

УДК 621.746.047:669.18.046.001.57

В.В. Стулов, Н.А. Богданова

Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН (г. Комсомольск-на-Амуре)

**ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ
ПОЛОЙ СТАЛЬНОЙ ОТЛИВКИ В КОКИЛЕ**

Аннотация. Приведены результаты разливки в кокиль свинцово-сурьмянистого сплава с установленной в нем тепловой трубой. Получены толщины корочек сплава и время образования отливки. Из условия равенства определяющих критериев подобия Fo (Фурье) и Ko (Коссовича) найдены для натуральных условий необходимое время заливки в кокиль стали, температуры поверхности тепловой трубы и стенки кокиля.

Ключевые слова: физическое моделирование, полая стальная отливка, кокиль, свинцово-сурьмянистый сплав.

**PHYSICAL MODELING OF THE COOLING
HOLLOW STEEL CASTING IN A METAL MOLD**

Abstract. The article shows the results of chill casting of lead-antimony alloy with established first heat pipe in it. Thickness of crusts and the formation of the alloy casting are obtained. From the condition of equality of the defining criteria of Fo (Fourier) and Ko (Kossovich) similarities time needed for chill cast, the surface temperature of heat pipe and walls of chill mold are found for the field conditions.

Keywords: physycal modeling, hollow steel casting, metal mold, lead-atimony alloy.

Процессам охлаждения стальных отливок, в том числе полых, получаемых в кокильных машинах и в кристаллизаторах машин непрерывной разливки стали (МНРС), отводится одна из главных ролей. От конструктивного исполнения формирующего устройства (кокиля, кристаллизатора) и системы его охлаждения [1, 2] зависят качество отливок, производительность процесса, срок службы устройств, расход топливно-энергетических ресурсов, экология на разливочном участке.

В работе [3] приведены результаты физического моделирования разливки свинцового сплава в металлическую емкость с установленной в ней водоохлаждаемой тепловой трубой. Недостаток работы заключается в сравнительно малых размерах модели с тонкой стенкой, что затрудняет анализ тепловых процессов. Установленное в рассматриваемой работе максимальное ($q = 70$ кВт/м²) значение плотности теплового потока от разливаемого металла может быть использовано для анализа затвердевания отливки. В работе [4] приведены результаты физического моделирования получения непрерывной заготовки из свинцового сплава в стальном кристаллизаторе лабораторной установки, при этом установленные максимальные значения плотности тепловых потоков $q > 70 - 100$ кВт/м².

Технологический процесс получения полрой отливки осуществляется в стальном кокиле с установленным в нем сердечником (тепловой трубой), охлаждаемой воздухом, подаваемым от вентилятора. Тепловая труба устанавливается по центру кокиля и фиксируется в этом положении стенками. Перед разливкой сплава осуществляется разогрев кокиля газовой горелкой. В процессе заливки в кокиль сплава, его кристаллизации и охлаждении происходит нагрев стенок кокиля и тепло-

вой трубы с находящимся в ней теплоносителем. После разогрева тепловой трубы и теплоносителя до рабочей температуры его пары поднимаются в зону охлаждения трубы, обдуваемой воздухом, и конденсируются.

В процессе получения полрой отливки в кокиле (рис. 1) проводили измерения температур поверхности стенки тепловой трубы, стенки кокиля и наружной поверхности кокиля.

Цель работы – моделирование на свинцово-сурьмянистом сплаве процесса получения полрой стальной отливки в кокиле с охлажденным сердечником.

На рис. 1 приведен внешний вид кокиля с установленным в нем сердечником. Предварительно перед разливкой металла кокиль и тепловая труба прогреваются газовой горелкой.

Исходные данные. *Параметры стального кокиля:*
 $m_k = 21,6$ кг; $F_{кн} = 3,44 \cdot 10^{-2}$ м².

Параметры стальной тепловой трубы – сердечника:
 $m_t = 4,62$ кг; $m_{тн} = 2,5$ кг; $m_{то} = 2,12$ кг; $F_{тн} = 2,94 \cdot 10^{-2}$ м²;
 $F_{то} = 0,109$ м²; $\delta_{тн} = 0,01$ м; $\delta_{то} = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м.

Параметры отливки из сплава Pb – Sb: $F_o = 0,48 \cdot 10^{-2}$ м²;
 $V_o = 0,544 \cdot 10^{-3}$ м³; $\delta_o = 0,02$ м; $m_o = 6,17$ кг.

Параметры разливки сплава Pb – Sb в кокиль: $\tau_3 = 20$ с;
 $t_0 = 305$ °С; $Q_{кр} = 142$ кДж.

Теплофизические параметры сплава Pb – Sb и теплофизические свойства теплоносителя определяются из работы [5]; теплофизические параметры стали марки 08X18H10T – из источников [6, 7]; теплофизические свойства стали (материала стенок кокиля и тепловой трубы) и теплофизические свойства воздуха – из работы [6].

Здесь приняты обозначения: a – коэффициент температуропроводности, м²/с; b – толщина грани, м; C_p – теплоемкость, Дж/(кг·К); d – диаметр, м; H – вы-

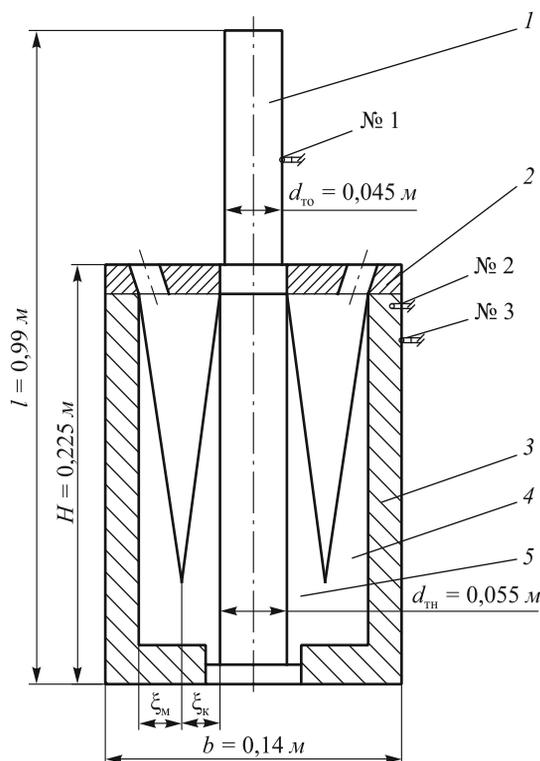


Рис. 1. Внешний вид кокиля для получения полых отливок:
1 – тепловая труба; 2 – крышка; 3 – кокиль; 4, 5 – корочки металла;
№ 1 – № 3 – термопары

сота, м; F – площадь, m^2 ; V – объем, m^3 ; m – масса, кг; l – длина, м; δ – толщина стенки слоя, м; ω – скорость, м/с; x – характерный размер, м; Q' – количество теплоты, Дж; q – плотность теплового потока, Вт/ m^2 ; Q – тепловой поток, Вт; t – температура, $^{\circ}C$; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); ρ – плотность, кг/ m^3 ; ν – коэффициент кинематической вязкости, m^2/s ; r – удельная теплота фазового перехода, Дж/кг; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/($m^2 \cdot K$); μ – динамическая вязкость, Па·с; τ – время, с; Δt – перепад температур, $^{\circ}C$; ξ – толщина корочки, м; β – коэффициент застывания, $m/c^{0,5}$; безразмерные критерии подобия: $Pt = \mu C_p / \lambda$ – критерий Прандтля; $Re = \omega l / \nu$ – критерий Рейнольдса; $Nu = \alpha l / \lambda$ – критерий Нуссельта; $Fo = \alpha t / x^2$ – критерий Фурье; $Ko = \frac{r + C_1(t_0 - t_{кр})}{C_2(t_{кр} - t_b)}$ – критерий Коссовича; ин-

дексы: «в» – воздух, среда; «к» – кокиль, контакт, кипение; «кр» – кристаллизация; «кн» – конденсация; «л» – ликвидус; «м» – модель, металл; «н» – нагрев, теплоноситель, натуральный, наружный; «о» – отливка, охлаждение, начальный; «пл» – плавление; «с» – солидус; «с» – насыщение; «т» – труба, турбулентный; «1» – внутренние зоны нагрева, жидкий; «2» – внутренние зоны охлаждения, твердый.

Результаты исследований. На рис. 2 приведены зависимости температур на поверхности охлаждаемого сердечника и в стенке кокиля от времени их предварительного прогрева. Из него следует, что после 80 $^{\circ}C$

наблюдается резкое увеличение температуры поверхности трубы (кривая 1), что связано с повышением эффективности передачи в ней тепла. При этом максимальное значение температуры поверхности тепловой трубы перед разливкой в кокиль сплава $t_{тн} = 177 \text{ }^{\circ}C$, а в стенке кокиля – $t_{кн} = 140 \text{ }^{\circ}C$ (кривая 2).

На рис. 3 приведена зависимость температуры стенки кокиля от времени после заливки в него расплава, из которого следует, что температура стенок кокиля увеличилась со 140 до 160 $^{\circ}C$, т.е. $\Delta t = 20 \text{ }^{\circ}C$, а наружной поверхности стенки – со 125 до 140 $^{\circ}C$.

Количество тепла, отданного расплавом в стенку кокиля, определяется по уравнению теплового баланса

$$Q'_k = C_k m_k \Delta t. \quad (1)$$

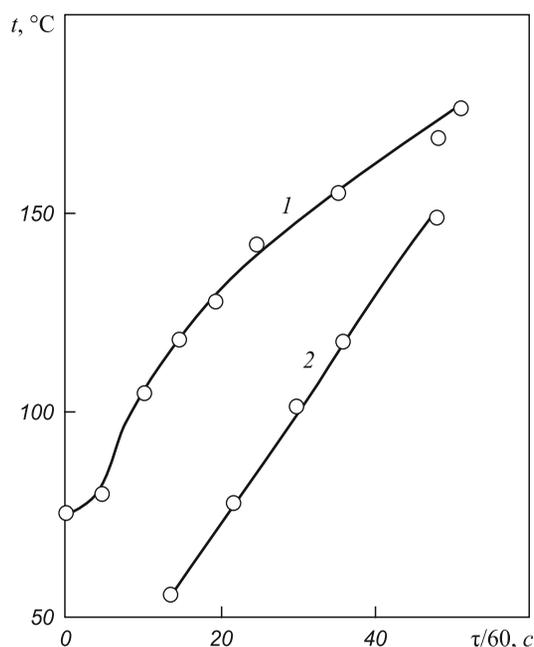


Рис. 2. Зависимости температур поверхности тепловой трубы и стенки кокиля от времени их прогрева:
1 – тепловая труба; 2 – стенка кокиля

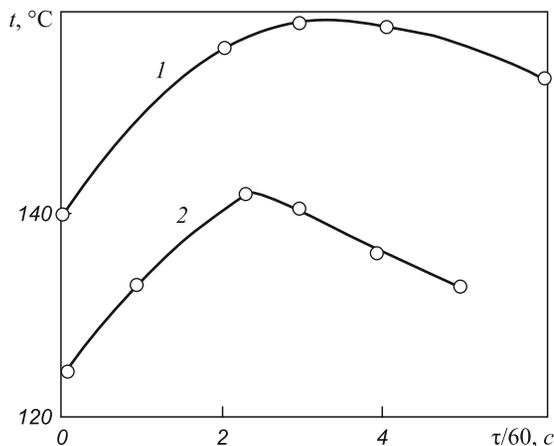


Рис. 3. Зависимости температур стенки кокиля от времени после заливки сплава:
1 – в металле стенки; 2 – снаружи стенки кокиля

После подстановки в приведенное уравнение исходных данных: $C_k = 500$ Дж/(кг·К), $m_k = 21,6$ кг получаем $Q'_k = 216 \cdot 10^3$ Дж. При времени разогрева кокиля $\tau = 120$ с (рис. 3) тепловой поток в стенки кокиля составит $Q_k = 1880$ Вт, при сравнении его со значением $Q_k = 2408$ Вт получаем, что расхождение не превышает 25 % и определяется заданием в расчете максимального значения $q = 70 \cdot 10^3$ Вт/м², а не среднего \bar{q} .

За время заливки расплава $\tau_3 = 20$ с количество тепла расплава, затраченного на разогрев трубы $Q'_T = 42 \cdot 10^3$ Дж. Суммарное значение $Q'_k + Q'_T = 258 \cdot 10^3$ Дж. Для тепловой трубы (сердечника) при $q = 70 \cdot 10^3$ Вт/м² и $F_{TM} = 2 \cdot 10^{-2}$ м² в процессе разливки значение теплового потока в тепловую трубу $Q_T = 1400$ Вт. Для стального кокиля при $q = 70 \cdot 10^3$ Вт/м² и $F_k = 3,44 \cdot 10^{-2}$ м² имеем $Q_k = 2408$ Вт.

По соотношению $\frac{Q_{кр}}{Q_T + Q_k}$ определим время τ отвода теплоты при кристаллизации сплава, которое получили равное 37 с.

Температура контакта между отливкой и тепловой трубой (стенкой кокиля) в начальный период разливки определяется по выражению [8]

$$t_k = \frac{t_o + K_b t_{кн}}{1 + K_b}, \quad (2)$$

где t_o и $t_{кн}$ – начальная температура металла отливки и стенки тепловой трубы (кокиля); $K_b = b_2/b_1 = \sqrt{C_2 \rho_2 \lambda_2} / \sqrt{C_1 \rho_1 \lambda_1}$ – критерий теплоаккумулирующих способностей тепловой трубы (стенки кокиля) b_2 и металла отливки b_1 .

После подстановки в приведенное выше выражение исходных данных $t_o = 300$ °С, $t_{кн} = 177$ и 150 °С получаем $b_1 = 7,51 \cdot 10^3$ и $b_2 = 12,8 \cdot 10^3$ Дж/(м²·К·с^{0,5}); $K_b = 1,7$; $t_{кн} = 223$ и 206 °С – температуры между отливкой и тепловой трубой и между отливкой и стенкой кокиля.

Коэффициент теплоотдачи при заливке сплава в кокиль определяется из критериального уравнения [9]

$$Nu = 0,343 Re^{0,5} Pr^{0,4}, \quad (3)$$

где в выражениях Nu и Re в качестве характерного параметра записывается толщина δ_T турбулентного пограничного слоя, определяемая по формуле

$$\delta_T = \frac{5,83 \sqrt{vx}}{\omega^{0,5} Pr^{0,4}}; \quad (4)$$

здесь $x = 0,08$ м – расстояние от верхней части кокиля до рассматриваемого сечения.

При параметрах полой отливки $F_o = 0,48 \cdot 10^{-2}$ м², $V_o = 0,544 \cdot 10^{-3}$ м³, времени заливки кокиля металлом $\tau = 20$ с получаем значение скорости заливки $\omega = 5,7 \cdot 10^{-3}$ м/с. После подстановки в приведенные выражения исходных данных получаем: $\delta_T = 64,6 \cdot 10^{-3}$ м; $Re = 1674$; $Nu = 2,25$ и $\alpha_m = 1219$ Вт/(м²·К).

Плотность теплового потока в стенку тепловой трубы q_T и кокиля q_k при заливке расплава определяется по формуле

$$q = \alpha_m (t_o - t_k). \quad (5)$$

После подстановки в уравнение (5) исходных данных получаем значения $q_T = 10^5$ Вт/м² и $q_k = 1,207 \cdot 10^5$ Вт/м². При площади поверхности контакта трубы с расплавом $F_T = 2 \cdot 10^{-2}$ м² и кокиля $F_k = 3,44 \cdot 10^{-2}$ м² при времени заливки расплава $\tau = 20$ с получаем количество тепла расплава, переданного соответственно тепловой трубе $Q_T = 40 \cdot 10^3$ Дж и кокилю $Q_k = 83 \cdot 10^3$ Дж. Общее количество тепла расплава, переданного при заливке в кокиль $Q_3 = 123 \cdot 10^3$ Дж.

Анализ теплообмена в тепловой трубе. При установленном значении $t_{кр} = 223$ °С, плотности теплового потока $q = 70 \cdot 10^3$ Вт/м² в тепловую трубу от разливаемого сплава из формулы

$$q = \frac{\lambda \Delta t_n}{\delta_{тн}} \quad (6)$$

определяется перепад температур $\Delta t_n = t_{кр} - t_1$ в зоне нагрева трубы и температура t_1 на ее внутренней поверхности. После подстановки в уравнение (6) исходных данных получаем $\Delta t_n = 17$ °С и $t_1 = 206$ °С. Значения коэффициентов теплоотдачи при кипении α_k и конденсации $\alpha_{кн}$ теплоносителя в трубе принимается из результатов анализа теплообмена в тепловой трубе [10] при охлаждении металла в форме: $\alpha_k = 4677$ Вт/(м²·К) и $\alpha_{кн} = 810$ Вт/(м²·К).

Температура t_s насыщения теплоносителя в тепловой трубе определяется из выражения

$$q = \alpha_k (t_1 - t_s), \quad (7)$$

после подстановки в которое исходных данных получаем $t_s = 191$ °С.

Средняя температура t_2 внутренней поверхности тепловой трубы в зоне охлаждения определяется по формуле

$$q = \alpha_{кн} (t_s - t_2), \quad (8)$$

после подстановки исходных данных в которое получаем $t_2 = 105$ °С.

Температура t'_2 наружной поверхности тепловой трубы в зоне охлаждения определяется из уравнения (6) при $\Delta t = t_2 - t'_2$, после подстановки в которое исходных данных при $\delta_{то} = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м получаем $\Delta t = 4$ °С и $t'_2 = 101$ °С.

Теплообмен в зоне охлаждения тепловой трубы с воздухом описывается критериальным выражением [6]

$$Nu = 0,332 Re^{0,5} Pr^{0,33} \left(\frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25}. \quad (9)$$

После подстановки в формулу (9) исходных данных: $\omega_b = 1,5$ м/с; $d_{то} = 4,5 \cdot 10^{-2}$ м; $v_b = 0,166 \cdot 10^{-4}$ м²/с; $\lambda_b = 2,65 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К); $Pr = 0,71$, получаем $Re = 4100$; $Nu = 18,6$ и $\alpha_b = 11$ Вт/(м²·К).

Тепловой поток, отводимый воздухом с поверхности зоны охлаждения тепловой трубы, определяется по выражению

$$Q_b = \alpha_k F_{то} \Delta t, \quad (10)$$

где $\Delta t = t'_2 - t_b$ – перепад температур между поверхностью тепловой трубы и воздухом.

После подстановки в уравнение (10) исходных данных: $F_{то} = 0,109$ м²; $t'_2 = 101$ °С и $t_b = 30$ °С; $\alpha_b = 11$ Вт/(м²·К) получаем $Q_b = 85$ Вт. В результате количество тепла, отданного тепловой трубой в окружающую среду за характерное время $\tau = 120$ с определяется из выражения баланса тепла

$$(C_o m_o t_o + Q_{кр}) - (Q'_к + Q'_м) = C_o m_o t'_o. \quad (11)$$

После подстановки в приведенное выражение исходных данных: $Q_k = 2408$ Вт и $Q_t = 1400$ Вт; $m_o = 6,17$ кг; $t_o = 305$ °С получаем $t'_o = 168$ °С.

Толщина корочки отливки, образующаяся на стенке тепловой трубы ξ_t и стенке кокиля ξ_k , определяется по выражению

$$\xi = \beta \sqrt{\tau}, \quad (12)$$

где $\beta = \sqrt{\lambda / (r\rho)} \sqrt{t_o - t_k}$ – коэффициент затвердевания металла.

После подстановки в приведенные выражения исходных данных: $t_k = t_{кт} = 223$ °С; $t_o = t_{кк} = 206$ °С получаем $\xi_t = 3,25 \cdot 10^{-3} \sqrt{\tau}$, $\xi_k = 3,59 \cdot 10^{-3} \sqrt{\tau}$.

На рис. 4 приведены зависимости толщин корочек ξ_t и ξ_k от времени затвердевания отливки при условии, что максимальное значение $(\xi_t + \xi_k) = \delta_o = 0,02$ м. Из рис. 4 следует, что максимальные значения $\xi_t = 9,5 \cdot 10^{-3}$ м и $\xi_k = 10,5 \cdot 10^{-3}$ м достигаются за $\tau_m = 8,5$ с.

При установленных параметрах разливки в кокиль свинцово-сурьмянистого сплава определим параметры разливки в кокиль стали.

Из равенства критериев подобия Фурье $Fo_m = Fo_n$ определяется время заливки в кокиль стали τ_n при условии, что $x_m = x_n = l = 0,114$ м. Тогда после подстановки в выражения Fo_m и Fo_n исходных данных при $\tau_m = 20$ с получаем: $\tau_n = 4,7\tau_m$ и $\tau_n = 94$ с. При формировании толщины отливки $\delta_m = \delta_n = 0,02$ м для натуральных условий при $\tau_m = 8,5$ с значение $\tau_n = 40$ с.

Из равенства критериев Коссовича $Ko_m = Ko_n$ определяется для натуральных условий температура t_b окружающей среды, под которой подразумевается температура стенки кокиля $t'_{кк}$ и тепловой трубы $t'_{кт}$. В результате подстановки в критерий Ko_m параметров при разлив-

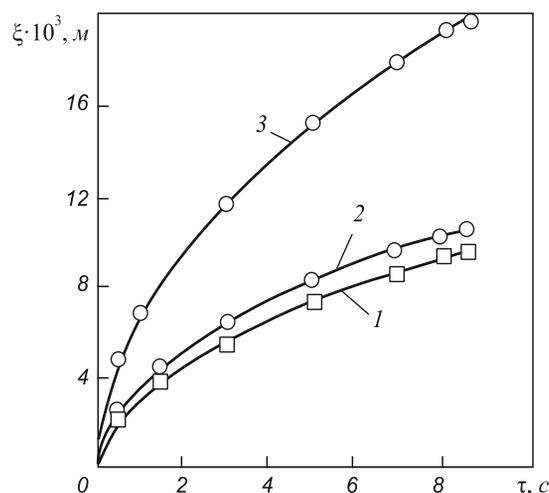


Рис. 4. Зависимости толщин корочек отливки от времени: 1 – на стенке тепловой трубы; 2 – на стенке кокиля; 3 – суммарное значение

ке сплава и $t_{кк} = 206$ °С получаем значение $Ko_m = 1,72$. При $t_{кт} = 223$ °С имеем $Ko_m = 2,1$. Тогда при разливке стали и $t_{он} = 1486$ °С получаем значения $t'_{кк} = 1098$ °С; $t'_{кт} = 1156$ °С.

Выводы. Выполненное моделирование охлаждения полый стальной отливки на свинцово-сурьмянистом сплаве в кокиле с тепловой трубой позволяет определить необходимое время формирования заданной толщины отливки, температуры стенок кокиля и тепловой трубы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. № 2419511 РФ. Устройство для получения отливок / Стулов В.В., Макаров С.С., Севастьянов А.М. // Изобретения. Полезные модели. 2011. № 15. С. 5.
2. Пат. № 2424872 РФ. Способ получения отливок в кокиле / Стулов В.В., Макаров С.С., Севастьянов А.М. // Изобретения. Полезные модели. 2011. № 21. С. 6.
3. Стулов В.В., Макаров С.С., Севастьянов А.М. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 10. С. 12 – 16.
4. Одинокоев В.И., Стулов В.В. Литейно-ковочный модуль (литье и деформация). – Владивосток: Дальнаука, 1998. – 150 с.
5. Теплофизические свойства веществ. Справочник / Под ред. Н.Б. Варгафтика. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 386 с.
6. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент. Справочник. / Е.В. Аметистов, В.А. Григорьев, Б.Т. Ельцев и др. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 512 с.
7. Островский О.И., Григорян В.А., Вишкарев А.Ф. Свойства металлических расплавов. – М.: Металлургия, 1988. – 304 с.
8. Петриченко А.М. Теория и технология кокильного литья. – К.: Техніка, 1967. – 250 с.
9. Специальные способы литья. Справочник. / В.А. Ефимов, Г.А. Анисович, В.Н. Бабич и др. – М.: Машиностроение, 1991. – 736 с.
10. Стулов В.В., Севастьянов А.М. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2011. № 2. С. 66 – 71.