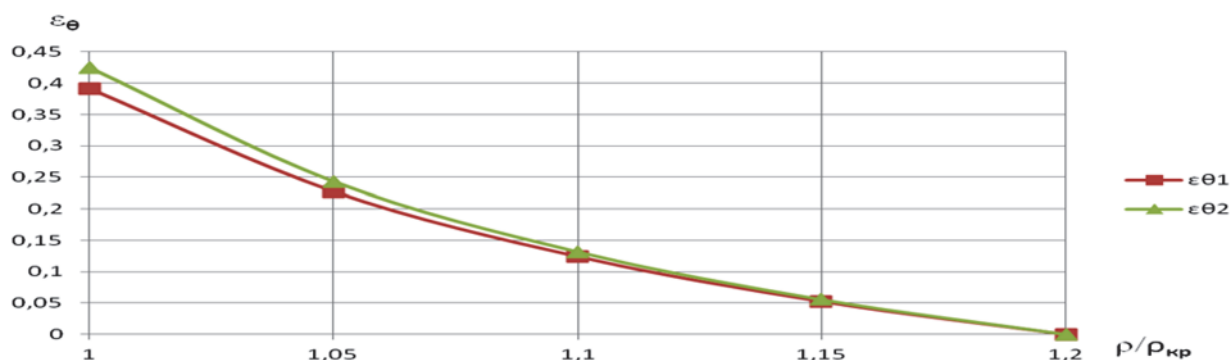


Рис. 3. Изменение деформации заготовки  $\varepsilon_{\theta}$  для разных законов изменения толщины заготовки. Погрешность в деформациях  $\varepsilon_{\theta 1}$  и  $\varepsilon_{\theta 2}$  составляет не более 8%.

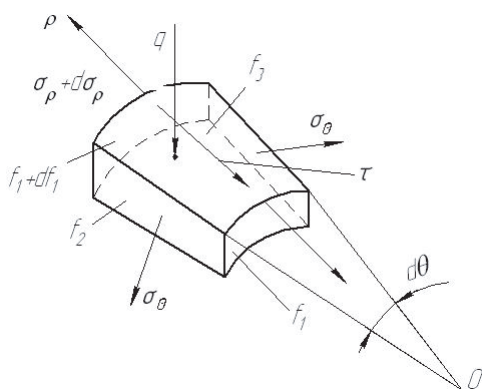


Рис. 4. Схема действия сил

$$f_1 = \rho \cdot d\theta \cdot S_T, \quad df_1 = d\rho \cdot d\theta \cdot S_T, \quad f_2 = d\rho \cdot S_T, \\ f_3 = \rho \cdot d\theta \cdot d\rho, \quad \tau = f \cdot q, \quad (10)$$

где  $f$  – коэффициент трения;  
 $q$  – давление.

Подставим (10) в (9):

$$\sigma_{\rho} d\rho + d\theta \cdot S_T + d\sigma_{\rho} \cdot \rho \cdot d\theta \cdot S_T - \\ - \sigma_{\theta} d\theta \cdot S_T \cdot d\rho - \frac{\tau \cdot \rho \cdot d\theta \cdot d\rho}{S_T} = 0, \\ \frac{d\sigma_{\rho}}{d\rho} + \frac{\sigma_{\rho}}{\rho} - \frac{\sigma_{\theta}}{\rho} - \frac{\tau}{S_T} = 0. \quad (11)$$

Для решения (11) примем условие пластичности [6]:

$$\sigma_{\theta} = \sigma_S, \quad (12)$$

где  $\sigma_S$  – предел текучести.

В результате решения уравнений (11) и (12) получим:

$$\sigma_{\rho} = \sigma_S + \frac{\tau \rho}{2S_T} - \sigma_S \frac{\rho_{кр}}{\rho} - \frac{\tau \rho_{кр}^2}{2S_T \rho} \quad \text{или} \\ \sigma_{\rho} = \sigma_S \left(1 - \frac{\rho_{кр}}{\rho}\right) + \frac{\tau \rho}{2S_T} \left(1 - \frac{\rho_{кр}^2}{\rho^2}\right). \quad (13)$$

Напряжения в зоне контакта определим при  $\rho = \rho_{кр}$ :

$$\sigma_{\rho \max} = \sigma_S \left(1 - \frac{\rho_{кр}}{\rho_{кр}}\right) + \frac{\tau \rho_{кр}}{2S_T} \left(1 - \frac{\rho_{кр}^2}{\rho_{кр}^2}\right). \quad (14)$$

На рис. 5 представлен график толщины, рассчитанной с учетом формулы (1),

$$\varepsilon_S = \frac{S_T - S_{заг}}{S_{заг}} :$$

$$\frac{S_T}{S_{заг}} = 1 + \frac{\frac{\sigma_{\rho}}{\sigma_{\theta}} + 1}{\mu \frac{\sigma_{\rho}}{\sigma_{\theta}} - 1} \cdot \varepsilon_{\theta}. \quad (15)$$

Здесь соотношение  $\sigma_{\rho} / \sigma_{\theta}$  найдем без учета упрочнения и изменения толщины. Для этого установим связь между соотношениями  $\rho_{кр} / \rho_{\kappa}$ . Из условия постоянства объема для верхней части заготовки:

$$\pi(R^2 - r^2)S_{заг} = \frac{\pi(R^2 - \rho_{\kappa}^2)}{\sin \alpha} S_{дем}, \quad (16)$$

отсюда получим:

$$r^2 = R^2 - \frac{(R^2 - \rho_{\kappa}^2)}{\sin \alpha} \bar{S}_{дем}. \quad (17)$$

Для нижней части заготовки имеем:

$$S_{заг} \pi(r^2 - r_0^2) = S_{дем} \pi(\rho_{\kappa}^2 - \rho_{кр}^2). \quad (18)$$

Находим:

$$r^2 = r_0^2 + (\rho_{\kappa}^2 - \rho_{кр}^2) \bar{S}_{дем}. \quad (19)$$

Приравняв правые части (15) и (17), выразим:

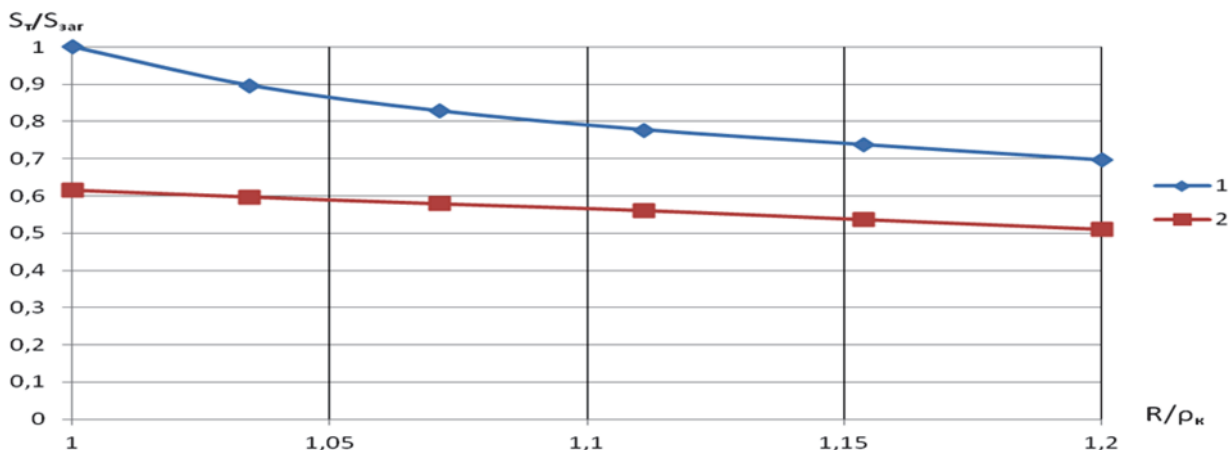
$$\rho_{кр} = \sqrt{\frac{(R^2 - \rho_{\kappa}^2)}{\sin \alpha} + \rho_{\kappa}^2 - \frac{(R^2 - r_0^2)}{\bar{S}_{дем}}}. \quad (20)$$

При построении графика толщины соблюдаем следующую последовательность расчета. Задаем-

ся исходными данными:  $R, \sin \alpha, \bar{S}_{дем} = \sqrt{\frac{r_0}{\rho_0}}$ .

По формуле (16) при  $r = r_0, \rho_{\kappa} = \rho_0$  определяем:

$$r_0 = \sqrt{R^2 - \frac{(R^2 - \rho_0^2)}{\sin \alpha} \bar{S}_{дем}}. \quad (21)$$



**Рис. 5.** График изменения толщины конической части детали при отбортовке при  $R = 30$  мм;  $\alpha = 20^\circ$ ;  $S_{\text{дем}} = 0,3$  мм;  $\sigma_s = 5$  кг/мм<sup>2</sup>;  $\mu = 0,5$ ;  $h = 1,5$  мм;  $t = 0,008$ ; 1 – без цилиндрического участка; 2 – с цилиндрическим участком

Далее по формуле (20) рассчитывается:  $\rho_{кр}$ , где  $r_\theta \leq \rho_k \leq R$ .

При заданном  $\tau = f \cdot q$ , находим  $\sigma_{\rho \max}$  по формуле (14).

По формуле (5,15) определяем  $\varepsilon_\theta$  и  $S_T / S_{\text{заг}}$ .

Рассмотрим случай отбортовки с цилиндрическим участком на большем диаметре. По аналогии с предыдущим анализом получим:

$$\varepsilon_\theta = 1 - \frac{\sqrt{R^2 - \bar{S}_{\text{дем}} \frac{1}{\sin \alpha} (R^2 - \rho_k^2) - 2hR\bar{S}_{\text{дем}}}}{\rho_k}, \quad (22)$$

$$\sin \alpha = \bar{S}_{\text{дем}} \frac{R^2 - 1}{R^2 - 2hR\bar{S}_{\text{дем}} - (1 - \delta_p)^2}, \quad (23)$$

$$\bar{h} = \frac{1}{2R\bar{S}_{\text{дем}}} \left[ -\bar{S}_{\text{дем}} \frac{R^2 - 1}{\sin \alpha} - (1 - \delta_p)^2 + R^2 \right], \quad (24)$$

$$r_0 = \sqrt{R^2 - 2h \cdot R \cdot \bar{S}_{\text{дем}} - \frac{R^2 - \rho_0^2}{\sin \alpha} \bar{S}_{\text{дем}}}, \quad (25)$$

$$\rho_{кр} = \sqrt{\frac{R^2 - \rho_k^2}{\sin \alpha} + 2hR + \rho_k^2 - \frac{(R^2 - r_0^2)}{\bar{S}_{\text{дем}}}}. \quad (26)$$

Если цилиндрический поясок  $h$  считать технологическим припуском, то его величину определяем путем использования условия минимизации (1) по высоте цилиндрического пояска. Высота  $h$  обеспечивает получение детали с минимальной разнотолщинностью, близкой к постоянному значению.

$$\int_{\rho_0}^R \left[ \bar{S}_{\text{дем}} - \left( 1 + \frac{\sigma_\rho / \sigma_\theta + 1}{\sigma_\rho / \sigma_\theta - 2} \varepsilon_\theta \right)^2 \right] d\rho_k \rightarrow \min. \quad (27)$$

В выражении (27) составляющее в круглых скобках представляет технологически возможную толщину при отбортовке, которая меняется по

закону близкому к линейному. Представим:

$$\frac{S_T}{S_{\text{заг}}} = 1 + \frac{\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta} + 1}{\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta} - 2} \varepsilon_\theta = \varphi_0 + \varphi_1 h. \quad (28)$$

Правая часть записи - это разложение функции в ряд, где

$$\varphi_0 = 1 + \frac{\sigma_\rho + 1}{\sigma_\rho - 2} \varepsilon_\theta \text{ при } h = 0; \bar{S}_{\text{дем}} = 1.$$

$$\varphi_1 = \frac{\sigma_\rho + 1}{\sigma_\rho - 2} \varepsilon_\theta' \text{ при } h = 0,$$

$$\varepsilon_\theta' = \frac{R}{\sqrt{R^2 - \frac{(R^2 - \rho_k^2)}{\sin \alpha}}} \text{ при } h = 0; \bar{S}_{\text{дем}} = 1.$$

В выражении (28) соотношение напряжений примем постоянным, не зависящим от  $h$ .

Условие минимизации (27) примет вид:

$$\int_{\rho_0}^R \left[ \bar{S}_{\text{дем}} - \varphi_0 - \varphi_1 h \right]^2 d\rho_k \rightarrow \min. \quad (29)$$

Взяв производную по  $h$  и заменив интеграл конечной суммой, получим:

$$h = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{S}_{\text{дем}} \varphi_1) - \sum_{i=1}^n (\varphi_0 \varphi_1)_i}{\sum_{i=1}^n (\varphi_1^2)_i}. \quad (30)$$

На рис. 5 представлен график изменения толщины детали с цилиндрическим пояском  $h = 1,5$  мм, наличие которого приводит к снижению разнотолщинности детали. Для приведенных построений (см. рис. 5) высота  $h$  рассчитана в первом приближении. В нулевом приближении толщина детали равна толщине заготовки. Пред-

ложенная схема формообразования позволяет получить детали с меньшей разнотолщиной при большем утонении.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Снижение металлоемкости штампованных конических оболочек / В.Д. Маслов, И.П. Попов, А.И. Гостев // Вестник машиностроения. 1988. № 1. С. 48-50.
2. Studies on wrinkling and control method in rubber forming using aluminum sheet shrink flanging process / L. Chen, H. Chen, Q. Wang, Z. Li // Materials and Design, 2015. Vol. 65. P. 505-510.
3. Demyanenko E.G., Popov I.P. Directional thickness alteration of a thin-walled ring blank using flanging and forming for the purpose of receiving conical part // Key Engineering Material Vol. 684 (2016). P. 253-262.
4. Арышенский Ю.М. Гречников Ф.В. Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов. М.: Металлургия, 1990. 304 с.
5. Гречников Ф.В. Деформирование анизотропных материалов. М.: Машиностроение, 1998. 448 с.
6. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1971. 424 с.

#### RESEARCH OF THIN-WALLED AXISYMMETRIC PARTS FORMING FROM RING BLANKS USING RUBBER

© 2016 I.P. Popov, A.V. Demyanenko, A.Y. Abroyan, D.A. Zhestkov

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

It is suggested new method, which is based on flanging process with application of rubber and provides minimal variation in thickness.

*Keywords:* method, flanging, thickness, thin-walled, deformation, part, rubber.

---

Igor Popov, Doctor of Technics, Professor at the Metal Forming Processes Department. E-mail: igr\_popov@mail.ru  
Artem Demyanenko, Student at the Physics Department of Lomonosov Moscow State University. E-dem@mail.ru  
Artem Abroyan, Expert of JSC «Metallist-Samara». E-mail: abroyanarty@gmail.com  
Dmitry Zhestkov, bachelor. E-mail: nissan010evx@gmail.com