



УДК 539.3.6 + 69.002.5

Б.М. Абдеев, Г.А. Гурьянов

ВКГТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск

**ВДАВЛИВАНИЕ НЕПОДВИЖНОГО СФЕРИЧЕСКОГО ШТАМПА В УПРУГОДЕФОРМИРУЕМОЕ
ДВУСЛОЙНОЕ ПРОСТРАНСТВО С ЖЁСТКИМ ОСНОВАНИЕМ**

Взаимодействие штампа, в виде абсолютно твёрдого тела, с деформируемой поверхностью представляет собой актуальную контактную задачу прикладной механики [1, 5], имеющую достаточно широкое применение при теоретическом описании и оценке напряжённо-деформированного состояния таких процессов, как, например, обработка металлов и некоторых других материалов давлением (на молотах, прессах, кузнечно-штамповочных машинах).

В основу рассматриваемой математической модели положим фундаментальную осесимметричную задачу Буссинеска [1-5] о статическом действии сосредоточенной силы P на плоскость, ограничивающую полубесконечное упругое тело (рис. 1,*a*), и её модификацию для двуслойного пространства, имеющего недеформируемую границу на глубине $z=h=h_1+h_2$ (рис. 1,*b*).

К схематизации среды, согласно рис. 1,*b*, принимаем следующие допущения, используемые в механике твёрдого деформируемого тела [2, 5]:

- материалы пространства $0 \leq r \leq \infty$, $0 \leq z \leq h$ – однородные, сплошные, изотропные;
- обеспечена жёсткая связь, то есть совершенный контакт между верхним и вторым слоями, а также на граничной плоскости $z = h = h_1 + h_2$.

Для базовой механико-математической модели (рис. 1,*b*) вводим функцию напряжений [4, 5]:

$$\varphi_i = \varphi_i(r, z) = c_{1i} z \ln r + c_{2i} (r^2 + z^2)^{\frac{1}{2}} + c_{3i} z \ln\left(\frac{\sqrt{r^2 + z^2} - z}{\sqrt{r^2 + z^2} + z}\right); \quad 0 \leq r \leq \infty; \quad 0 \leq z \leq \infty, \quad (1)$$

где $i = 1, 2$ – номера слоёв материала; c_{1i} , c_{2i} , c_{3i} – произвольные константы.

Аппроксимирующая зависимость (1) является точным решением основного уравнения [4]:

$$\nabla^2 (\nabla^2 \varphi_i) = 0 \quad (2)$$

осесимметричной пространственной задачи, проиллюстрированной схемой (рис. 1,*b*), при условии, что все компоненты внутренних сил, включающие нормальные $\sigma_{ri} = \sigma_{ri}(r, z)$, $\sigma_{zi} = \sigma_{zi}(r, z)$, $\sigma_{\theta i} = \sigma_{\theta i}(r, z)$ и касательные $\tau_i = \tau_i(r, z)$ напряжения (рис. 1,*a*; 1,*b*) связаны с φ_i дифференциальными соотношениями вида [4, 5]:

$$\tau_i = \frac{\partial}{\partial r} \left[(1 - \mu_i) \nabla^2 \varphi_i - \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial z^2} \right]; \quad (3)$$

$$\sigma_{zi} = \frac{\partial}{\partial z} \left[(2 - \mu_i) \nabla^2 \varphi_i - \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial r^2} \right]; \quad (4)$$

$$\sigma_{ri} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_i \nabla^2 \varphi_i - \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial r^2} \right); \quad (5)$$

$$\sigma_{\theta i} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_i \nabla^2 \varphi_i - \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \varphi_i}{\partial r} \right), \quad (6)$$

где μ_1, μ_2 – коэффициенты Пуассона материалов слоёв, имеющих соответствующие модули упругости E_1, E_2 ; ∇^2 – оператор Лапласа в цилиндрических координатах r, z с учётом симметричного характера моделируемого процесса:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (7)$$

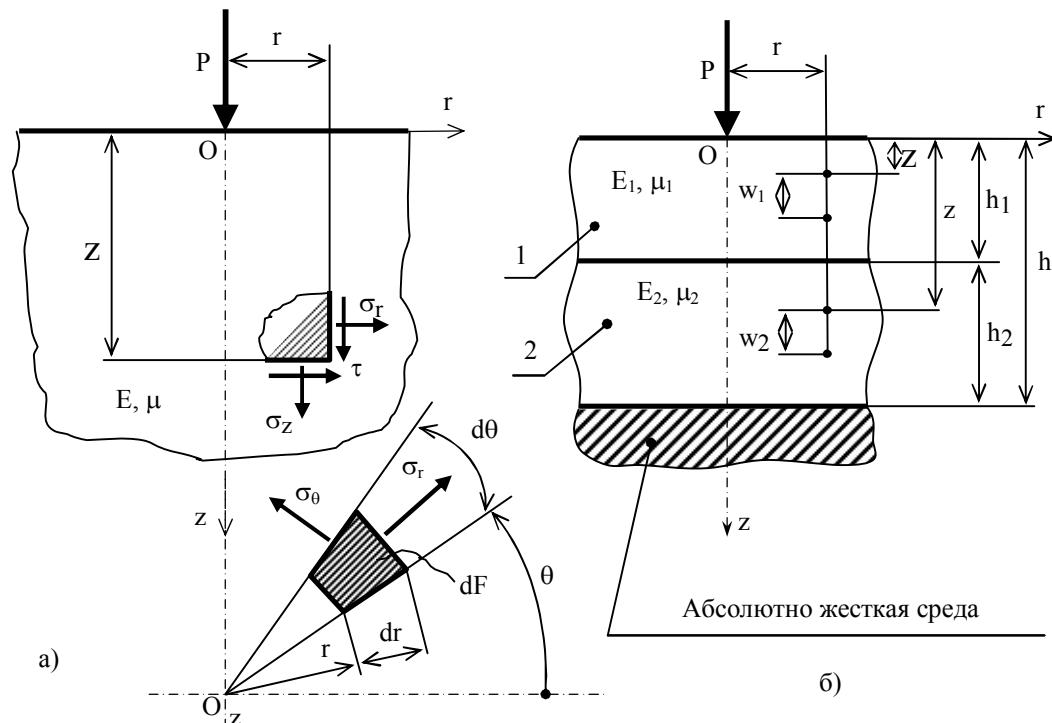


Рисунок 1 – Базовые расчётные схемы: а) классическая модель бесконечного полупространства Буссинеска [1]; б) двуслойное пространство конечной толщины h

Подставляя выражение (1) в формулу (3), получаем с помощью [10], опуская промежуточные преобразования

$$\tau_i = -c_{2i}[(1-2\mu_i)r(r^2+z^2)^{-\frac{3}{2}} + 3rz^2(r^2+z^2)^{-\frac{5}{2}}] + c_{3i}[6rz^2(r^2+z^2)^{-\frac{5}{2}} - 4\mu_i r(r^2+z^2)^{-\frac{3}{2}}]. \quad (8)$$

На поверхности тела при $z = 0$, $i = 1$ должно быть

$$\tau_1 = \tau_1(r, 0) = 0, \quad (9)$$

поэтому из соотношения (8) получаем алгебраическое уравнение

$$c_{21}(1-2\mu_1)\frac{1}{r^2} - c_{31}4\mu_1\frac{1}{r^2} = 0, \quad (10)$$

Откуда

$$c_{31} = -\frac{1-2\mu_1}{4\mu_1}c_{21}. \quad (11)$$

Далее, по аналогии с τ_i , находим напряжение σ_{zi} , воспользовавшись зависимостью (4):

$$\sigma_{zi} = -c_{2i}[(1-2\mu_i)z(r^2+z^2)^{-\frac{3}{2}} - 3z^3(r^2+z^2)^{-\frac{5}{2}}] + c_{3i}[6z^3(r^2+z^2)^{-\frac{5}{2}} - 4\mu_i z(r^2+z^2)^{-\frac{3}{2}}]. \quad (12)$$

В соответствии с моделью (рис. 1,б) должно быть

$$\sigma_{z1} = \sigma_{z1}(r,0) = 0, \quad (13)$$

и это статическое граничное условие на плоскости $z = 0$ выполняется тождественно.

Принимая во внимание конструктивную двуслойность пространства, обобщаем равенство (11) на оба слоя, то есть

$$c_{3i} = -\frac{1-2\mu_i}{4\mu_i} c_{2i}, \quad (14)$$

что является обоснованным с физико-механической точки зрения, так как в частном случае $h_i = 0$, функции $\tau_2 = \tau_2(r, z)$ и $\sigma_{z2} = \sigma_{z2}(r, z)$ должны удовлетворять однородным краевым соотношениям, подобным (9) и (13), а именно:

$$\tau_2(r,0) = \sigma_{z2}(r,0) = 0. \quad (15)$$

На основании (14) исключаем коэффициент c_{3i} из функциональной зависимости (12). В результате будем иметь

$$\sigma_{zi} = -\frac{3c_{2i}}{2\mu_i} z^3(r^2+z^2)^{-\frac{5}{2}}. \quad (16)$$

В любом горизонтальном сечении $z = \text{const}$ равнодействующая вертикальных усилий σ_{zi} должна быть статически эквивалентна внешней силе P [3], а так как элементарная площадка (рис. 1,а)

$$dF = rd\theta \cdot dr, \quad (17)$$

то

$$\int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\infty} \sigma_{zi} r dr = -P, \quad (18)$$

откуда следует [6]

$$\frac{3\pi}{\mu_i} c_{2i} z^3 - \frac{1}{3} (r^2 + z^2)^{-\frac{3}{2}} \Big|_0^{\infty} = -\frac{3\pi}{\mu_i} c_{2i} z^3 \left(\frac{1}{3z^3} \right) = -\frac{\pi}{\mu_i} c_{2i} = -P, \quad (19)$$

или

$$c_{2i} = \frac{\mu_i P}{\pi}. \quad (20)$$

При найденном значении c_{2i} определяем постоянную c_{3i} после подстановки (20) в (14):

$$c_{3i} = -\frac{(1-2\mu_i)P}{4\pi}. \quad (21)$$

Дальнейшие выкладки повторяют известный вывод формул для c_{li} , σ_{ri} , $\sigma_{\theta i}$ из условий [4]:

$$\sigma_{ri}(r, \infty) = \sigma_{\theta i}(r, \infty) = 0, \quad (22)$$

после замены в [4] буквенного обозначения параметра μ на μ_i . Итогом этой процедуры, учитывая (21), являются следующие зависимости:

$$c_{li} = -2c_{3i} = \frac{(1-2\mu_i)P}{2\pi}; \quad (23)$$

$$\sigma_{ri} = \frac{P}{2\pi} \left\{ (1-2\mu_i) \left[\frac{1}{r^2} - \frac{z}{r^2} (r^2 + z^2)^{-\frac{1}{2}} \right] - 3r^2 z (r^2 + z^2)^{-\frac{5}{2}} \right\}; \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta i} &= \frac{P}{2\pi} (1-2\mu_i) \left[-\frac{1}{r^2} + \frac{z}{r^2} (r^2 + z^2)^{-\frac{1}{2}} + z (r^2 + z^2)^{-\frac{3}{2}} \right], \\ &\quad (0 \leq r \leq \infty, \quad 0 \leq z \leq \infty). \end{aligned} \quad (25)$$

И наконец, подстановка констант c_{2i} , c_{3i} , определяемых равенствами (20) - (21), в общие выражения (8) и (12), приводит их к функциональным соотношениям для напряжений σ_{zi} , τ_i :

$$\sigma_{zi} = \sigma_{z1} = \sigma_{z2} = \sigma_z = -\frac{3P}{2\pi} z^3 (r^2 + z^2)^{-\frac{5}{2}}; \quad (26)$$

$$\tau_i = \tau_1 = \tau_2 = \tau = -\frac{3P}{2\pi} r z^2 (r^2 + z^2)^{-\frac{5}{2}}, \quad (27)$$

которые, как и в однослоиной (бесконечной) модели полупространства (рис. 1,*a*), не зависят от упругих постоянных μ и E и стремятся к нулю при $r = z = \infty$ [1-5].

Продолжая решение поставленной задачи, находим осевые перемещения $w_1 = w_1(r, z)$ и $w_2 = w_2(r, z)$ в упругодеформируемом пространстве (рис. 1,*b*) от сосредоточенной в точке $r = z = 0$ силы P , воспользовавшись [2-4]:

– формулой обобщённого закона Гука для линейного деформационного параметра ε_{zi} :

$$\varepsilon_{zi} = \frac{1}{E_i} [\sigma_z - \mu_i (\sigma_{ri} + \sigma_{\theta i})]; \quad (28)$$

– дифференциальной зависимостью Коши

$$\varepsilon_{zi} = \frac{\partial w_i}{\partial z}. \quad (29)$$

Интегрируем равенство (29) по переменной z с учётом выражений (24)-(26), (28) и таблиц [6]:

$$w_i = \frac{(1+\mu_i)P}{2\pi E_i} \left[z^2 (r^2 + z^2)^{-\frac{3}{2}} + 2(1-\mu_i) (r^2 + z^2)^{-\frac{1}{2}} \right] + \Phi_i(r); \quad (30)$$

где $\Phi_1(r)$, $\Phi_2(r)$ – функциональные зависимости, включающие пока неизвестные коэффициенты K_1 и K_2 :

$$\Phi_1(r) = K_1 \frac{P}{r}; \quad \Phi_2(r) = K_2 \frac{P}{r}; \quad 0 \leq r \leq \infty. \quad (31)$$

Имея решение (30), (31) для сосредоточенной силы P (рис. 1,*b*), представим себе, что на упругом пространстве конечной толщины h и бесконечном по координате r находится абсолютно жёсткий шар радиусом R (рис. 2). При отсутствии внешнего давления ($P=0$) на это шарообразное тело и исключении влияния собственного веса, касание шара с граничной плоскостью $z = 0$ происходит в точке $r = z = 0$. На малом, по сравнению с R , расстоянии

$$r \ll R \quad (32)$$

зазор или просвет $w_{np} = w_{np}(r)$ можно, как известно, с достаточным приближением аппроксимировать формулой [2, 3, 5, 7, 8]

$$w_{np} = \frac{r^2}{2R}. \quad (33)$$

Если к центру шара приложить нагрузку $P \perp r$, то, вследствие упругости слоёв, граница

$z = 0$ материала основания изогнётся и примет форму поверхности шарового сегмента, образующая которой приближенно описывается параболической зависимостью, учитывая (32), (33) [3, 7, 8] (рис. 3):

$$w_1 = w_1(r, 0) = w_0 - \frac{r^2}{2R}; \quad 0 \leq r \leq \alpha, \quad (34)$$

где w_0 – опускание шара или наибольший прогиб полупространства в центре касания; α – радиус площадки контакта.

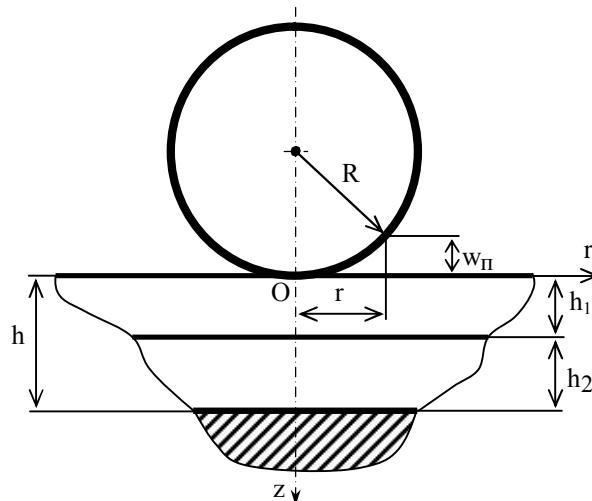


Рисунок 2 – Естественное (недеформированное) состояние системы «Жёсткий сферический штамп – упругое пространство» при $P = 0$

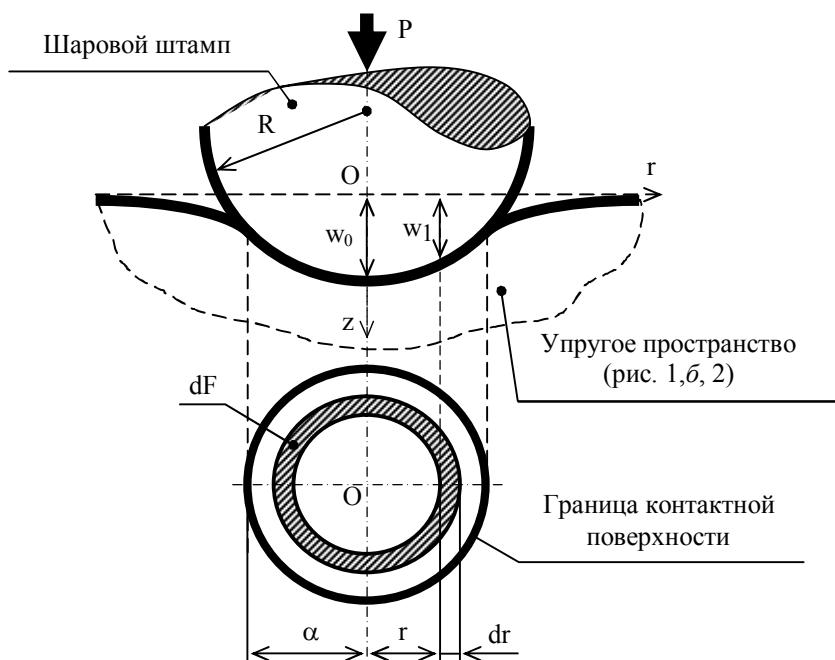


Рисунок 3 – Расчёчная модель для определения функции упругоизогнутой поверхности материала пространства

При последующем физико-математическом моделировании процесса контактирования двух тел, изображённых на рис. 3, используем в дополнение к допущению (32) следующие гипотезы [3, 7, 8]:

- контактное давление $q=q(r) \perp r$, а силы трения равны нулю;
- статическая нагрузка P , приложенная к штампу, создаёт в зоне контакта только упругие деформации, подчиняющиеся закону Гука;
- функция $q(r)$ выражается эллиптической зависимостью Герца-Штаермана [7, 9]:

$$q = q(r) = q_0 \sqrt{1 - \left(\frac{r}{\alpha}\right)^2}, \quad 0 \leq r \leq \alpha \quad (35)$$

с экстремумом

$$q_0 = \frac{3P}{2\pi\alpha^2} \quad (36)$$

в центре $r=0$ круговой площадки, а формула (35) точно описывает распределение силы P при вдавливании шарового или параболического тела в бесконечное ($0 \leq r \leq \infty$, $0 \leq z \leq \infty$) полупространство (рис. 4).

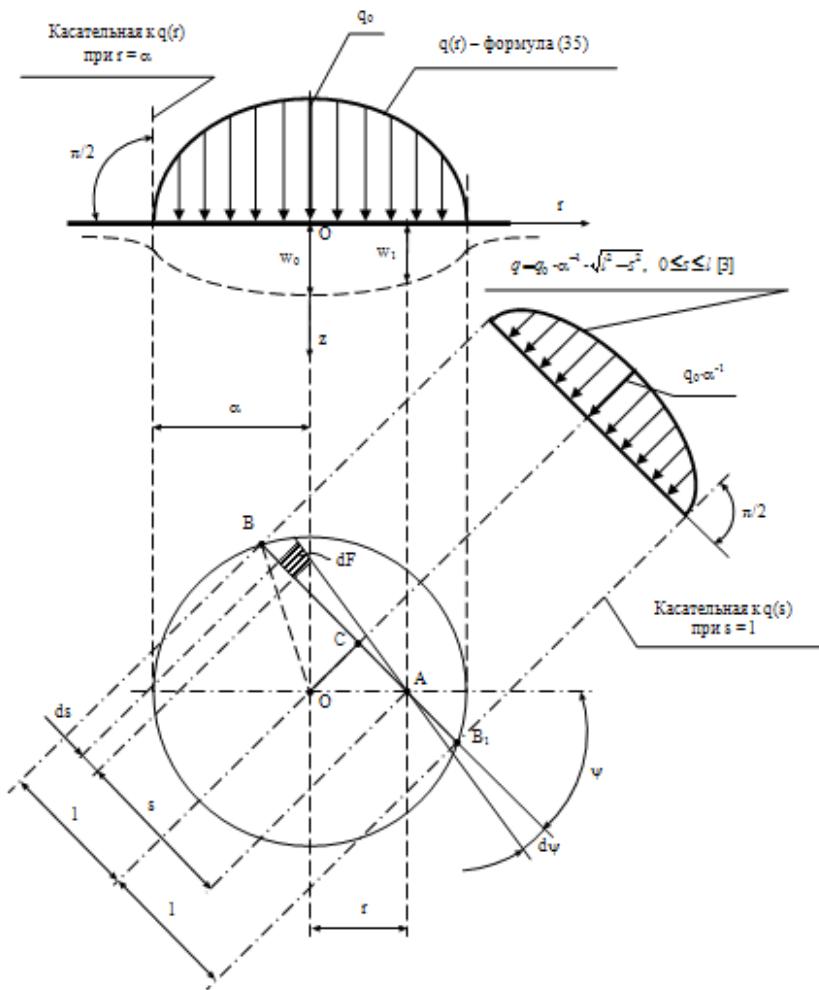


Рисунок 4 – Схема к решению интегрального уравнения (57), определяющего перемещение $w_0 = \max$ и радиус α

Применяя принцип суперпозиции, находим перемещения $w_{z1} = w_{z1}(0, z)$ и $w_{z2} = w_{z2}(0, z)$ произвольных точек, принадлежащих оси z в замкнутых интервалах, соответственно, $0 \leq z \leq h_1$ и $h_1 \leq z \leq h = h_1 + h_2$ (рис. 1, б; 2), воспользовавшись формулами (30), (31), (35), справочной информацией [6, 10] и заменив силу P , согласно рис. 3, на бесконечно малую величину [2, 3]:

$$dP = q dF = 2\pi r dr q = \frac{2\pi q_0}{\alpha} \sqrt{\alpha^2 - r^2} r dr, \quad (37)$$

действующую по элементарной площади $dF = 2\pi r dr$, а так же вводя новую переменную [11]

$$\alpha^2 - r^2 = t^2, \Rightarrow r^2 = \alpha^2 - t^2, \quad r dr = -t dt \quad (38)$$

при условии, что в процессе интегрирования по аргументу r

$$\alpha^2 + z^2 = \text{const}. \quad (39)$$

Опуская несложные промежуточные преобразования и учитывая (30), (31), (35), (37), в итоге получаем:

$$w_{z1} = q_0 \alpha \left\{ \frac{(1+\mu_1)}{E_1} \left[(1-\mu_1) \arcsin \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + z^2}} + \mu_1 \frac{z}{\alpha} \left(1 - \frac{z}{\alpha} \arcsin \frac{\alpha}{z\sqrt{\alpha^2 z^{-2} + 1}} \right) \right] + K_1 \frac{\pi^2}{2} \right\}; \quad (40)$$

$$w_{z2} = q_0 \alpha \left\{ \frac{(1+\mu_2)}{E_2} \left[(1-\mu_2) \arcsin \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + z^2}} + \mu_2 \frac{z}{\alpha} \left(1 - \frac{z}{\alpha} \arcsin \frac{\alpha}{z\sqrt{\alpha^2 z^{-2} + 1}} \right) \right] + K_2 \frac{\pi^2}{2} \right\}. \quad (41)$$

Параметры K_1 и K_2 определяются из двух кинематических граничных условий (рис. 1, б и 2):

– при $z = h_1$

$$w_{z1}(h_1) = w_{z2}(h_1); \quad (42)$$

– при $z = h_1 + h_2 = h$

$$w_{z2}(h) = 0. \quad (43)$$

Раскрывая равенства (42), (43) с помощью аналитических выражений (40), (41), будем иметь:

$$\begin{aligned} K_1 = & \frac{2(1+\mu_2)}{\pi^2 E_2} \left\{ (1-\mu_2) \arcsin \frac{\alpha(1-h_1 h^{-1})}{\sqrt{(\alpha^2 + h_1^2)(\alpha^2 h^{-2} + 1)}} + \frac{\mu_2}{\alpha} \left[h_1 \left(1 - \frac{h_1}{\alpha} \arcsin \frac{\alpha}{h_1 \sqrt{(\alpha^2 h_1^{-2} + 1)}} \right) - \right. \right. \\ & \left. \left. - h \left(1 - \frac{h}{\alpha} \arcsin \frac{\alpha}{h \sqrt{(\alpha^2 h^{-2} + 1)}} \right) \right] \right\} - \frac{2(1+\mu_1)}{\pi^2 E_1} \left[(1-\mu_1) \arcsin \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + h_1^2}} + \right. \\ & \left. + \mu_1 \frac{h_1}{\alpha} \left(1 - \frac{h_1}{\alpha} \arcsin \frac{\alpha}{h_1 \sqrt{\alpha^2 h_1^{-2} + 1}} \right) \right]; \quad h \geq h_1; \end{aligned} \quad (44)$$

$$K_2 = -\frac{2(1+\mu_2)}{\pi^2 E_2} \left[(1-\mu_2) \arcsin \frac{\alpha}{\sqrt{(\alpha^2 + h^2)}} + \mu_2 \frac{h}{\alpha} \left(1 - \frac{h}{\alpha} \arcsin \frac{\alpha}{h \sqrt{(\alpha^2 h^{-2} + 1)}} \right) \right]. \quad (45)$$

В частном случае однослоиной сплошной среды, когда $h_2 = 0$, то есть $h = h_1$, а $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ и $E_1 = E_2 = E$ (рис. 1, 2), из общих выражений (44), (45) следует:

$$K_1 = K_2 = -\frac{2(1+\mu)}{\pi^2 E} \left[(1-\mu) \arcsin \frac{\alpha}{\sqrt{(\alpha^2 + h_1^2)}} + \mu \frac{h_1}{\alpha} \left(1 - \frac{h_1}{\alpha} \arcsin \frac{\alpha}{h_1 \sqrt{(\alpha^2 h_1^{-2} + 1)}} \right) \right], \quad (46)$$

что полностью согласуется с краевыми соотношениями (42), (43), так как при этом, на основании формул (40), (41):

$$w_{z1}(h) = w_{z2}(h) = 0. \quad (47)$$

Для исследования упругих перемещений и напряжённого состояния материала в месте контакта (рис. 1, б и 3) предварительно определяем деформацию граничной поверхности пространства от воздействия нормального давления $q = q(r)$, распределенного по некоторой части плоскости $z = 0$ в пределах круга $0 \leq r \leq \alpha$ радиусом α (рис. 3, 4). Полагая в формулах (30), (31) $z = 0$ и $i = 1$, получаем функцию перемещения $w_i = w_i(r, 0)$ точек плоской поверхности при действии сосредоточенной силы P :

$$w_i = \left[\frac{(1-\mu_1^2)}{\pi E_1} + K_1 \right] \frac{P}{r}. \quad (48)$$

Согласно принципу суперпозиции, в применении к аналитическому выражению (48), имеем интегральную зависимость [2, 3]:

$$w_l = w_l(r, 0) = \left[\frac{(1 - \mu_1^2)}{\pi E_1} + K_1 \right] \int_F \frac{q dF}{s}, \quad (49)$$

где s – расстояние от произвольной точки A , в которой ищется перемещение w_l , до места приложения элементарной силы $q dF$ (рис. 4); dF – бесконечно малая площадка

$$dF = s \cdot d\psi \cdot ds \quad (50)$$

с отсчётом полярного угла ψ от горизонтальной оси.

Обозначим длину хорды BB_1 через $2l$ и запишем выражение (49), с учетом (50), в виде двойного интеграла по переменным s, ψ при изменении аргумента ψ от 0 до π [3]:

$$w_l = \left[\frac{(1 - \mu_1^2)}{\pi E_1} + K_1 \right] \int_0^\pi d\psi \int_{-l}^l q ds \quad (51)$$

или с использованием обозначений (рис. 4) и справочных данных [6]:

$$\begin{aligned} w_l &= \left[\frac{(1 - \mu_1^2)}{\pi E_1} + K_1 \right] \frac{q_0}{\alpha} \int_0^\pi d\psi \int_{-l}^l \sqrt{l^2 - s^2} ds = \\ &= \left[\frac{(1 - \mu_1^2)}{\pi E_1} + K_1 \right] \frac{q_0}{\alpha} \int_0^\pi d\psi \left(\frac{s \sqrt{l^2 - s^2}}{2} + \frac{l^2}{2} \arcsin \frac{s}{l} \right) \Big|_{-l}^l = \frac{\pi}{2} \left[\frac{(1 - \mu_1^2)}{\pi E_1} + K_1 \right] \frac{q_0}{\alpha} \int_0^\pi l^2 d\psi. \end{aligned} \quad (52)$$

Из геометрических соображений (рис. 4)

$$l^2 = OB^2 - OC^2 = \alpha^2 - r^2 \sin^2 \psi. \quad (53)$$

Тогда на основании (52) и [6]

$$\begin{aligned} w_l &= \frac{\pi}{2} \left[\frac{(1 - \mu_1^2)}{\pi E_1} + K_1 \right] \frac{q_0}{\alpha} \int_0^\pi (\alpha^2 - r^2 \sin^2 \psi) d\psi = \\ &= \frac{\pi}{2} \left[\frac{(1 - \mu_1^2)}{\pi E_1} + K_1 \right] \frac{q_0}{\alpha} \left[\alpha^2 \pi - r^2 \left(\frac{\psi}{2} - \frac{\sin 2\psi}{4} \right) \right]_0^\pi = \\ &= \underline{\frac{\pi^2 q_0 \alpha}{2} \left[\frac{(1 - \mu_1^2)}{\pi E_1} + K_1 \right]} - \underline{\frac{\pi^2 q_0}{4\alpha} \left[\frac{(1 - \mu_1^2)}{\pi E_1} + K_1 \right] r^2}. \end{aligned} \quad (54)$$

Учитывая (36) и сравнивая правые части выражений (34), (54) в подчёркнутых слагаемых (54), заключаем, что искомое максимальное значение w_0 функции $w_l(r, 0)$ будет равно:

$$w_0 = \frac{\pi^2}{2} \left[\frac{(1 - \mu_1^2)}{\pi E_1} + K_1 \right] q_0 \alpha = \frac{3\pi P}{4\alpha} \left[\frac{(1 - \mu_1^2)}{\pi E_1} + K_1 \right], \quad (55)$$

а для определения радиуса α контактной поверхности (рис. 3, 4) будем иметь трансцендентное уравнение

$$\alpha^3 = \frac{3\pi PR}{4} \left[\frac{(1 - \mu_1^2)}{\pi E_1} + K_1(\alpha) \right], \quad (56)$$

которое решается методом подбора.

Результат (55) получается и из ранее выведенного функционального соотношения (40)

для $w_{z1}=w_{z1}(z)$, если принять $z=0$.

Естественно, что найденные зависимости (55), (56), при выполнении условий (34), (49)-(51), адекватны точному решению обратным методом интегрального уравнения [2, 3, 7]

$$\left[\frac{(1-\mu_1^2)}{\pi E_1} + K_1 \right] \int_F \frac{qdF}{s} = w_0 - \frac{r^2}{2R} \quad (57)$$

относительно функции $q(r)$, представляемой формулами (35), (36).

Следует также отметить убывающий характер функциональных составляющих в квадратных скобках соотношений (40), (41) для перемещений w_{z1} , w_{z2} , соответствующей и идеализированной математической модели (рис. 1), описываемой формулой (30), вследствие того, что при $z \rightarrow \infty$ предел выражения $\frac{z}{\alpha} \arcsin \frac{\alpha}{z\sqrt{\alpha^2 z^{-2} + 1}}$ равен 1 [10], и, следова-

тельно, $w_{z1}(\infty)=w_{z2}(\infty)=0$, так как аналогичное свойство имеют и коэффициенты K_1 , K_2 , аппроксимируемые зависимостями (44)-(46), которые стремятся к нулю, когда материал становится однородным и бесконечным по глубине $z=h_1=h \rightarrow \infty$. Очевидно, что при таком упрощении мы будем иметь равенства $K_1=K_2=0$, $E_1=E_2=E$, $\mu_1=\mu_2=\mu$ и трансформацию формул (55), (56) в известное фундаментальное решение задачи о силовом контакте абсолютно твердой шаровой поверхности с упругодеформируемым полупространством [3, 5, 7, 8].

Практический интерес представляет собой модель упругой среды (рис. 1, б), у которой $E_2=\infty$, что соответствует контакту штампа с однослойным мягким основанием ($E_1 < E_2$), опирающимся на фактически недеформируемое полупространство. Подобное соотношение между модулями упругости возможно, к примеру, для полимерных (в частности резиновых) покрытий стальной поверхности. В случае подобного упрощенного варианта расчетной схемы решение задачи имеет следующие особенности, основанные на общих формулах (41), (42), (44), (45):

$$\begin{cases} K_1 = -\frac{2(1+\mu_1)}{\pi^2 E_1} \left[(1-\mu_1) \arcsin \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + h_1^2}} + \mu_1 \frac{h_1}{\alpha} \left(1 - \frac{h_1}{\alpha} \arcsin \frac{\alpha}{h_1 \sqrt{(\alpha^2 h_1^{-2} + 1)}} \right) \right]; \\ K_2 = 0; \quad w_{z2} = 0; \\ w_{z1} = q_0 \alpha \left\{ \frac{(1+\mu_1)}{E_1} \left[(1-\mu_1) \arcsin \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + z^2}} + \mu_1 \frac{z}{\alpha} \left(1 - \frac{z}{\alpha} \arcsin \frac{\alpha}{z \sqrt{\alpha^2 z^{-2} + 1}} \right) \right] + K_1 \frac{\pi^2}{2} \right\}. \end{cases} \quad (58)$$

Поскольку структура зависимостей (24)-(27) внутренних силовых факторов σ_{ri} , $\sigma_{\theta i}$, σ_z , τ совершенно идентична соответствующим классическим соотношениям однородного полупространства [2-5], то для количественной оценки напряжений рассматриваемой двуслойной системы (рис. 1, б; 2 и 3) в замкнутой области $0 \leq z \leq h$, $0 \leq r \leq \alpha$ контакта соприкасающихся тел, воспользуемся известным решением [3], дополненным индексом $i = 1; 2$:

$$\sigma_{ri} = q_0 \left\{ \frac{1-2\mu_i}{3} \cdot \frac{\alpha^2}{r^2} \left[1 - \left(\frac{z}{\sqrt{\lambda}} \right)^3 \right] + \frac{\alpha^2 z^2}{(\lambda^2 + \alpha^2 z^2)} \cdot \frac{z}{\sqrt{\lambda}} + \right. \\ \left. + \frac{z}{\sqrt{\lambda}} \left[(1-\mu_i) \frac{\lambda}{\alpha^2 + \lambda} + (1+\mu_i) \frac{\sqrt{\lambda}}{\alpha} \operatorname{arctg} \frac{\alpha}{\sqrt{\lambda}} - 2 \right] \right\}; \quad (59)$$

$$\sigma_{\theta i} = -q_0 \left\{ \frac{1-2\mu_i}{3} \cdot \frac{\alpha^2}{r^2} \left[1 - \left(\frac{z}{\sqrt{\lambda}} \right)^3 \right] + \right. \\ \left. + \frac{z}{\sqrt{\lambda}} \left[2\mu_i + \frac{(1+\mu_i)}{\alpha^2 + \lambda} \lambda + \frac{(1+\mu_i)}{\alpha} \sqrt{\lambda} \operatorname{arctg} \frac{\alpha}{\sqrt{\lambda}} \right] \right\}; \quad (60)$$

$$\sigma_z = -q_0 \frac{\alpha^2 z^2}{(\lambda^2 + \alpha^2 z^2)} \cdot \frac{z}{\sqrt{\lambda}}; \quad (61)$$

$$\tau = -q_0 \frac{\alpha^2 r z^2 \cdot \sqrt{\lambda}}{(\lambda^2 + \alpha^2 z^2)(\alpha^2 + \lambda)}, \quad (62)$$

где $\frac{z}{\sqrt{\lambda}} \geq 0$ - безразмерная переменная

$$\frac{z}{\sqrt{\lambda}} = \sqrt{1 - \frac{r^2}{\alpha^2 + \lambda}}, \quad (63)$$

определенная из нелинейного соотношения

$$\frac{r^2}{\alpha^2 + \lambda} + \frac{z^2}{\lambda} = 1, \quad (64)$$

представляющего собой квадратное уравнение относительно функционального параметра λ с наибольшим, в алгебраическом смысле, положительным корнем λ_m , вычисляемым следующим образом:

$$\begin{cases} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{cases} = \frac{1}{2} \left[-(\alpha^2 - z^2 - r^2) \pm \sqrt{(\alpha^2 - z^2 - r^2)^2 + 4z^2\alpha^2} \right]. \quad (65)$$

Применительно к выполнению расчетов на прочность, с использованием общих выражений (59)-(62), рассмотрим три наиболее важных случая определения экстремума λ_m по формуле (65), базируясь на схеме рис. 1,б и 3:

- для напряжений в точках, принадлежащих оси симметрии z , когда $r = 0$, а переменная z имеет диапазон изменения $0 \leq z \leq h$:

$$\lambda_m = \lambda_1 = z^2; \quad \lambda_2 = -\alpha^2; \quad (66)$$

- в пределах площадки контакта, где $r^2 \leq \alpha^2$ и $z = 0$:

$$\lambda_m = \lambda_1 = 0; \quad \lambda_2 = -(\alpha^2 - r^2); \quad (67)$$

- для замкнутой цилиндрической граничной поверхности $r = \alpha$, $0 \leq z \leq h$:

$$\lambda_m = \lambda_1 = \frac{z^2}{2} (1 + \sqrt{1 + 4\alpha^2 z^{-2}}). \quad (68)$$

Наиболее просто выглядят зависимости (59)-(62) в главных площадках внешнего слоя пространства (рис. 1,б), для которого $\lambda_m = 0$, а численные значения переменных r , z имеют два сочетания (рис. 3) [3]. Во-первых, при $r = z = 0$ - начало координат:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_{r1} = \sigma_{r1}(0,0) = \sigma_{\theta 1} = -\frac{q_0}{2}(1+2\mu_1), \\ \sigma_3 = \sigma_z = \sigma_z(0,0) = -q_0, \quad \tau = 0. \end{cases} \quad (69)$$

Во-вторых, когда $r=\alpha$, $z=0$, что соответствует точкам контура круговой контактной поверхности:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \sigma_{r1}(\alpha,0) = \frac{q_0}{3}(1-2\mu_1), \quad \sigma_2 = \sigma_z(\alpha,0) = 0, \\ \sigma_3 = \sigma_{\theta 1}(\alpha,0) = -\frac{q_0}{3}(1-2\mu_1), \quad \tau = 0, \end{cases} \quad (70)$$

где $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ – общепринятые в сопротивлении материалов обозначения главных (алгебраически экстремальных) напряжений [3, 5].

В связи с вышеприведенными формулами (59)-(62), (69), (70) целесообразно подчеркнуть, что для хрупких материалов (чугун, бетон, стекло и т.д.) разрушающим критерием является максимальное растягивающее напряжение $\sigma_{r1}(\alpha, 0)$ [2], действующее в радиальном направлении и имеющее величину $\frac{q_0}{3}(1-2\mu_1)$, соответствующую частному решению (70). Аналогичную физико-механическую характеристику $\sigma_{r2}(\alpha, h_1)$ внутреннего слоя пространства возможно вычислить, руководствуясь зависимостями (59), (68) при $r=\alpha$ и $z=h_1$.

Анализ полученного решения новой контактной задачи теории упругости позволяет констатировать, что в общем алгоритме оценки несущей способности и жесткости материалов пространства (рис. 1,б) основным параметром является размер α деформированной поверхности внешнего слоя основания (рис. 3), вычисляемый из уравнения (56) по известным значениям проектных характеристик $P, R, h_1, h, E_1, E_2, \mu_1, \mu_2$. После определения величины радиуса α остальные компоненты контактного взаимодействия, в состав которых входят $q_0, K_1, K_2, w_0, \sigma_{ri}, \sigma_{\theta i}, \sigma_z, \tau$, находятся, соответственно, по формулам (36), (44), (45), (55), (59)-(62), учитывая зависимость (63), расчетные соотношения (65)-(68) и характерные частные случаи (46), (58), (69), (70).

Результаты, представленные в настоящей работе, могут быть непосредственно использованы во многих технических приложениях, например для решения динамической задачи на поперечный удар [12] стального сферического бойка по слою льда (с целью его ликвидации), образующегося на асфальтобетонных дорогах и конструкциях аэродромов, имеющих кусочно-однородную структуру по толщине слоев. При этом главным эксплуатационно-технологическим требованием, несомненно, должно быть соблюдение условий, обеспечивающих прочность и недеформируемость (упругую жесткость) дорожного покрытия в процессе скальвания замерзшей воды, что подразумевает оптимизацию, путем регулирования на этапе проектирования, механико-геометрических характеристик инерционной системы «подвижный штамп (боек) – неподвижное основание».

Разработанную теоретическую модель и методику расчета возможно обобщить при $i > 2$ на неоднородные пространства конечной $h = const$ и бесконечной толщины $h = \infty$ с постоянными упругими характеристиками материалов $E_i = const, \mu_i = const$ в пределах одного слоя.

Список литературы

1. Boussinesq I. Application des Potentiels a l'Etude l'Equilibre et du Mouvement

- des Solides Elastition. - Gautheir-Villars, Paris, 1985.
2. Тимошенко С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудльер / Пер. с англ. М.И. Рейтмана; Под ред. Г.С. Шапиро. - М.: Наука, 1975. - 576 с.
3. Пономарев С.Д. Расчеты на прочность в машиностроении / С.Д. Пономарев, В.Л. Бидерман, К.К. Лихарев и др.; Под ред. д-ра техн. наук, проф. С.Д. Пономарева. - М.: Машгиз, 1958. - Т. 2. - 976 с.
4. Жемочкин Б.М. Теория упругости. - М.: Госстройиздат, 1957. - 256 с.
5. Филин Л.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. - М: Наука, 1975. - Т. 1. - 832 с.
6. Смолянский М.Л. Таблицы неопределенных интегралов. - М.: Наука, 1965. - 112 с.
7. Штаерман И.Ф. Контактная задача теории упругости. - М.; Л.: Гостехиздат, 1949. - 270 с.
8. Галин Л.А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости. - М.: Наука, 1980. - 304 с.
9. Herz H. Gesammelte Werke. Т.1. - Leipzig, 1895. - ss. 155.
10. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семеняев. - М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1962. - 608 с.
11. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. - М.: Наука, 1966. - Т. 2. - 800 с.
12. Тимошенко С.П. Прочность и колебания элементов конструкций. Избранные работы / Под ред. Э.И. Григорюка. - М.: Наука, 1975. - 704 с.

Получено 15.03.2013.

УДК:621.762

А.Е. Бакланов, Д.Н. Титов, Г.Т. Шахарова, Б.Н. Азаматов, Е.В. Титова

ВКГТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск

А.Л. Новосёлов

АлтГТУ им. Ползунова, г. Барнаул

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ ПОДБОРА СОСТАВОВ ШИХТЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ ПОРИСТЫХ ПРОНИЦАЕМЫХ КАТАЛИТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Получение новых композиционных материалов с каталитическими свойствами связано с развитием технологических процессов нового уровня, важной чертой которых является ограниченное количество операций, обеспечивающих полный переход исходных материалов в целевой продукт с их глубоким переделом, при котором происходят радикальные изменения структуры и свойств материалов [1, 2].

На основе метода самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) разработана новая энергосберегающая технология изготовления пористых проницаемых каталитических материалов для очистки отработавших газов промышленных предприятий и транспорта. Таким образом, решена одна из главных задач исследования процессов СВ-синтеза – получение композиционных интерметаллидных соединений заданного состава и свойств [3, 4].

Для каждой СВС - композиции существует определенный интервал концентрационного состава компонентов, при котором возможно проведение реакции в режиме горения [5].

Проблема подбора состава шихты для получения композитных пористых проницаемых каталитических материалов заключается в следующем. Во-первых, подбор состава шихты связан с обеспечением режима горения. Во-вторых, состав шихты, ее гранулометрические данные исходных компонентов должны обеспечивать получение прочной «сkeletalной» структуры материала с заданными физическими и физико-механическими харак-

теристиками. В-третьих, состав шихты должен обеспечивать присутствие элементов с катализитическими свойствами. В-четвертых, компоненты шихты должны быть доступны и дешевы. В-пятых, достижение необходимых характеристик и свойств новых материалов связано с особенностью технологических режимов их получения.

Миллиарды тонн промышленных твердых отходов с предприятий черной и цветной металлургии, содержащие ценные элементы в своем составе, скопились в России, начиная с конца XVII века. Из них всего 15-30 % подвергается рециклингу. Основная часть твердых отходов хранится в отвалах, шламовых полях.

Большой интерес представляют вторичные продукты процессов добычи и обогащения руды, железосодержащие отходы (пыль, шлам, окалины, в то время как отходы могут применяться для повторной переработки и извлечения из них руд черных, цветных, драгоценных и редкоземельных металлов, для получения легированных железных и других порошков).

При работе металлургических агрегатов образуется большое количество дисперсной пыли, состоящей из оксидов металлов и неметаллов. Она может улавливаться газоочистными сооружениями и затем либо подается в шламонакопитель, либо направляется на последующую переработку (в основном как компонент агломерационной шихты). Довольно часто применяется мокрая газоочистка, тогда вместо пыли отходом является шлам.

По содержанию железа шламы классифицируются:

- 1) на богатые (55-67 % Fe) – пыль и шлам газоочисток мартеновских печей и конвертеров;
- 2) относительно богатые (40-55 % Fe) – шламы и пыли аглодоменного производства;
- 3) бедные (30-40 % Fe) – шлам и пыль газоочисток электросталеплавильного производства.

Согласно химическому составу, шлаки цветной металлургии могут быть условно объединены в три группы:

- шлаки никелевых заводов и часть шлаков медных заводов, отличающихся малым содержанием цветных металлов и железа;
- медные шлаки, отличающиеся значительным содержанием железа, малым содержанием меди и наличием $\leq 5\%$ Zn и Pb;
- оловянные, свинцовые и часть медных шлаков, отличающихся значительным содержанием Zn, Pb и Sn.

В металлообрабатывающих производствах машиностроительных предприятий в огромном количестве в качестве отходов производства присутствует стружка, получаемая в процессе обработки металлов резанием. При ковке и горячей штамповке деталей, а также в результате термообработки возникает большое количество отходов, представляющих собой оксиды металлов: железа, меди и других. Порошкообразные отходы черных металлов получаются в процессе обработки литья в голтовочных барабанах и дробеметных камерах [6].

В результате применения на машиностроительных предприятиях технологий травления металлов растворами кислот и щелочей образуется значительное количество порошкообразных материалов: меди, хрома, железа и других [3].

Твердые отходы в машиностроении образуются в процессе производства продукции в виде стружки, опилок, окалины, облоя, выскеек и других и составляют до 26 % на точку металла. Основными источниками образования отходов легированных сталей является металлообработка – 84 %.

Безвозвратные потери металла в машиностроении на 1 млн тонн потребляемых черных металлов составляет: при обтирке, шлифовке, расшивке и других видах обработки

- 5,4 тыс. тонн; горячей штамповке и термической обработке (потери от окалины) – 2,1 тыс. тонн.

По данным А.В. Михайлова [7] количество отходов промышленного производства по Алтайскому краю представлено в табл.

Количество отходов промышленного производства по Алтайскому краю

Класс опасности	Отходы промышленного производства, тыс. тонн/год
1 класс	0,2
2 класс	9,8
3 класс	395,5
4 класс	3499,6
5 класс	555,1
Итого	4460,2

Возможности СВС-технологии позволяют перерабатывать твердые отходы промышленности в изделия для решения многих экологических задач. На предприятиях машиностроения образуется большое количество порошкообразных отходов различных металлов: меди, хрома, железа и их оксидов. Количество порошковых отходов, например на предприятии станкостроения, может достигать 12-15 тонн в год.

Качество очистки отработавших газов дизелей от вредных веществ в зависимости от содержания в составе каталитических блоков нейтрализаторов отдельных компонентов рассмотрено в работах целого ряда отечественных и зарубежных ученых, в том числе: В.Э. Борзых, В.И. Верещагина, В.В. Евстигнеева, Н.П. Тубалова, О.А. Лебедева, А.А. Жуйковой. Влиянию же оксида железа (Fe_2O_3) в составе пористых проницаемых каталитических СВС-блоков нейтрализаторов на качество очистки отработавших газов дизелей практически не уделено должного внимания [8].

Полученные результаты показывают, что с увеличением содержания в шихте оксида железа очистка газов от твердых частиц (ТЧ) ухудшается, но незначительно, по-видимому, за счет сокращения среднего диаметра пор с 155 до 130 мкм. Содержание оксида углерода и углеводородов не зависит от содержания оксида железа в шихте, а эффективность очистки газов от оксидов азота падает на 15 % при изменении содержания оксида железа с 45 до 50 %. Сделан вывод о том, что изменение содержания окалины легированной стали в каталитических блоках практически не влияет на изменение качества очистки газов в нейтрализаторе, а наблюдаемый эффект объясняется присутствием в каталитических блоках нейтрализатора хрома, никеля, иридия и родия [9].

Исследуемые на эффективность очистки отработавших газов дизеля каталитические СВС-блоки готовились заранее из исходных смесей, с различной дозировкой оксида хрома (Cr_2O_3), регулируемой за счет содержания алюминия (Al). Содержание оксида хрома варьировало от 16 до 19 объемных процентов. В гетерогенных реакциях окисления и восстановления в порах СВС-материалов Cr_2O_3 как оксид переходного металла выступает в роли катализатора. В присутствии катализатора происходит снижение энергии активации. Определена граница, в пределах которой в пористых СВС-материалах нет раковин и «свищей». Качество очистки газов от (ТЧ) при изменении содержания оксида хрома с 16 до 19 % увеличивается с 88 до 92 %. Однако ограничения по качеству каталитического материала позволяют при дозировке оксида хрома в 17,5 % иметь качество очистки по ТЧ 90 %; по оксиду углерода - 85 %; по углеводородам - 70 %; по оксидам азота - 40 % [10].

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили, что оксид хрома как ок-

сид переходного d-металла в составе СВС-материалов проявляет катализитические свойства в реакциях окисления продуктов неполного сгорания: твердых частиц (сажи), оксида углерода и углеводородов, а также в реакциях восстановления оксидов азота. Однако достижение показателей норм выбросов по всем нормируемым компонентам, за исключением углекислого газа, для данного типа дизелей по ЕВРО-4, ЕВРО-5 в случае применения катализитического нейтрализатора с содержанием в блоках оксида хрома не достигается.

Использование хрома в каталитических нейтрализаторах в качестве катализатора известно давно по работам О.М. Султанова и его школы. Хром (Cr) выступает катализатором в процессах окисления углеводородов, и от его содержания в шихте во многом зависят каталитические свойства пористых проницаемых СВС-материалов. Хром вводится в шихту, с одной стороны, для стабилизации растекания расплава реагентов в процессе взаимодействия, с другой - для повышения коррозионной стойкости материала к парам серной и азотной кислот, присутствующих в отработавших газах, и так же, как катализатор, способствующий снижению энергии активации в окислительных и восстановительных процессах очистки газов в нейтрализаторах. При содержании в шихте хрома менее 5% по массе происходит снижение механической прочности за счет ухудшения условий растекания расплавов реагентов в процессе изготовления СВС-материалов [11].

Оксид хрома и хром являются катализаторами. В данной работе не рассматривались варианты составов шихты с концентрацией ниже 5 % из условия сохранения механических свойств СВС-материалов. В результате проведенных испытаний обнаружено, что при увеличении содержания хрома в шихте с 5,0 до 7,2 % качество очистки газов от твердых частиц увеличивается с 89 до 95 %, что нельзя считать значительным. Качество очистки газов от оксида углерода CO увеличивается с 70 до 87 %, что является уже существенным. Качество очистки от углеводородов увеличивается всего на 6 %, а качество очистки от оксидов азота увеличивается с 32 до 50 %, что очень значимо. В случае применения дополнительных мероприятий, направленных на увеличение полноты сгорания или увеличение содержания хрома в составе каталитических блоков от 5 % по массе, наблюдается выполнение норм ЕВРО-4 и ЕВРО-5 по выбросам оксида углерода (CO), а при дозировке хрома от 5,6 % - по выбросам углеводородов. При дозировке хрома до 7,2 % наблюдается выполнение норм выбросов по ЕВРО-4 и ЕВРО-5 по твердым частицам [12].

Никель хорошо зарекомендовал себя в качестве катализатора в химической промышленности.

Качество очистки отработавших газов дизелей от вредных веществ в зависимости от содержания в составе каталитических блоков нейтрализаторов никеля рассмотрено в работах целого ряда отечественных и зарубежных ученых, в том числе: Б.А. Адамовича, И.Л. Варшавского, Р.В. Малова, В.В. Горбунова, Н.Н. Патрахальцева, О.И. Жегалина, П.Д. Лупачева.

Никель выступает в роли катализатора в процессах доокисления продуктов неполного сгорания и восстановления оксидов азота. Присутствие никеля в составе СВС-катализитического материала значительно влияет на состав отработавших газов. При увеличении собственной поверхности катализатора увеличивается площадь растекания расплавов и тогда увеличивается содержание никеля в шихте. Исследовались блоки с вариациями состава никеля в шихте от 5 до 12,5 %. При увеличении содержания никеля в шихте качество очистки выхлопных газов от ТЧ возрастает с 90,5 до 96,5 %, от оксида углерода CO - с 72 до 93 %, от углеводородов C_xH_y - с 62 до 78 %, от оксидов азота - с 27 до 60 %. Выполнение норм ЕВРО-4, ЕВРО-5 по оксиду углерода, углеводородам и твердым частицам может быть достигнуто. При использовании каталитических блоков, содержащих никель

даже 12,5 %, выполнение норм ЕВРО-5 по выбросам оксидов азота проблематично [13].

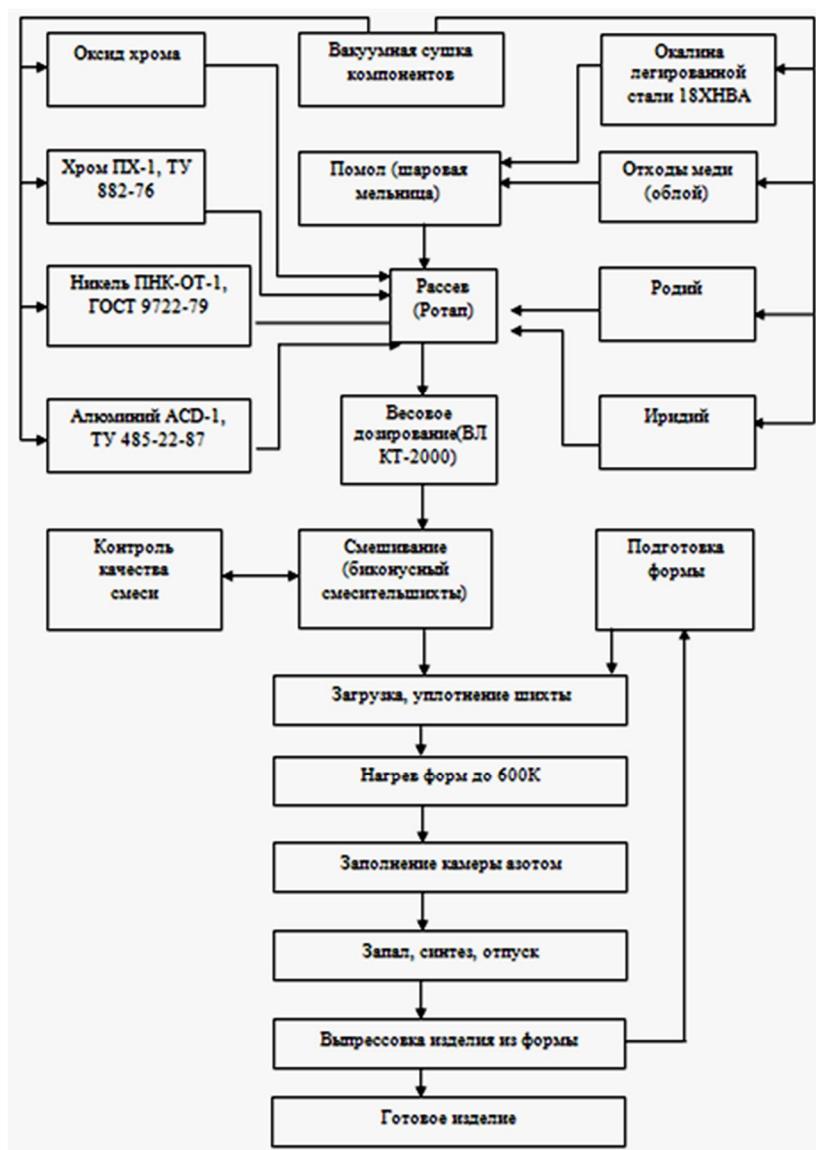


Рисунок 1 - Технологическая схема производства интерметаллических каталитических фильтров методом СВС

Список литературы

1. Анциферов В.Н. Высокопористые алюмосиликатные материалы: получение, свойства, применение / В.Н. Анциферов, С.Е. Порозова. - Пермь: Изд-во Пермского гос. техн. ун-та, 1995. - 120 с.
2. Батаев А.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение: Учеб. / А.А. Батаев, В.А. Батаев. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. - 384 с.
3. Абдаракимов В.З. Использование отходов цветной металлургии в производстве керамических материалов / В.З. Абдаракимов, Е.С. Абдаракимова, Н.С. Агаджанов, В.П. Долгий // Огнеупоры и техническая керамика. - 2005. - № 12. - С. 35-39.
4. Итин В.И. Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений / В.И. Итин,

- О.С. Найбороденко. - Томск: Изд-во Том. ун-та, 1989. - 214 с.
5. Лапшин О.В. Термокинетические и теплофизические параметры высокотемпературного синтеза интерметаллида Ni₃Al в режиме теплового взрыва порошковой смеси чистых элементов / О.В. Лапшин, В.Е. Овчаренко, Б.Н. Боенгин // Материалы Междунар. симп. по физике горения и взрыва. - Черноголовка, 2000. - Т. 1. - С. 143-145.
6. Бразовский В.В. Получение материалов восстановлением из отходов машиностроения с применением высокотемпературного синтеза / В.В. Бразовский, Г.М. Кашкаров, О.А. Лебедева и др. // Известия ТПУ. - 2008. - Т. 313. - № 3. - С. 104-106.
7. Михайлов А.В. Пути снижения негативного воздействия отходов сельского хозяйства на окружающую природную среду // Актуальные проблемы производственной и экологической безопасности: Сб. тр. - Барнаул: 2011. - С. 106-109.
8. Мельберт А.А. Использование СВС-технологий для получения пористых каталитических материалов / А.А. Мельберт, А.А. Жуйкова, А.А. Новоселов и др. // Повышение экологической безопасности автотракторной техники: Сб. статей / Под ред. д.т.н., профессора, академика РАТ А.Л. Новоселова / Российская академия транспорта, АлтГТУ им. И.И. Ползунова. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2007. - С. 21-27.
9. Мельберт А.А. Перспективы применения СВС-катализитических фильтров отработавших газов автомобилей / А.А. Мельберт, А.Л. Новоселов // Вестник АлтГТУ им. И.И. Ползунова. - 1999. - № 2. - С. 157-158.
10. Мельберт А.А. Эффективность СВС-катализитических блоков в нейтрализаторах для дизелей / А.А. Мельберт, А.А. Новоселов // Вестник АлтГТУ им. И.И. Ползунова. - 1999. - № 2. - С. 157-158.
11. Евстигнеев В.В. Технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в производстве пористых изделий / В.В. Евстигнеев, С.Ю. Соломенцев // Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: материалы и технологии: Сб. научн. Тр. / Под ред. д-ра ф.-м. наук, проф. В.В. Евстигнеева, к. ф.-м. наук В.М. Белова. - Новосибирск: Наука, 2001. - С. 47-53.
12. Евстигнеев, В.В. Применение СВС-фильтров для создания пористых каталитических нейтрализаторов / В.В. Евстигнеев, О.А. Лебедева, Н.П. Тубалов / Материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Совершенствование быстроходных дизелей». - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 1999. - С. 136.
13. Адамович Б.А. Катализитические нейтрализаторы отработавших газов и экологическая безопасность АТС // Автомобильная промышленность. - 2005. - № 1. - С. 9-11.

Получено 20.05.2013

УДК: 537.8:62-251:621.311.214

Т.С. Борукеев
КГТУ им. И. Рazzакова, г. Бишкек

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА РОТОРОВ
НА ВЫХОДНЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАСОСНОГО КОМПЛЕКСА**

На тепловых электрических станциях вода расходуется на охлаждение (конденсацию) отработавшего пара, охлаждение воздуха, газов, масла, подшипников вспомогательных механизмов. Вода требуется также и для восполнения потерь пара и конденсата как внутри электростанции, так и у внешних тепловых потребителей, а также для перемещения по трубам подлежащих удалению золы и шлака. Кроме того, вода расходуется для хозяйственных и бытовых нужд. Наибольшим является расход воды на охлаждение в конденсаторах отработавшего пара турбин. В мировой практике строительства ТЭС и АЭС в качестве циркуляционных насосов систем охлаждения конденсаторов турбин при напорах до 10-15 м применяются осевые насосы. При напорах от 10 до 30-40 м, а это основной диапазон изменения напоров в системах охлаждения конденсаторов турбин ТЭС и АЭС, широкое распространение получили диагональные насосы. При напорах, начиная с 25 м, главным образом на ТЭЦ, применяются центробежные насосы. Габаритные размеры,

способ монтажа насоса и электродвигателя, кавитационные свойства насоса определяют размеры, компоновку и стоимость не только машинного зала насосной станции, но и всего стационарного узла.

Предлагаемая конструкция электрогидравлического комплекса (ЭГК) на базе стандартного осевого насоса показана на рис. 1. Особенность конструкции ЭГК заключается в том, что общая мощность комплекса распределяется по нескольким друг от друга независящим двигателям, работающим на один «вал». А это в свою очередь позволяет получить напор в несколько раз больше, чем обычные осевые насосы при одинаковых расходах воды.

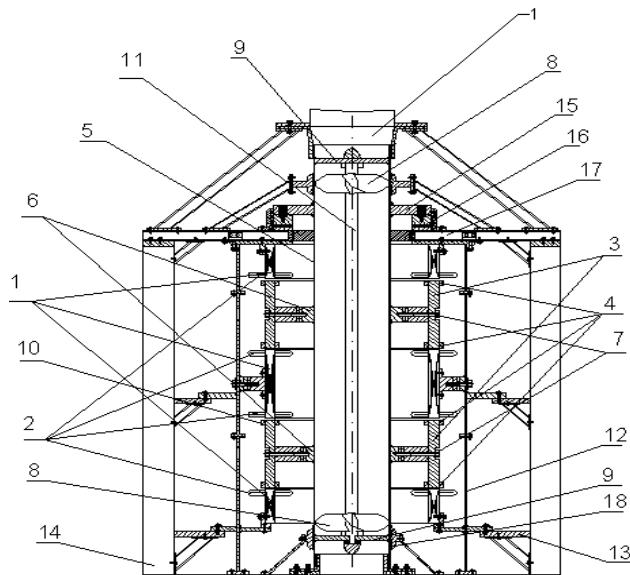


Рисунок 1 - Конструкция электрогидравлического комплекса

Конструкция совмещенного ЭГК состоит из нескольких статоров 1, сердечники которых выполнены из полосовой электротехнической стали, навитой в виде торроида, на торцевых поверхностях которых выполнены прямоугольно открытые пазы для трехфазной обмотки статора, причем на одном сердечнике статора расположены по обоим торцам в пазах две трехфазные 2 обмотки, электрически не связанные между собой, а сердечники установлены на корпусе 12, закрепленном на крестовинах 13, опирающихся на железобетонные опоры 14.

Между статорами располагаются массивные роторы 3 с алюминиевой, стальной к.з. обмотками, причем на одном сердечнике ротора расположены вышеперечисленные к.з. обмотки 4, каждая из которых - по обоим торцам массива ротора. Массивные ферромагнитные роторы крепятся к втулке 6 стального цилиндра 5 с помощью болтов 7.

На стальном цилиндре 5 на внутренней поверхности укреплены жестко два рабочих осевых гидравлических колеса 8, опирающихся на вал 11 и одновременно на крестовину 9 с лопастями, выполняющие функции изменяющего направление потока воды, т.е. преобразующие вращательное движение потока в поступательное или наоборот. Для вращательного движения роторов с цилиндром и осевых насосов в качестве опор вращающихся частей ЭГК использован комбинированный подпятник 15 с верхним направляющим подшипником 16, расположенные на верхней несущей крестовине 17. Нижний направ-

ляющий подшипник 18 установлен у всасывающего конфузора и опирается на бетонный блок подземной части насосов станции.

Для сравнения приведены технические показатели совмещенного асинхронного двигателя ЭГК и серийного асинхронного двигателя 4А355S4У3 (табл. 1).

Таблица 1

п/№	Выходные показатели	ЭГК	4А355S4У3
1	P_h , кВт	250	250
2	U_h , В	380/660	380/660
3	n_c , об/мин	1500	1500
4	S_h , %	1,92	1,7
5	η , о.е.	87	94,5
6	I_1 , А	283	252,4
7	$\text{Cos}\phi$, о.е.	0,9	0,92
8	K_p	1,52	1,03
9	K_m	2,37	2,11
10	S_{kp}	0,05	0,07
11	K_i	6,1	4,7

В табл. 2 представлены технические характеристики ЭГК с двумя последовательно соединенными осевыми насосами и четырьмя совмещенными асинхронными двигателями, каждый мощностью по 250 кВт, и показатели серийного осевого насоса ОВ5-55 с одним насосом и одним асинхронным двигателем мощностью 220 кВт.

Из представленных показателей видно, что для получения у ОВ5-55 такого же напора $H_t=47,3$ м, как в ЭГК, потребуется пять насосов $N_d=5$ общей мощностью $P_t=1100$ кВт.

Таблица 2

Показатели насоса	Обозначения	ЭГК	ОВ5-55
Подача, m^3/c	Q_t	2,1	1,8
Напор, м	H_t	47,3	10
Диаметр рабочего колеса, м	D_t	0,55	0,55
Число электродвигателей	N_d	1	5
Число осевых насосов	N_h	2	5
Мощность насоса, кВт	P_t	975	1100
Скорость вращения электродвигателя, об/мин	n_t	1500	1000
Коэффициент быстроходности, об/мин	n_s		744
Кавитационный запас, м	Δh		$342 \cdot 10^3$

Как показывает расчеты, ЭГК позволяет получить при одинаковом расходе напор, в 5 раз превышающий напор серийного насоса ОВ5-55.

Было исследовано влияние изменения параметров магнитной системы (μ, γ) на выходные энергетические показатели.

На роторе ЭГК имеются 3 обмотки, каждая из которых по отдельности создает электромагнитные моменты. Используя материалы с разными электрическими и магнитными свойствами, можно улучшить выходные энергетические показатели ЭГК. Учитывая, что выходные показатели совмещенного асинхронного двигателя зависят от электри-

ческих параметров к.з. роторов, то в первую очередь, с помощью уравнений полного комплексного сопротивления Z_2, Z_3, Z_4 , определим параметры $r_2, x_2, r_3, x_3, r_4, x_4$:

$$Z_2 = r_2 + jx_2 = \frac{l_2 \cdot m_2^* \cdot (\alpha \cdot m_2)^2}{2(\omega \cdot s_2)^2 \cdot \mu_2 \cdot \gamma_2 \cdot [C_2(ch(m_2 \cdot \Delta_2) - 1) + D_2 sh(m_2 \cdot \Delta_2)]^2} \cdot [K_2],$$

где $[K_2] = \frac{C_2 \cdot C_2^*}{m_2^{*2} - m_2^2}(a_2) + \frac{C_2 \cdot D_2^{*2}}{m_2^{*2} - m_2^2}(b_2) + \frac{D_2 \cdot C_2^{*2}}{m_2^{*2} - m_2^2}(c_2) + \frac{D_2 \cdot D_2^*}{m_2^{*2} - m_2^2}(d_2);$

$$a_2 = [m_2^*(sh(m_2 \Delta_2) \cdot sh(m_2^* \Delta_2)) - m_2(ch(m_2 \Delta_2)ch(m_2^* \Delta_2)) + m_2];$$

$$b_2 = m_2^* sh(m_2 \Delta_2) ch(m_2^* \Delta_2) - m_2 ch(m_2 \Delta_2) sh(m_2^* \Delta_2);$$

$$c_2 = m_2^* sh(m_2^* \Delta_2) ch(m_2 \Delta_2) - m_2 sh(m_2 \Delta_2) ch(m_2^* \Delta_2);$$

$$d_2 = [m_2 \cdot sh(m_2^* \Delta_2) \cdot sh(m_2 \Delta_2)) - m_2^*(ch(m_2^* \Delta_2)ch(m_2 \Delta_2)) + m_2^*];$$

$$m_2 = \alpha_2 + j\beta_2; m_2^* = \alpha_2 - j\beta_2;$$

$$\alpha_2 = \sqrt{1 + \left(\frac{s_2 \cdot \omega \cdot \mu_2 \cdot \gamma_2 \cdot \tau^2}{\pi^2} \right)^2} + 1; \quad \beta_2 = \sqrt{1 + \left(\frac{s_2 \cdot \omega \cdot \mu_2 \cdot \gamma_2 \cdot \tau^2}{\pi^2} \right)^2} - 1;$$

$$\mu_2 = \mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7};$$

l_2 - длина сердечника ротора;

C_1, C_2, C_3, C_4 - постоянные интегрирования;

$$C_2^* = C_{2a} - jC_{2p}; \quad C_3^* = C_{3a} - jC_{3p}; \quad C_4^* = C_{4a} - jC_{4p};$$

$$\Delta_2 = \sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot f \cdot s_2 \mu_2 \gamma_2}} \text{ - глубина проникновения электромагнитной волны в среду.}$$

$$Z_3 = r_3 + jx_3 = \frac{l_3 \cdot m_3^* \cdot (\alpha \cdot m_3)^2}{2(\omega \cdot s_3)^2 \cdot \mu_3 \cdot \gamma_3 \cdot [C_3(ch(m_3 \cdot \Delta_3) - 1) + D_3 sh(m_3 \cdot \Delta_3)]^2} \cdot [K_3];$$

где $[K_3] = \frac{C_3 \cdot C_3^*}{m_3^{*2} - m_3^2}(a_3) + \frac{C_3 \cdot D_3^{*2}}{m_3^{*2} - m_3^2}(b_3) + \frac{D_3 \cdot C_3^{*2}}{m_3^{*2} - m_3^2}(c_3) + \frac{D_3 \cdot D_3^*}{m_3^{*2} - m_3^2}(d_3);$

$$a_3 = [m_3^*(sh(m_3 \Delta_3) \cdot sh(m_3^* \Delta_3)) - m_3(ch(m_3 \Delta_3)ch(m_3^* \Delta_3)) + m_3];$$

$$b_3 = m_3^* sh(m_3 \Delta_3) ch(m_3^* \Delta_3) - m_3 ch(m_3 \Delta_3) sh(m_3^* \Delta_3);$$

$$c_3 = m_3^* sh(m_3^* \Delta_3) ch(m_3 \Delta_3) - m_3 sh(m_3 \Delta_3) ch(m_3^* \Delta_3);$$

$$d_3 = [m_3 \cdot sh(m_3^* \Delta_3) \cdot sh(m_3 \Delta_3)) - m_3^*(ch(m_3^* \Delta_3)ch(m_3 \Delta_3)) + m_3^*];$$

$$m_3 = \alpha_3 + j\beta_3; \quad m_3^* = \alpha_3 - j\beta_3;$$

$$\alpha_3 = \sqrt{1 + \left(\frac{s_3 \cdot \omega \cdot \mu_3 \cdot \gamma_3 \cdot \tau^2}{\pi^2} \right)^2} + 1; \quad \beta_3 = \sqrt{1 + \left(\frac{s_3 \cdot \omega \cdot \mu_3 \cdot \gamma_3 \cdot \tau^2}{\pi^2} \right)^2} - 1;$$

D_1, D_2, D_3, D_4 - постоянные интегрирования;

$$D_2^* = D_{2a} - jD_{2p}; \quad D_3^* = D_{3a} - jD_{3p}; \quad D_4^* = D_{4a} - jD_{4p};$$

$\Delta_3 = \sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot f \cdot s_3 \mu_3 \gamma_3}}$ - глубина проникновения электромагнитной волны в среду.

$$Z_4 = r_4 + jx_4 = \frac{l_4 \cdot m_4^* \cdot (\alpha \cdot m_4)^2}{2(\omega \cdot s_4)^2 \cdot \mu_4 \cdot \gamma_4 \cdot [C_4(ch(m_4 \cdot \Delta_4) - 1) + D_4 sh(m_4 \cdot \Delta_4)]^2} \cdot [K_4],$$

$$\text{где } [K_4] = \frac{C_4 \cdot C_4^*}{m_4^{*2} - m_4^2}(a_4) + \frac{C_4 \cdot D_4^{*2}}{m_4^{*2} - m_4^2}(b_4) + \frac{D_4 \cdot C_4^{*2}}{m_4^{*2} - m_4^2}(c_4) + \frac{D_4 \cdot D_4^*}{m_4^{*2} - m_4^2}(d_4);$$

$$a_4 = [m_4^*(sh(m_4 \Delta_4) \cdot sh(m_4^* \Delta_4)) - m_4(ch(m_4 \Delta_4)ch(m_4^* \Delta_4)) + m_4];$$

$$b_4 = m_4^* sh(m_4 \Delta_4)ch(m_4^* \Delta_4) - m_4 ch(m_4 \Delta_4)sh(m_4^* \Delta_4);$$

$$c_4 = m_4^* sh(m_4^* \Delta_4)ch(m_4 \Delta_4) - m_4 sh(m_4 \Delta_4)ch(m_4^* \Delta_4);$$

$$d_4 = [m_4 \cdot sh(m_4^* \Delta_4) \cdot sh(m_4 \Delta_4)) - m_4^*(ch(m_4^* \Delta_4)ch(m_4 \Delta_4)) + m_4^*];$$

$$m_4 = \alpha_4 + j\beta_4; m_4^* = \alpha_4 - j\beta_4;$$

$$\alpha_4 = \sqrt{1 + \left(\frac{s_4 \cdot \omega \cdot \mu_4 \cdot \gamma_4 \cdot \tau^2}{\pi^2} \right)^2} + 1; \quad \beta_4 = \sqrt{1 + \left(\frac{s_4 \cdot \omega \cdot \mu_4 \cdot \gamma_4 \cdot \tau^2}{\pi^2} \right)^2} - 1;$$

$\Delta_4 = \sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot f \cdot s_4 \mu_4 \gamma_4}}$ - глубина проникновения электромагнитной волны в среду.

Выражения суммарного электромагнитного момента, развивающиеся алюминиевой и стальной к.з. обмоткой и массивного сердечника, запишем в виде:

$$M_{\mathcal{E}M} = \frac{9,55 Nm U_s^2}{n_c (g^2 + b^2)^2} \left[\frac{r_{p1}}{s} (k_{a1}^2 + k_{b1}^2) + \frac{r_{p2}}{\sqrt{s}} (k_{a2}^2 - k_{b2}^2) + \frac{r_{p3}}{\sqrt{s}} (k_{a3}^2 + k_{b3}^2) \right],$$

где m - число фаз; N - число к.з. роторов;

$$k_{a1} = [g_a(g_s g + b_s b) + b_a(g_s b - b_s g)]^2; \quad k_{b1} = [b_a(g_s g + b_s b) - g_a(g_s b - b_s g)]^2;$$

$$k_{a2} = [g_c(g_s g + b_s b) + b_c(g_s b - b_s g)]^2; \quad k_{a2} = [b_c(g_s g + b_s b) - g_c(g_s b - b_s g)]^2;$$

$$k_{a3} = [g_\phi(g_s g + b_s b) + b_\phi(g_s b - b_s g)]^2; \quad k_{a3} = +[b_\phi(g_s g + b_s b) - g_\phi(g_s b - b_s g)]^2;$$

$$g_s = \frac{r_s}{r_s^2 + X_s^2}; \quad b_s = \frac{X_s}{r_s^2 + X_s^2}; \quad g_m = \frac{r_m}{r_m^2 + X_m^2}; \quad b_m = \frac{X_m}{r_m^2 + X_m^2}; \quad g_a = \frac{r_{p1} s_{p1}}{r_{p1}^2 + s_{p1}^2 x_{p1}^2};$$

$$b_a = \frac{x_{p1} s_{p1}^2}{r_{p1}^2 + s_{p1}^2 x_{p1}^2}; \quad g_c = \frac{r_{p2} \sqrt{s_{p1}}}{r_{p2}^2 + x_{p2}^2}; \quad b_c = \frac{x_{p2} \sqrt{s_{p1}}}{r_{p2}^2 + x_{p2}^2}; \quad g_\phi = \frac{r_{p3} \sqrt{s_{p2}}}{r_{p3}^2 + x_{p3}^2}; \quad b_\phi = \frac{x_{p3} \sqrt{s_{p2}}}{r_{p3}^2 + x_{p3}^2}.$$

Механические характеристики построены для различных электрических и магнитных параметров материалов обмоток ротора (рис. 2).

Выражение пускового тока определяется по формуле

$$\bullet I_1 = \frac{U_1}{Z_H} = \frac{U_1}{Z_1 + \frac{Z_m \cdot Z_2}{Z_m + Z_2} + \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + \frac{Z_3 \cdot Z_4}{Z_3 + Z_4}},$$

где знаменатель определяет суммарное сопротивление ЭГК комплекса.

Характеристика изменения пускового тока от скольжения представлена на рис. 3.

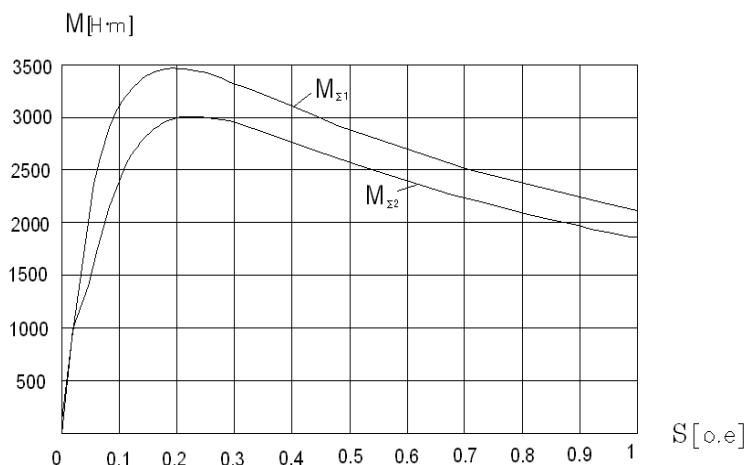


Рисунок 2 - Механическая характеристика ЭГК при $\mu_3 = \mu_4 = 100 \cdot \mu_0$ и $\mu_3 = \mu_4 = 800 \cdot \mu_0$

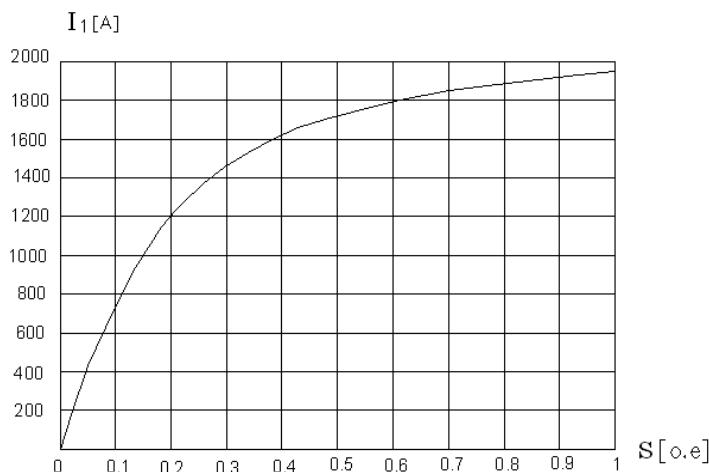


Рисунок 3 - Токовая характеристика ЭГК при $\mu_3 = \mu_4 = 100 \cdot \mu_0$ и при $\mu_3 = \mu_4 = 800 \cdot \mu_0$

Токовые пусковые характеристики при изменении μ практически не изменяются. Сравнительные выходные показатели при различных электрических и магнитных параметрах показаны в табл. 3.

На основании вышеизложенного можно сделать следующий вывод. Впервые разработан ЭГК, совмещенный с несколькими осевыми насосами, позволяющий увеличить напор в несколько раз. Разработаны основные формулы, определяющие выходные технические показатели, приведены соответствующие характеристики и сравнительные электрические и технические показатели ЭГК и показатели серийных осевых насосов и соответствующих электродвигателей. Приведенные данные показывают, что разработанный ЭГК с последовательно включенными осевыми насосами обладает существенно лучшими выходными показателями.

Таблица 3

	$\mu_3 = \mu_4 = 100 \cdot \mu_0$ $\gamma_2 = 20,5 \cdot 10^6$; $\gamma_3 = \gamma_4 = 7 \cdot 10^6$	$\mu_3 = \mu_4 = 800 \cdot \mu_0$ $\gamma_2 = 20,5 \cdot 10^6$; $\gamma_3 = \gamma_4 = 7 \cdot 10^6$	$\mu_3 = \mu_4 = 100 \cdot \mu_0$; $\gamma_2 = 20,5 \cdot 10^6$; $\gamma_3 = \gamma_4 = 7 \cdot 10^5$
r_2'	0,059	0,059	0,059
x_2'	0,25	0,25	0,25
r_3'	0,11853	0,1187	0,11874
x_3'	0,021582	0,020592	0,020394
r_4'	0,281	2,08	2,2
x_4'	0,442	0,51	0,5211
$M_{\text{ПУСК}}$	1850	2057	2062
M_{\max}	3000	3390	3450
$I_{\text{ПУСК}}$	1947	1935	1935
η	85,0	86,12	86,15
I_1	294	283	283
$\cos \varphi$	0,868	0,8985	0,8994

Список литературы

- Сили С. Электромеханические преобразования энергии. - М.: Энергия, 1968. - 376 с.
- Копылов И.П. Уравнения обобщенного электромеханического преобразователя энергии с N роторами / И.П. Копылов, В.Н. Цой // Известия вузов. Электромеханика. - 1979. - № 8.
- Келим Ю.М. Совмещенные электрические машины / Ю.М. Келим, И.П. Копылов, Д.В. Свешарник, Л.Х. Шидлович. - М.: Энергия, 1969. - 200 с.
- Постников И.М. Проектирование электрических машин. - Киев, 1960. - 904 с.
- Хенкок Е. Матричный анализ электрических машин. - М: Энергия, 1967. - 224 с.
- Цой В.Н. Основные уравнения асинхронной гидродинамической машины с аксиальным расположением роторов // Электричество. - 1990. - № 10. - М., 1990.
- Цой В.Н. Обобщенная модель многороторного электромеханического преобразователя энергии //Электричество. - 1984. - № 4. - М., 1984.
- Жабо В.В. Гидравлика и насосы / В.В. Жабо, В.В. Уваров. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 328с.
- Новодережкин Р.А. Насосные станции систем технического водоснабжения ТЭС и АЭС. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 265 с.
- Кривченко Г.И. Гидравлические машины. - М.: Энергия, 1978.

Получено 3.04.2013

УДК: 621.22-026.66:621.362

Т.С. Борукеев
КГТУ им. И. Рazzакова, г. Бишкек

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ТЭС И АЭС

На ТЭС и АЭС имеется большое число устройств и механизмов, требующих непре-

рывного или периодического снабжения водой, например для отвода теплоты от различных технологических объектов или для охлаждения подшипников и т.д. Технико-экономические и эксплуатационные показатели насосного оборудования ТЭС постоянно совершенствуются, конструктивно видоизменяются, модернизируются и создаются новые типы насосов.

В связи с ускоренным развитием энергетики, укрупнением энергоблоков ТЭС и АЭС разрабатываются новые конструкции насосных станций и гидротехнических сооружений систем технического водоснабжения, создаются новые конструкции диагональных и осевых насосов, проводятся исследования по увеличению экономичности и надежности работы сооружений и оборудования.

К приводным электродвигателям насосных агрегатов ТЭС и АЭС предъявляется ряд специфических требований. В первую очередь должна быть обеспечена высокая надежность их работы. Мощность электродвигателей центробежных, осевых и диагональных насосов выбирается с учетом возможности пуска и разворота агрегатов как при номинальном напряжении на зажимах электродвигателей, так и при напряжении, равном 0,8 номинального. Нормы технологического проектирования требуют выполнения условия $M_{\Pi} \geq M_{\text{ном}}$.

Тип и конструкция насосов должны обеспечивать минимум приведенных затрат по всей электростанции. Предлагаемая конструкция электрогидравлического комплекса (ЭГК) рассмотрена в предыдущей статье.

В современной математической теории уравнения электромагнитных процессов электромеханического преобразования энергии устанавливают связи между интегральными параметрами – токами, ЭДС, электрическими и магнитными сопротивлениями, потоками и потокосцеплениями.

При составлении систем уравнений необходимо учитывать количество обмоток и частоту вращения роторов, их взаимоиндуктивность, взаимное влияние магнитных полей в активных зонах, конструктивные особенности роторов и статоров, влияние наличия жидких сред и др.

Для учета перечисленных особенностей, присущих электрогидравлическим комплексам, необходимо разработать электромагнитную модель и математическую систему уравнений, описывающих с большей точностью реальные электромагнитные процессы, происходящие при преобразовании энергии. В наиболее общем конструктивном исполнении совмещенный ЭГК состоит из нескольких неподвижных и нескольких подвижных частей – роторов, гидравлических осевых насосов, обладающих одной степенью свободы механического движения – возможностью поворота роторов относительно статора.

Для упрощения исследования электромагнитных процессов, а следовательно и математической теории, описывающей эти процессы, воспользуемся основными допущениями: ограничимся рассмотрением электромагнитных явлений при частотах одного порядка с номинальной ЭДС электромагнитной индукции значительно большей, чем сторонние ЭДС; ток проводимости в проводниках значительно больше сторонних токов; электромагнитное поле в ЭГК считаем квазистационарным; линейная скорость роторов весьма мала по сравнению со скоростью света; механические напряжения не влияют на размеры активных частей и на μ_i , γ_i ; параметры и размеры активных частей практически не зависят от температуры.

С учетом принятых допущений разрабатывается электромагнитная модель и математическая теория электромагнитных процессов преобразования энергии в ЭГК.

Разбиваем систему на четыре области: область 1- рабочий воздушный зазор; 2 и 3 - алюминиевая и стальная короткозамкнутые обмотки; 4 - массив ферромагнита.

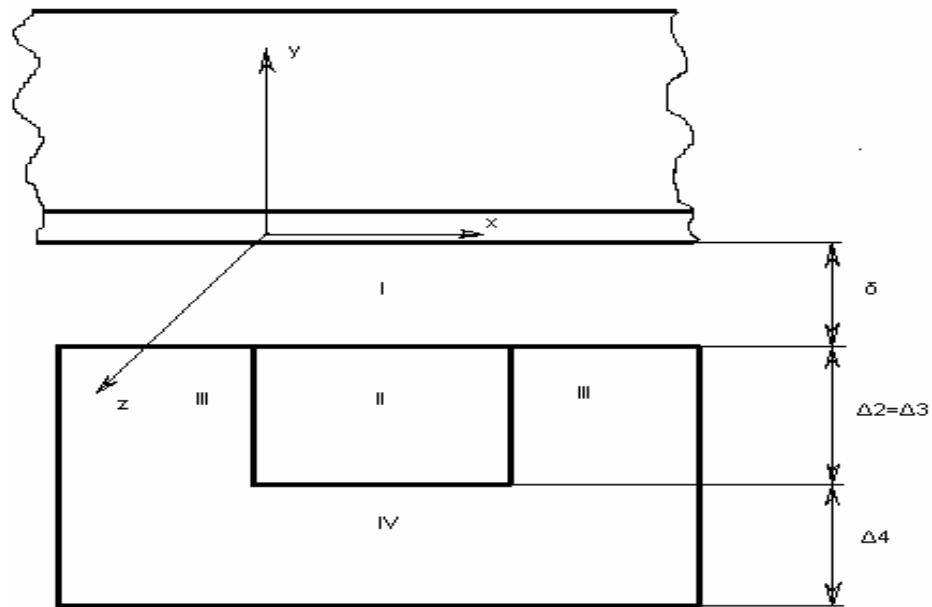


Рисунок 1 - Электромагнитная модель ЭГК с тремя обмотками на роторе. Условные обозначения:
 Δ_3, Δ_4 - глубина проникновения электромагнитной волны в соответствующую среду;
 δ, Δ_2 - толщина воздушного зазора и алюминиевой к.з. обмотки ротора

Для каждой области μ - магнитная проницаемость среды и γ - электрическая проводимость среды принимаются как:

1. $\mu_1 = \mu_0; \gamma_1 = 0;$
2. $\mu_2 = \mu_0; \gamma_2 = const;$
3. $\mu_3 = const; \gamma_3 = const;$
4. $\mu_4 = const; \gamma_4 = const,$

где μ_0 - магнитная проводимость воздуха; γ_2 - электрическая проводимость алюминия; $\mu_3 = \mu_4$ - магнитная проводимость стали; $\gamma_3 = \gamma_4$ - электрическая проводимость стали.

Явления, связанные с наличием переменного электромагнитного поля, как известно, описываются уравнением

$$\nabla^2 \overline{A} = \mu\gamma \frac{\partial \overline{A}}{\partial t}, \quad (1)$$

где \overline{A} - векторный магнитный потенциал.

1. Для первой области уравнения (1) можно представить в виде

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = 0. \quad (2)$$

Решение этого уравнения можно представить в виде

$$A_1 = (C_1 sh \alpha y_1 + D_1 ch \alpha y_1) e^{j(\alpha x - \omega t)}. \quad (3)$$

2. Для второй, третьей и четвертой областей ротора, занятых алюминиевой, стальной

к.з. и массивной обмоткой (среда 2, 3, 4), уравнение (1) примет вид:

– для алюминиевой обмотки:

$$\frac{d^2 A_2}{dx^2} + \frac{d^2 A_2}{dy^2} = -j\omega_2 \mu_0 \gamma_2 A_2; \quad (4)$$

– для стальной обмотки:

$$\frac{d^2 A_3}{dx^2} + \frac{d^2 A_3}{dy^2} = -j\omega_3 \mu_3 \gamma_3 A_3; \quad (5)$$

– для массивной ферромагнитной обмотки:

$$\frac{d^2 A_4}{dx^2} + \frac{d^2 A_4}{dy^2} = -j\omega_4 \mu_4 \gamma_4 A_4, \quad (6)$$

где $\omega_2 = \omega_3 = \omega_4$ - частота вращения ротора.

Уравнению (4) соответствует решение

$$A_2 = (C_2 \operatorname{sh} m_2 y_2 + D_2 \operatorname{ch} m_2 y_2) e^{j(\alpha x - \omega_2 t)}. \quad (7)$$

Уравнение (5) имеет решение

$$A_3 = (C_3 \operatorname{sh} m_3 y_3 + D_3 \operatorname{ch} m_3 y_3) e^{j(\alpha x - \omega_3 t)}. \quad (8)$$

Решение уравнения (6) представим в виде

$$A_4 = (C_4 \operatorname{sh} m_4 y_4 + D_4 \operatorname{ch} m_4 y_4) e^{j(\alpha x - \omega_4 t)}, \quad (9)$$

где комплексные коэффициенты $m_2 = \alpha_2 + j\beta_2$; $m_3 = \alpha_3 + j\beta_3$; $m_4 = \alpha_4 + j\beta_4$; y - ордината среды 2, 3, 4.

Коэффициенты α_2 , β_2 , α_3 , β_3 и α_4 , β_4 определяются по формулам:

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= \frac{\alpha}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_2 \mu_0 \gamma_2 \tau^2}{\pi^2} \right)} + 1}; \quad \beta_2 = \frac{\alpha}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_2 \mu_0 \gamma_2 \tau^2}{\pi^2} \right)} - 1}; \\ \alpha_3 &= \frac{\alpha}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_3 \mu_3 \gamma_3 \tau^2}{\pi^2} \right)} + 1}; \quad \beta_3 = \frac{\alpha}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_3 \mu_3 \gamma_3 \tau^2}{\pi^2} \right)} - 1}; \\ \alpha_4 &= \frac{\alpha}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_4 \mu_4 \gamma_4 \tau^2}{\pi^2} \right)} + 1}; \quad \beta_4 = \frac{\alpha}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_4 \mu_4 \gamma_4 \tau^2}{\pi^2} \right)} - 1}. \end{aligned}$$

Так как для реальных толщин массивной ферромагнитной части ротора можно считать, что электромагнитное поле практически не проникает дальше среды 4, то принимаем, что $B_{y4}(y_4 = \Delta_4) = 0$. В вышеприведенных выражениях: C_1 , D_1 , C_2 , D_2 , C_3 , D_3 , C_4 , D_4 - постоянные интегрирования.

Составляющие напряженности электрического и магнитного полей по осям x и y определяются путем дифференцирования векторного потенциала:

$$H_{xi} = \frac{1}{\mu} \frac{d \overline{A_i}}{dy_i}; \quad H_{yi} = \frac{1}{\mu} \frac{d \overline{A_i}}{dx_i}; \quad E_i = -\frac{d \overline{A_i}}{dt}.$$

1. Для первой области (воздушная среда)

$$H_{x\delta} = \frac{\alpha}{\mu_0} (C_1 chay_1 + D_1 shay_1) e^{j(\alpha x - \omega t)}; \quad (10)$$

$$H_{y\delta} = -j \frac{\alpha}{\mu_0} (C_1 chay_1 + D_1 shay_1) e^{j(\alpha x - \omega t)}.$$

2. Для алюминиевой обмотки ротора (среда 2):

$$H_{x2} = \frac{m_2}{\mu_0} (C_2 ch m_2 y_2 + D_2 sh m_2 y_2) e^{j(\alpha x - \omega_2 t)}; \quad (11)$$

$$H_{y2} = -j \frac{\alpha}{\mu_0} (C_2 ch m_2 y_2 + D_2 sh m_2 y_2) e^{j(\alpha x - \omega_2 t)}.$$

3. Для стальной к.з. обмотки ротора (среда 3):

$$H_{x3} = \frac{m_3}{\mu_3} (C_3 ch m_3 y_3 + D_3 sh m_3 y_3) e^{j(\alpha x - \omega_3 t)}; \quad (12)$$

$$H_{y3} = -j \frac{\alpha}{\mu_3} (C_3 ch m_3 y_3 + D_3 sh m_3 y_3) e^{j(\alpha x - \omega_3 t)}.$$

4. Для массивного, ферромагнитного ротора (среда 4):

$$H_{x4} = \frac{m_4}{\mu_4} (C_4 ch m_4 y_4 + D_4 sh m_4 y_4) e^{j(\alpha x - \omega_4 t)}; \quad (13)$$

$$H_{y4} = -j \frac{\alpha}{\mu_4} (C_4 ch m_4 y_4 + D_4 sh m_4 y_4) e^{j(\alpha x - \omega_4 t)}.$$

Составляющие индукции для соответствующих областей запишутся в следующем виде:

$$B_{y1} = -j\alpha (C_1 shay_\delta + D_1 chay_\delta) e^{j(\alpha x - \omega t)}; \quad (14)$$

$$B_{y2} = -j\alpha (C_2 sh m_2 y_2 + D_2 ch m_2 y_2) e^{j(\alpha x - \omega_2 t)}; \quad (15)$$

$$B_{y3} = -j\alpha (C_3 sh m_3 y_3 + D_3 ch m_3 y_3) e^{j(\alpha x - \omega_3 t)}; \quad (16)$$

$$B_{y4} = -j\alpha (C_4 sh m_4 y_4 + D_4 ch m_4 y_4) e^{j(\alpha x - \omega_4 t)}.\quad (17)$$

Для нахождения постоянных интегрирования используем следующие граничные условия:

- тангенциальные составляющие напряженности магнитного поля на границах сред должны быть непрерывны;
- тангенциальные составляющие напряженностей магнитного поля на поверхности статора $H_{x\delta}$ ($y_\delta = 0$) имеют разрыв, то есть $H_{x\delta} = A_{sm1}$.
- функция векторного магнитного потенциала должна быть непрерывной на границах между средами, тогда на основании уравнений (10-17) с учетом принятых граничных условий, получим систему уравнений для определения постоянных интегрирования:

$$\begin{aligned}
 1. \frac{\alpha}{\mu_0} (C_1 ch \alpha \delta + D_1 sh \alpha \delta) e^{j(\alpha x - \omega t)} &= \frac{C_2 m_2}{\mu_0} e^{j(\alpha x - \omega_2 t)} ; \\
 2. \frac{\alpha}{\mu_0} (C_1 ch \alpha \delta + D_1 sh \alpha \delta) e^{j(\alpha x - \omega t)} &= \frac{C_3 m_3}{\mu_0} e^{j(\alpha x - \omega_3 t)} ; \\
 3. \frac{m_2}{\mu_0} (C_2 ch m_2 \Delta_2 + D_2 sh m_2 \Delta_2) e^{j(\alpha x - \omega_2 t)} &= \frac{C_4 m_4}{\mu_4} e^{j(\alpha x - \omega_4 t)} ; \\
 4. \frac{m_3}{\mu_3} (C_3 ch m_3 \Delta_3 + D_3 sh m_3 \Delta_3) e^{j(\alpha x - \omega_2 t)} &= \frac{C_4 m_4}{\mu_4} e^{j(\alpha x - \omega_4 t)} ; \tag{18} \\
 5. \frac{\alpha}{\mu_0} (C_1 ch \alpha \delta + D_1 sh \alpha \delta) e^{j(\alpha x - \omega t)} &= \frac{C_3 m_3}{\mu_3} e^{j(\alpha x - \omega_4 t)} ; \\
 6. A_{sm} &= \frac{C_1 \alpha}{\mu_0} e^{j(\alpha x - \omega_2 t)} ; \\
 7. (C_1 ch \alpha \delta + D_1 sh \alpha \delta) e^{j(\alpha x - \omega t)} &= D_2 e^{j(\alpha x - \omega_2 t)} ; \\
 8. (C_1 ch \alpha \delta + D_1 sh \alpha \delta) e^{j(\alpha x - \omega t)} &= D_3 e^{j(\alpha x - \omega_3 t)} ; \\
 9. (C_2 sh m_2 \Delta_2 + D_2 ch m_2 \Delta_2) e^{j(\alpha x - \omega_2 t)} &= D_4 e^{j(\alpha x - \omega_4 t)} ; \\
 10. (C_3 sh m_3 \Delta_3 + D_3 ch m_3 \Delta_3) e^{j(\alpha x - \omega_2 t)} &= D_4 e^{j(\alpha x - \omega_4 t)} ; \\
 11. (C_4 sh m_4 \Delta_4 + D_4 ch m_4 \Delta_4) e^{j(\alpha x - \omega t)} &= 0 ; \\
 12. B_{\delta l} &= D_l e^{j(\alpha x - \omega t)} , \\
 \text{где } \Delta_3 &= \frac{2}{\omega_2 \mu_3 \gamma_3} ; \quad \Delta_4 = \frac{2}{\omega_4 \mu_4 \gamma_4} .
 \end{aligned}$$

Решив систему уравнений (18), получим постоянные интегрирования:

$$\begin{aligned}
 C_1 &= \frac{\mu_1 A_{sm}}{\alpha e^{j(\alpha x - \omega t)}} ; \\
 C_2 &= \frac{\mu_2 \alpha (C_1 ch \alpha \delta + D_1 sh \alpha \delta)}{\mu_1 m e^{j(\alpha x - \omega_2 t)}} e^{j(\alpha x - \omega t)} ; \\
 C_3 &= \frac{\mu_3 \alpha (C_1 ch \alpha \delta + D_1 sh \alpha \delta)}{\mu_1 m_3 e^{j(\alpha x - \omega_3 t)}} e^{j(\alpha x - \omega t)} ; \\
 C_4 &= \frac{\mu_4 m_2 (C_2 ch m_2 \Delta_2 + D_2 sh m_2 \Delta_2)}{\mu_2 m_4 e^{j(\alpha x - \omega_4 t)}} e^{j(\alpha x - \omega t)} ; \tag{19} \\
 D_1 &= \frac{B_{\delta l}}{e^{j(\alpha x - \omega t)}} ;
 \end{aligned}$$

$$D_2 = (C_1 sh a \delta + D_1 ch a \delta) e^{j(\omega_2 - \omega)t};$$

$$D_3 = (C_1 sh a \delta + D_1 ch a \delta) e^{j(\omega_3 - \omega)t};$$

$$D_4 = (C_2 sh m_2 \Delta_2 + D_2 ch m_2 \Delta_2) e^{j(\omega_2 - \omega_4)t}.$$

Далее определим электрические напряженности в отдельных областях:
– алюминиевой обмотки ротора

$$E_{Z2} = j\omega_2 (C_2 sh m_2 y_2 + D_2 ch m_2 y_2) e^{j(\alpha x - \omega t)}; \quad (20)$$

– стальной обмотки ротора

$$E_{Z3} = j\omega_3 (C_3 sh m_3 y_3 + D_3 ch m_3 y_3) e^{j(\alpha x - \omega_3 t)}; \quad (21)$$

– массивной ферромагнитной части обмотки ротора

$$E_{Z4} = j\omega_4 (C_4 sh m_4 y_4 + D_4 ch m_4 y_4) e^{j(\alpha x - \omega_4 t)} \quad (22)$$

Выражения токов соответствующих областей запишем в виде:

$$i_s = \int_0^{\tau} A_{sm} e^{j(\alpha x - \omega t)} dx = \frac{2 A_{sm}}{j\alpha} e^{-j\omega t}; \quad (23)$$

$$i_2 = \int_0^{\Delta_2} \int_0^{b_2} \gamma_2 E_{Z2} dx dy = \frac{\gamma_2 \omega_2}{\alpha m_2} \left[C_2 (sh m_2 \Delta_2 - 1) + D_2 sh m_2 \Delta_2 \right] \cdot e^{-j\omega_2 t} (e^{j\alpha b_2} - 1); \quad (24)$$

$$i_3 = \int_0^{\Delta_3} \int_0^{b_3} \gamma_3 E_{Z3} dx dy = \frac{\gamma_3 \omega_3}{\alpha m_3} \left[C_3 (sh m_3 \Delta_3 - 1) + D_3 sh m_3 \Delta_3 \right] \cdot e^{-j\omega_3 t} (e^{j\alpha b_3} - 1); \quad (25)$$

$$i_4 = \frac{\gamma_4 \omega_4}{\alpha m_4} \left[C_4 (sh m_4 \Delta_4 - 1) + D_4 sh m_4 \Delta_4 \right] \cdot e^{-j\omega_4 t} (e^{j\alpha \tau} - 1). \quad (26)$$

Распределение энергии по различным обмоткам можно определить по формуле

$$\Pi_i = \Pi_{ia} + j\Pi_{iq} = \iiint_{V_i}^* \bar{E} H_i^* dx dy dz. \quad (27)$$

Для каждой токовой области потери энергии можно представить в виде уравнения Умова-Пойтинга:

– для алюминиевой к.з. обмотки

$$\Pi_2 = l_2 \int_0^{h_2} \int_0^{b_2} j\omega_2 \frac{m_2}{\mu_0} \left[\left(C_2 sh m_2 y_2 + D_2 ch m_2 y_2 \right) \cdot \left(C_2^* ch m_2^* y_2 + D_2^* ch m_2^* y_2 \right) \right] \cdot e^{j(\alpha x - \omega_2 t)} dx dz; \quad (28)$$

– для стальной к.з. обмотки

$$\Pi_3 = l_3 \int_0^{\Delta_3} \int_0^{t_2} j\omega_3 \frac{m_3}{\mu_3} \left[\left(C_3 sh m_3 y_3 + D_3 ch m_3 y_3 \right) \cdot \left(C_3^* ch m_3^* y_3 + D_3^* ch m_3^* y_3 \right) \right] \cdot e^{j(\alpha x - \omega_3 t)} dx dz; \quad (29)$$

– для ферромагнитной массивной обмотки

$$\Pi_4 = l_2 \int_0^{h_{II}} \int_0^{\frac{\pi D_2}{Z_2}} j\omega_4 \frac{m_4^*}{\mu_4} \left[\begin{pmatrix} C_4 sh m_4 y_4 + D_4 ch m_4 y_4 \\ C_4 ch m_4 y_4 + D_4 sh m_4 y_4 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} * & * \\ * & * \end{pmatrix} \right] e^{j(\alpha x - \omega_4 t)} dx dz. \quad (30)$$

Для сравнения приведены технические показатели ЭГК и серийного асинхронного двигателя 4A355S4У3 (табл. 1).

В табл. 2 представлены технические характеристики ЭГК с двумя последовательно соединенными осевыми насосами и четырьмя совмещенными асинхронными двигателями, каждый мощностью по 250 кВт, и показатели серийного осевого насоса ОВ5-55 с одним насосом и одним асинхронным двигателем мощностью 220 кВт.

Таблица 1

п/№	Выходные показатели	ЭГК	4A355S4У3
1	P _н , кВт	250	250
2	U _н , В	380/660	380/660
3	n _с , об/мин	1500	1500
4	S _н , %	1,92	1,7
5	η, о.е.	87	94,5
6	I ₁ , А	283	252,4
7	Cosφ, о.е.	0,9	0,92
8	K _п	1,52	1,03
9	K _м	2,37	2,11
10	S _{kp}	0,05	0,07
11	K _i	6,1	4,7

Из представленных показателей видно, что для получения у ОВ5-55 такого же напора $H_t=47,3$ м, как в ЭГК, потребуется пять насосов $N_o=5$ общей мощностью $P_t=1100$ кВт.

Таблица 2

Показатели насоса	Обозначения	ЭГК	ОВ5-55
Подача, м ³ /с	Q _t	2,1	1,8
Напор, м	H _t	47,3	10
Диаметр рабочего колеса, м	D _t	0,55	0,55
Число электродвигателей	N _д	1	5
Число осевых насосов	N _н	2	5
Мощность насоса, кВт	P _t	975	1100
Скорость вращения электродвигателя, об/мин	n _t	1500	1000
Коэффициент быстроходности, об/мин	n _s		
Кавитационный запас, м	Δh		

На основании вышеизложенного можно сделать следующий вывод: для разработанной конструкции насосного комплекса были выведены уравнения магнитных и электрических напряженностей, уравнения токов для каждой области, уравнения электромагнитных мощностей, развиваемых каждой токовой средой с учетом взаимного влияния друг на друга.

1. Копылов И.П. Уравнения обобщенного электромеханического преобразователя энергии с N роторами / И.П. Копылов, В.Н. Цой // Известия вузов. Электромеханика. - 1979. - № 8.
2. Келим Ю.М. Совмещенные электрические машины / Ю.М. Келим, И.П. Копылов, Д.В. Свешарник, Л.Х. Шидлович. - М.: Энергия, 1969. - 200 с.
3. Цой В.Н. Основные уравнения асинхронной гидродинамической машины с аксиальным расположением роторов. - М: Электричество, 1990. - № 10.
4. Новодережкин Р.А. Насосные станции систем технического водоснабжения ТЭС и АЭС. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 265 с.
5. Кривченко Г.И. Гидравлические машины. - М.: Энергия, 1978.

Получено 10.04.2013

УДК 669.1574-194
669.187.25(098.8)

В.Н. Волков

ВКГТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск

Н.П. Сергиенко, М.С. Зудова

Восточно-Казахстанский машиностроительный завод, г. Усть-Каменогорск

НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

По принятой практически на всех предприятиях технологии высоколегированные стали выплавляются по следующей схеме: в электросталеплавильную печь загружается углеродистый металл, расплавляется, проводится окислительный период с целью удаления водорода, азота, фосфора, неметаллических включений при окислении углерода. Затем сталь раскисляется углеродом, марганцем, кремнием, алюминием с целью удаления кислорода и серы. После получения белого шлака, содержащего оксид железа (FeO) менее 0,5 %, производится легирование, например стали 110Г13Л – ферромарганцем с отдачей его в дуговую сталеплавильную печь на средний предел по марганцу ~ 13 %. Недостатком подобного способа выплавки являются: повышенный угар марганца, высокая трудоёмкость легирования из-за невозможности механизировать подачу большого количества легирующих в печь, повторное насыщение металла водородом, азотом, кислородом, перерасход раскислителей, длительность восстановительного периода до 60-90 минут, перерасход оgneупоров, снижение качества металла.

В АО «Восточно-Казахстанский машиностроительный завод» был разработан и внедрён наиболее прогрессивный способ получения высоколегированной стали типа 110Г13Л, который заключается в следующем: углеродистая сталь (полупродукт) выплавлялась в электродуговой сталеплавильной печи ДСВ-8 методом окисления, удалялись фосфор, сера, газы, неметаллические включения. В восстановительный период углеродистая сталь хорошо раскислялась марганцем ~ 1÷2 %, кремнием, алюминием. Содержания закиси марганца и железа в шлаке и металле были меньше требуемого по регламенту.

Необходимое количество ферромарганца для легирования углеродистого полупродукта в это же время выплавлялось в индукционной сталеплавильной печи ИСТ-2 с нейтральной футеровкой из корунда Al_2O_3 . Ферромарганец хорошо раскислялся кремнием, алюминием и практически не выгорал. Взвешивание и загрузка его в печь была механизирована. Выплавленный ферромарганец можно легировать хромом, ванадием, титаном, молибденом и другими элементами, насыщать азотом плазмы, активно вмешиваться

в технологический процесс.

После готовности ферромарганец из индукционной печи ИСТ-2 выпускался в сталеразливочный стопорный ковш ёмкостью 10 тонн, в который через минимальное время (10-15 секунд) выпускался углеродистый полупродукт из восьмитонной сталеплавильной печи (рис. 1). Металл в ковше перемешивался, раскислялся алюминием, силикокальцием, ферротитаном. В результате в ковше получилась высокомарганцевая, высококачественная аустенитная сталь типа 110Г13ТЛ, выплавленная дуплекс-процессом.

В АО «Восточно-Казахстанский машиностроительный завод» было выплавлено более 10 тысяч тонн стали 110Г13Л по вышеизложенной технологии. Раскисленность металла отличная, при изгибе пробы «Бартона» трещин не образуется. Балл зерна - 4÷6, т.е. зерно очень мелкое, карбидный балл - 1 – в пределах нормативной документации. Отклонений по химическому составу не наблюдалось. Механизирован и облегчен труд сталеваров. Экономия ферромарганца составила более 5 %. Уменьшился брак по трещинам на 30 % за счёт оптимизации химического состава по углероду и марганцу.

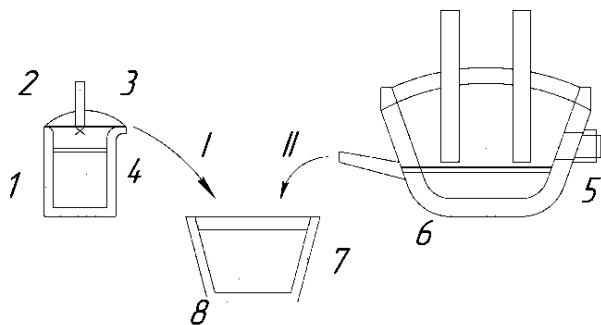


Рисунок 1 – Схема получения стали 110Г13ТЛ дуплекс-процессом: 1 – индукционная печь ИСТ-2; 2 – плазматрон; 3 – крышка печи; 4 – расплавленный ферромарганец; 5 – дуговая сталеплавильная печь ДСВ-8; 6 – углеродистый полупродукт; 7 – ковш разливочный; 8 – марганцовистая сталь типа 110Г13ТЛ; I – выпуск в ковш расплавленного ферромарганца; II – выпуск в ковш углеродистого полупродукта

По описанной технологии кроме стали 110Г13ТЛ выплавлялись стали 110Г8АТЛ, 110Г10АТЛ. По этой технологии можно выплавлять также стали 120Г13Х2БЛ, 130Г14ХМФАЛ, 45Г18Х2Т10Л и другие высоколегированные хромом, никелем, вольфрамом, ванадием, молибденом, кремнием, азотом стали.

В таблице представлены свойства некоторых высокомарганцевых сталей, выплавленных предлагаемым способом.

Свойства высокомарганцевых сталей, изготовленных по предлагаемому способу

Марка стали	Химический состав, %				Механические и эксплуатационные свойства							Время выплавки стали, час
	C	Mn	Si	N	σ_B кгс/ мм ²	σ_T кгс/ мм ²	δ %	ψ %	a_n кгс·м/ см ²	HB	Износ г/тн	
2	3	4	5	6	13	14	15	16	17	18	19	20

110Г13ТЛ	1,10	12	0,70	0,03	76	50	31	20	18,7	215	12,1	3,32
110Г8АТЛ	1,15	8,7	0,53	0,07	75	48	30	20	17,9	218	14,0	2,4
110Г8АТЛ	1,20	8,6	0,57	0,10	73	49	30	20	18,3	213	13,0	2,53
110Г8АТЛ	1,18	8,9	0,43	0,20	76	52	32	22	18,8	220	12,5	2,55
110Г10АТЛ	1,23	10,7	0,48	0,065	77	51	33	21	18,5	216	12,5	2,41
110Г10АТЛ	1,17	10,2	0,53	0,11	74	51	32	24	18,7	210	11,7	2,5
110Г10АТЛ	1,21	10,55	0,68	0,22	77	51	33	24	19	220	11,2	2,54
110Г11АТЛ	1,18	11,4	0,49	0,055	75	52	30	21	19,3	201	12,5	2,35
110Г11АТЛ	1,17	11,7	0,57	0,105	78	51	33	23	20,1	213	11,8	2,44
110Г11АТЛ	1,21	11,0	0,63	0,25	76	50	32	22	20	209	10,9	2,51

Титан отдавался по расчёту на 0,1 % с учётом угара.

Карбидный балл - 1÷2, балл зерна - 4÷5, т.е. зерно очень мелкое.

В понятие качество сталей, в том числе высокомарганцевых 110Г8АТЛ, 110Г10АТЛ, 110Г11АТЛ, входят: химический состав, механические свойства, карбидный балл и балл зерна.

Сталь 110Г13ТЛ взята в качестве эталона и выплавлялась по существующей технологии только в сталеплавильной печи. Остальные стали выплавлялись дуплекс-процессом. Стали качественные имеют размер аустенитного зерна не ниже второго балла по шестигабаритной шкале, загрязнённость карбидами - не выше второго балла по десятибалльной шкале согласно ГОСТ 977-88.

Себестоимость сталей, выплавленных дуплекс-процессом, была на 3,2÷5,7 % ниже, чем сталей, изготовленных по существующей технологии. Уменьшился брак по трещинам.

Преимуществами дуплекс-процесса являются:

- сокращение времени ведения плавки;
- хорошее раскисление обоих расплавов;
- снижение трудоёмкости;
- механизация труда плавильщиков по загрузке ферромарганца в индукционную печь;
- улучшение макро- и микроструктуры стали;
- уменьшение содержания азота, водорода и кислорода в металле;
- улучшение механических свойств стали.

Список литературы

1. Волков В.Н. Способ получения легированной стали / В.Н. Волков, Н.П. Сергиенко. - Изобретение № 15412; Бюл. № 2 от 15.02.2005.
2. Волков В.Н. Производство высокомарганцевистой стали Г13Л. - Усть-Каменогорск: ВКГТУ, 2001.
3. Гудремон Э. Специальные стали. - М.: Металлургия, 1966.

Получено 11.04.2013

УДК 621.78.669.131.6

В.Н. Волков, Н.К. Туленденова
ВКГТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск
Е.И. Парфенова

АО ВКМЗ, г. Усть-Каменогорск

УПРОЧНЕНИЕ СТАЛИ 110Г13Л В ПРОЦЕССЕ КОВКИ В ХОЛОДНОМ СОСТОЯНИИ

Известно, что высокомарганцовистая сталь 110Г13Л имеет большую склонность к упрочнению при холодной деформации в процессе мощного ударно-абразивного износа.

Упрочнение ее имеет сложный характер и обуславливается одновременно действием нескольких факторов в процессе деформации: наклепом за счет увеличения количества дислокаций, фрагментацией кристаллов аустенита в малые блоки мозаики, фазовыми превращениями с образованием α -фазы мартенсита, выделением дисперсных карбидов Mn_3C , Fe_3C .

Образование α -фазы и выделение дисперсных карбидов при наклете не во всех трудах ученых-металловедов находят подтверждение. Одни ученые их обнаруживают, другие опровергают возможность их образования на участках локальной деформации вокруг линий скольжения [2], [3].

На прокатанных образцах, которые использовали для исследования Никонов и Госс [1], максимальная твердость была не на поверхности, а в глубине металла, т.е. на упрочнение стали количество линий скольжения не влияют. Это свидетельствует о том, что упрочнение происходит не столько от возможного превращения метастабильного аустенита в мартенсит, количество которого не превышает 2 %, а связано с другими явлениями. На образцах обнаружены только линии гранецентрированной кубической решетки аустенита. Практическое отсутствие α -фазы мартенсита подтверждено магнитными измерениями.

Марганец, как и аустенит- железо, немагнетен, но многие его соединения (карбиды, нитриды, фосфиры, мышьяковистый и сурьмянистый марганец и др.) ферромагнитны. Магнетизм этих соединений позволяет думать, что в процессе деформации образуется мартенсит, который способствует упрочнению поверхностного слоя [1].

В данной работе для уточнения причин упрочнения высокомарганцовистой литой стали 110Г13Л были отобраны 5 стандартных ударных образцов с повышенными механическими свойствами, мелким зерном и низким карбидным баллом. Образцы в холодном состоянии подвергались ковке со степенями обжатия на 23 %, 35 %, 43 %, 50 % и 53 % (см. табл.).

Результаты испытаний кованых образцов

№ плавки	т°C разливки	Балл зерна	Карбидный балл	Плотность до ковки (г/см ³)	Плотность после ковки (г/см ³)	Уков (%)	HRC на поверхности	HRC в середине	Особенности структуры	Примечания
307	1460	6	1	7,61	7,63	23	47,6	46,5	Светлый слой мелкого зерна на поверхности 2 мм	Трещин нет
319	1510	6	1	7,5	7,55	35	51,5	52	Светлый слой мелкого зерна на поверхности ≈1 мм	Трещин нет
363	1490	6	1	7,6	7,66	43	54,5	5,1	Светлый слой мелкого зерна на по-	Трещин нет

									верхности $\approx 0,8$ мм	
333	1500	5	1	7,55	7,66	50	56	55	Светлый слой мелкого зерна на поверхности $\approx 0,8$ мм	Много макро- и микротрещин
335	1460	5	1	7,75	7,8	53	58	57	Светлый слой мелкого зерна на поверхности $\approx 0,8$ мм	Образцы распадаются на части

Отмечено, что на поверхности кованых образцов после травления появляется мелкозернистый светлый слой толщиной от 0,8 до 2 мм, образующийся, предположительно, за счет свободного течения металла, при деформации в результате ударов. Внутреннее строение образцов до ковки имеет следующие данные: балл зерна аустенита - 6, карбидный балл - 1. На кованых образцах балл зерна аустенита по-прежнему 6-7, карбидный балл - 1, но зерно в процессе деформации вытянулось, уменьшилось сечение. При обжатии на 23 %, 35 % и 43 % трещин на образцах не обнаружено, микро- и макротрещины появляются при более высоких степенях обжатия и завершаются разрушением образцов.

При всех степенях обжатия магнитные свойства незначительно повышаются за счет увеличений количества дисперсных карбидов.

Для определения наличия α -фазы железа использовали насыщенный раствор хлорного железа в концентрированной соляной кислоте (ГОСТ 9391-80) и свежеприготовленную смесь 20 % водных растворов железосинеродистого калия и гидроокиси калия в равных объемах. При обработке шлифов этими реактивами α -мартенсита не обнаружено.

В процессе работы были проведены измерения и получены зависимости плотности стали от температуры разливки и степени укова, также зависимость твердости от степени укова (рис. 1-3).

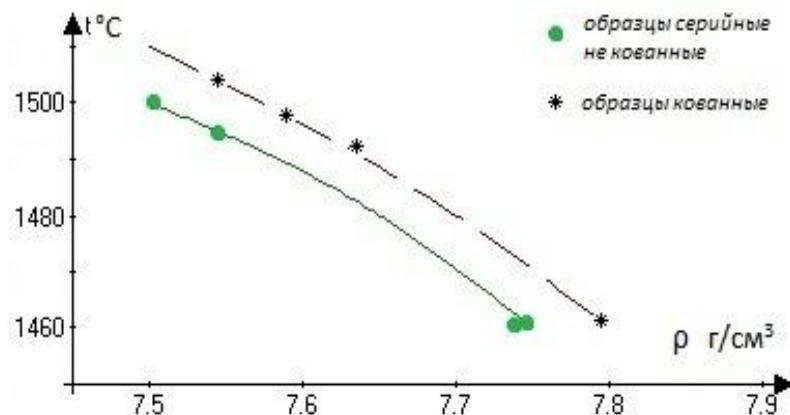


Рисунок 1- Зависимость плотности стали от температуры разливки

Из рис. 1 видно, что плотность стали 110Г13Л повышается с понижением температуры разливки как в литом, так и в кованом состоянии.

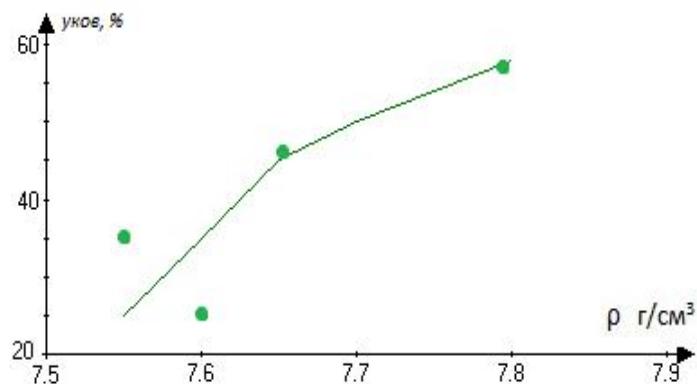


Рисунок 2 - Зависимость плотности стали от степени укова

График на рис. 2 показывает, что с увеличением степени обжатия плотность стали повышается с 7,55 до 7,8 $\text{г}/\text{см}^3$

На рис. 3 показано повышение твердости стали с увеличением укова как на поверхности, так и внутри образцов. Твердость стали на поверхности и внутри образцов практически одинакова, что свидетельствует об объемном наклете на всю толщину образцов.

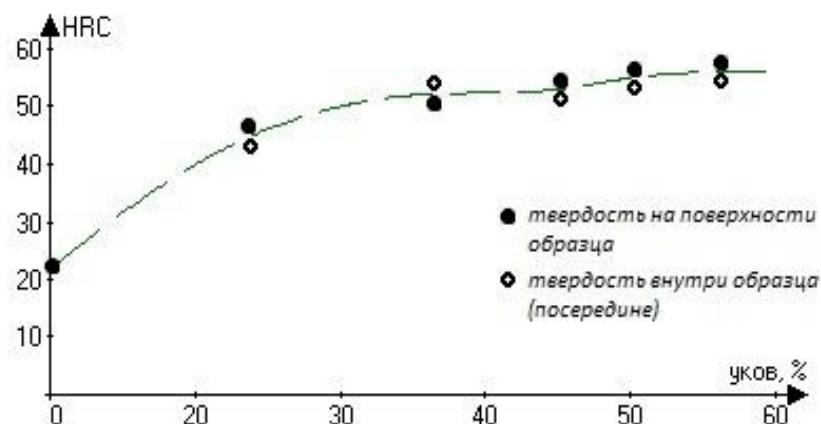


Рисунок 3 - Зависимость твердости стали от укова

Структура литого образца (рис. 4) после закалки от температуры 1100 °С. Балл зерна аустенита - 5÷6, карбидный балл - 1.

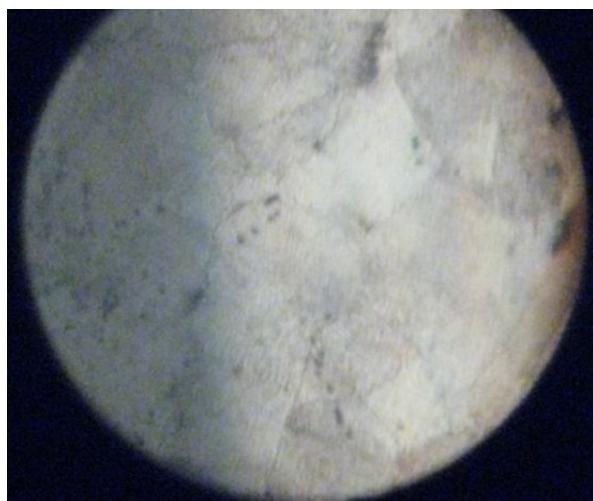


Рисунок 4 - Структура литого образца в исходном состоянии, $\times 370$

При обжатии 50 % (рис. 5,а) число линий скольжения и количество микро- и макротрещин достигло критического значения. При обжатии на 53 % образцы разрушаются.

На микроструктуре образца с обжатием 43 %, полученной на электронном микроскопе, можно увидеть количество малых блоков мозаики с образованием дисперснейших карбидов марганца, которые имеют повышенную твердость (рис. 6).

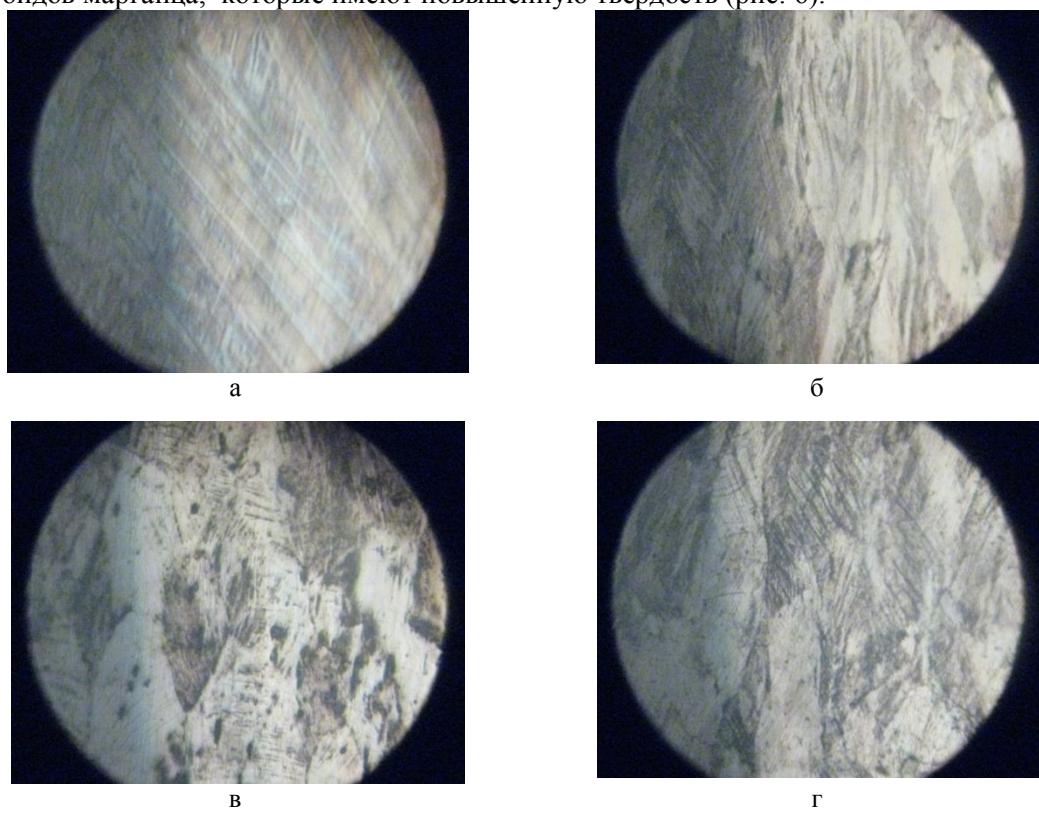


Рисунок 5 - Структура кованых образцов с обжатием 23% (а), 35% (б), 43% (в) и 50% (г), $\times 370$

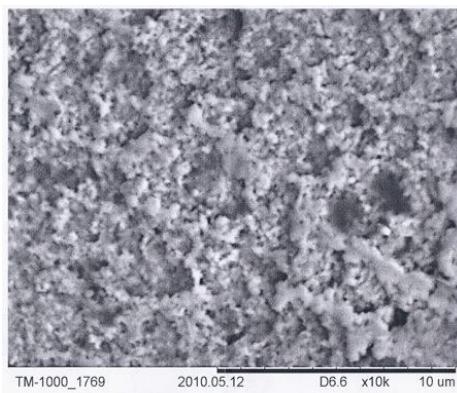


Рисунок 6 - Микроструктура кованого образца с обжатием 43 %

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Упрочнение стали 110Г13Л при ковке (ударах) происходит за счет увеличения в строении металла количества дислокаций, т.е. образования мощного наклена, фрагментации мелких блоков мозаики аустенитного зерна и дисперснейших карбидов марганца, которые имеют высокую твердость и препятствуют рекристаллизации аустенита.
2. Отсутствует α -фаза железа. Небольшое повышение магнитных свойств можно объяснить увеличением количества карбидов марганца и железа.
3. На поверхности кованых образцов выявлен светлый слой очень мелких зерен аустенита, ранее никем не зафиксированный, предположительно, образованный за счет свободного течения металла в процессе ковки.

Список литературы

1. Салли А. Марганец. – М.: Металлургиздат, 1959. – С. 216-219; 255-256.
2. Гудремон Э. Специальные стали. – М.: Металлургия, 1966. – С. 420-421.
3. Повышение качества отливок из стали Г13Л //Под редакцией И.Р. Крянина. – М.: Машиздат, 1963. – С. 182-192.
4. Волков В.Н. Производство высокомарганцовистой стали Г13Л. – Усть-Каменогорск: ВКГТУ, 2001.

Получено 11.04.2013

УДК 532.543.541

Е.А. Нысанов, С.Д. Куракбаева, Р.Е. Нысанов
ЮКГУ им. М. Ауезова, Шымкент

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ТЕЧЕНИЯ ИДЕАЛЬНЫХ ДВУХФАЗНЫХ СРЕД В КАНАЛАХ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

Гетерогенные (многофазные) смеси - смеси газа с каплями и частицами, смесь жидкости с каплями, водонасыщенные грунты и т. д. - в общем случае описываются многоскоростной взаимопроникающей моделью. Правильно выбранная и физически обоснованная

математическая модель движения смеси позволяет успешно решать конкретные задачи гидродинамики.

Рассмотрим случай установившегося одномерного течения в каналах различной формы поперечного сечения. При этом считаем, что обе фазы (вода + твердые частицы) несжимаемы и массовой силой можно пренебречь. Тогда, согласно «взаимопроникающей» модели двухфазных сред, уравнения движения для рассматриваемого случая имеют вид [1-3]:

$$\begin{cases} \rho_1 u_1 \frac{du_1}{dx} = -f_1 \frac{dp}{dx} + k(u_2 - u_1), \\ \rho_2 u_2 \frac{du_2}{dx} = -f_2 \frac{dp}{dx} + k(u_1 - u_2), \end{cases} \quad (1)$$

где ρ_n - приведенная плотность n -й фазы ($n=1,2$); u_n - продольная составляющая скорости n -й фазы; f_n - концентрация (объемное содержание) n -й фазы; P – гидродинамическое давление; k – коэффициент взаимодействия между фазами.

Уравнения неразрывности в силу постоянства расхода фаз имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{d}{dx}(\rho_1 u_1 w) = 0, \\ \frac{d}{dx}(\rho_2 u_2 w) = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где w - площадь живого сечения канала [4]. Приведенные плотности ρ_1 , ρ_2 связаны с истинными плотностями ρ_{1i} , ρ_{2i} следующими зависимостями [5]:

$$\rho_1 = \rho_{1i} \cdot f_1, \quad \rho_2 = \rho_{2i} \cdot f_2.$$

Систему (1), (2) можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} \rho_{1i} u_1 \frac{du_1}{dx} = -\frac{dp}{dx} + \frac{k}{f_1}(u_2 - u_1), \\ \rho_{2i} u_2 \frac{du_2}{dx} = -\frac{dp}{dx} + \frac{k}{f_2}(u_1 - u_2), \\ f_1 u_1 w = \frac{c_1}{\rho_{1i}}, \\ f_2 u_2 w = \frac{c_2}{\rho_{2i}}, \\ f_1 + f_2 = 1, \end{cases} \quad (3)$$

где c_1, c_2 - постоянные, произведение приведенных плотностей, скоростей соответствующих фаз и площади живого сечения канала во входном створе, то есть $c_1 = \rho_{10} u_{10} w_0$, $c_2 = \rho_{20} u_{20} w_0$.

Вычитая из первого уравнения системы (3) второе уравнение, имеем

$$\rho_{1i} u_1 \frac{du_1}{dx} - \rho_{2i} u_2 \frac{du_2}{dx} = \frac{k}{f_1 f_2}(u_2 - u_1). \quad (4)$$

Из последних трех уравнений системы (3) находим:

$$\begin{cases} f_1 = \frac{f_{10}u_{10}w_0}{u_1 \cdot w}, \\ f_2 = \frac{u_1w - f_{10}u_{10}w_0}{u_1w}, \\ u_2 = \frac{f_{20}u_{20}w_0u_1}{u_1 \cdot w - f_{10}u_{10}w_0}. \end{cases} \quad (5)$$

В настоящее время наиболее употребительными формами поперечных сечений (а следовательно, и живых сечений) каналов являются трапецидальная и параболическая. Что же касается прямоугольной формы, то ее можно рассматривать как частный случай трапецидальной.

Каналы трапецидального поперечного сечения. Используя очевидные геометрические соотношения, можем записать выражение для площади живого сечения:

$$w = (b + mH)H,$$

где b – ширина канала по дну; $m = ctg\beta$ – коэффициент заложения откосов; β – угол наклона откосов; H – глубина потока (отметка уровня).

Для прямоугольного поперечного сечения будем, очевидно, иметь $\beta = 90^\circ$, т.е. $m = 0$.

Каналы параболического поперечного сечения. Для поперечных сечений, очерченных по квадратичной параболе с уравнением $z^2 = 2py$ (p – размерная линейная величина, называемая параметром параболы), имеем следующее соотношение для площади живого сечения:

$$w = \frac{4}{3}\sqrt{2pH}H.$$

Для H используем эмпирическую формулу [6]

$$H = H_0 - a_0 \left(1 - e^{-\gamma_0 x} \right),$$

где H_0 – отметка уровня во входном створе; a_0 – степень уменьшения отметки уровня;

γ_0 – степень быстроты уменьшения.

После подстановки (5) в уравнение (4) и несложных преобразований дифференциальное уравнение относительно u_1 принимает вид:

$$\frac{du_1}{dx} = \frac{ku_1^2 w^2 (u_1w - f_{10}u_{10}w_0)(f_{10}u_{10}w_0 + f_{20}u_{20}w_0 - u_1w) - \rho_{2i}f_{20}^2u_{20}^2f_{10}u_{10}w_0^3u_1^3 \cdot \frac{dw}{dx}}{f_{10}u_{10}w_0(\rho_{1i}(u_1w - f_{10}u_{10}w_0)^3 + \rho_{2i}f_{20}^2u_{20}^2f_{10}u_{10}w_0^3)},$$

которое решается с начальным условием $u_1 = u_{10}$. Далее из (5) находим f_1, f_2 и u_2 , а скорость смеси определяется по формуле $f_1u_1 + f_2u_2$.

Расчеты проводились в среде Mathcad [7] при следующих исходных данных:

$$\rho_{1i} = 100 \text{ кг}\cdot\text{с}^2/\text{м}^4, \rho_{2i} = 350 \text{ кг}\cdot\text{с}^2/\text{м}^4, k = 200 \text{ кг}\cdot\text{с}/\text{м}^4, f_{10} = 0,8, f_{20} = 0,2, u_{10} = 0,8 \text{ м/с},$$

$$u_{20} = 0,5 \text{ м/с}, a_0 = 0,3 \text{ м}, \gamma_0 = 11/\text{м},$$

$$b = 3 \text{ м}, H_0 = 2 \text{ м} \text{ (для прямоугольного сечения)},$$

$b=1\text{ м}$, $m=1$, $H_0=2\text{ м}$ (для трапециoidalного сечения),
 $p=3\text{ м}$, $H_0=1,5\text{ м}$ (для параболического сечения).

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы: сопоставление результатов расчета для различных форм поперечных сечений канала (при равных площадях) показывает, что скорость смеси в параболической форме поперечного сечения больше, чем в прямоугольной и трапециoidalной формах (рис. 1). На рис. 2 приведено изменение скоростей фаз вдоль течения для параболического сечения.

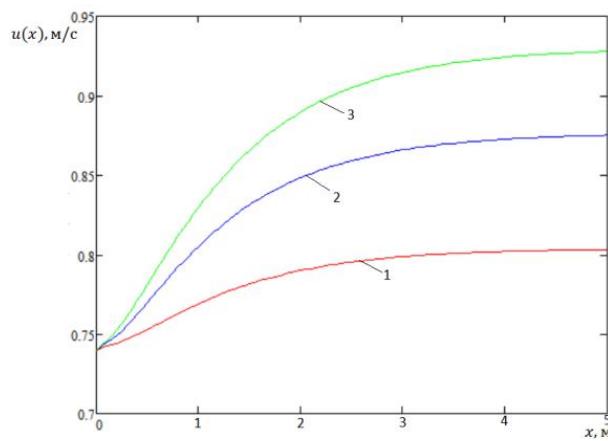


Рисунок 1 - Изменение скорости смеси вдоль течения: 1 - прямоугольное сечение;
2 - трапециoidalное сечение; 3 - параболическое сечение

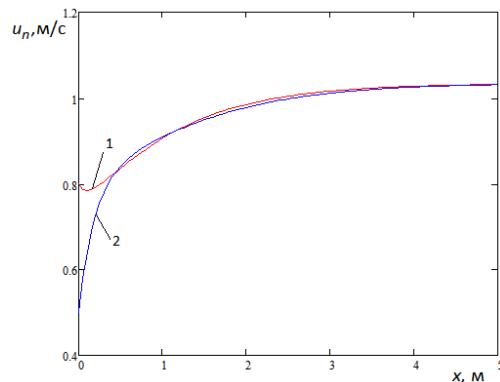


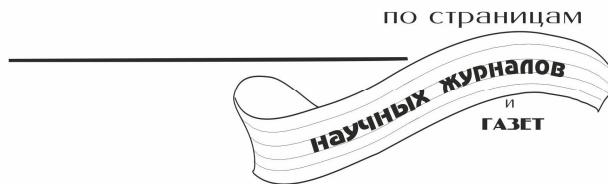
Рисунок 2 - Изменение скорости смеси вдоль течения для параболического сечения:
1 - скорость первой фазы; 2 - скорость второй фазы

Список литературы

- Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. - М.: Наука, 1987. - ч. 1, 2. - 464 с.
- Файзуллаев Д.Ф. Гидродинамика одно- и двухфазных сред и её приложения / Д.Ф. Файзуллаев, А.И. Умаров, А.А. Шакиров. - Ташкент: Фан, 1980. - 164 с.
- Умаров А.И. Двумерные задачи гидродинамики многофазных сред /А.И. Умаров, Ш.Х.Ахмедов. - Ташкент: ФАН, 1989. - 96 с.
- Чугаев Р.Р. Гидравлика. - М.: Энергия, 1975. - 599 с.
- Баринов В.А. Распространение волн по свободной поверхности слоя двухфазной среды

- с неоднородной концентрацией дисперсной фазы / В.А. Баринов, Н.Н. Бутакова // Прикладная механика, техническая физика. - 2004. - Т. 45. - № 4. - с. 26-33.
6. Нысанов Е.А. Исследование влияния фильтрации на гидродинамические характеристики потока со свободной поверхностью // Поиск. Сер. естеств. и тех. наук. - 2003. - № 2. - С. 211-218.
7. Дьяконов В.П. Энциклопедия Mathcad 2001i и Mathcad 11. - М.: СОЛОН-Пресс, 2004. - 831 с.

Получено 20.05.2013



СЕКРЕТНОСТЬ НА КОНЧИКЕ ПАЛЬЦА

В США начал выпуск микросхемы, шифрующей разговоры по сотовому телефону. Она вставляется в любой телефон, имеющий гнездо для карты памяти, и превращает речь в невнятный шум. Чтобы собеседник вас понимал, его аппарат должен иметь такое же устройство. Подслушать разговор просто невозможно.

«Наука и жизнь» № 4, 2011