

средства обработки информации. В случае числового представления таблиц и хранения их в реляционном виде позволяет использовать методы работы с иерархическими базами, что дает возможность обрабатывать большие объемы фактографических данных. Для обработки таблиц необходимо вводить признак вида таблицы, позволяющий однозначно проводить необходимый вид обработки.

Таблицы фактографических данных в БД «Металлургия» в основном представляется в текстовом виде в реляционной форме. Каждая таблица имеет заголовок и поля, что делает ее уникальной в базе и накладывает требования на увязку ее с другими таблицами (однотипность названия для семантически связанных столбцов).

Графика может иметь два вида представления в базе. В одном случае всю графику вносят в базу, в другом случае база хранит только ссылки, а сама графика в файлах вне базы. При малых объемах анимации, ее также можно хранить в базе, при больших объемах желательно выносить во внешние файлы. При частом динамическом обновлении базы внешнее хранение графики представляется целесообразным для повышения скорости обновления базы, в противном случае графику можно хранить в базе.

Анимацию также можно хранить в базе, при больших объемах желательно выносить во внешние файлы. При частом динамическом обновлении базы внешнее хранение графики представляется целесообразным для повышения скорости обновления базы, в противном случае графику можно хранить в базе.

Выводы

Таким образом, для полноты хранения вышеописанной информации используется блочно-индексный способ представления данных в файле. Каждый тип информации идентифицируется указателем, позволяющим переходить к необходимому отрезку информации. Каждый элемент однотипной информации идентифицируется указателем и длиной, что позволит выполнять поиск по соответствующим признакам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тогобицкая Д. Н. О паспортизации экспериментальных материалов для банка данных «Металлургия» / Д. Н. Тогобицкая, Г. И. Жмойдин, Э. В. Приходько [и др.] // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. — 1988. — № 8. — С. 136–139.
2. Тогобицкая Д. Н. Развитие и актуализация математического обеспечения банка данных «Металлургия» / Д. Н. Тогобицкая, Ю. М. Лихачев, О. И. Варивода // Тезисы 2-го Всесоюзного совещания «Базы физико-химических и технологических данных для оптимизации металлургических технологий». — Курган. Полиграфист. — 1990.
3. Тогобицкая Д. Н. Оптимизация металлургических технологий и концепция создания информационно-интеллектуальных систем / Д. Н. Тогобицкая, А. Ф. Хамхотько, Ю. М. Лихачев // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. науч. тр. — Киев. Наукова думка. — 1995. — С. 242–249.

пост.15.06.12

Аналитический расчет температурного поля покрытия и подложки при газотермическом напылении

ГОРБУНОВ А. Д.^{*}, БЫКОВСКИЙ О. Г.^{**}, ПАСЬКО А. Н.^{**}

Днепродзержинский государственный технический университет^{*}
Запорожский национальный технический университет^{**}

Разработана инженерная методика расчета полей температур в композите покрытие–подложка при нанесении газотермических покрытий.

Розроблена інженерна методика розрахунку полів температур у композиті покриття – підложка при нанесенні газотермічних покриттів.

Engineering method for calculation of the temperature fields in the composite coating-mount when applied gas-thermal coatings has been developed.

Постановка проблемы и анализ публикаций.

В работах [1, 2, 3] численно исследуется поле температур в системе покрытие-подложка. Задача решалась при переменных теплофизических свойствах материала в приближении Л.С. Лейбензона:

1) процесс напыления является квазистационарным;

2) так как толщина покрытия, как правило, мала ($\delta_1 = 0,1 \dots 0,5$ мм), то с достаточной степенью точности

можно считать профиль температуры в покрытии линейным.

Решалось одномерное уравнение теплопроводности (рис. 1):

$$C_v(t) \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial z} \right), \quad (1)$$

с начальным

$$t(z, 0) = t_0 \quad (2)$$

и граничными условиями

$$\frac{\partial t}{\partial z}\Big|_{z=0} = 0, \tag{3}$$

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial z}\Big|_{z=\delta} = q_{\text{п}}, \tag{4}$$

где $t(z, \tau)$ — искомое поле температур в подложке, °С; t_0 — начальная температура, °С; $C_v = c\rho$ — объемная теплоемкость, Дж/м³К; c , ρ , λ — массовая теплоемкость (Дж/м³К), плотность (кг/м³) и теплопроводность (Вт/мК) подложки.

Плотность теплового потока $q_{\text{п}}$, идущего на нагрев покрытия и основы, согласно [3] можно представить в виде:

$$q_{\text{п}} = q_{\text{ж}} + q_{\text{г}}, \tag{5}$$

где $q_{\text{ж}}$ и $q_{\text{г}}$ — плотности потока энергии жидких напыляемых частиц и высокотемпературного газа соответственно.

На основании данных [4] известно, что доля тепловой энергии, вносимой в изделие нагретым газом, резко уменьшается с увеличением расстояния ℓ от горелки до изделия.

Обычно $\ell \geq 100$ мм и тепловым потоком $q_{\text{г}}$ от газовой составляющей можно пренебречь и считать

$$q_{\text{п}} = q_{\text{ж}} = [c_1 \rho_1 (t_{\text{пл}} - t_{\text{пл}}) + \rho_1 L_1] \cdot \nu, \tag{6}$$

где c_1 , ρ_1 — теплоемкость (Дж/кгК) и плотность (кг/м³) покрытия; $t_{\text{пл}}$ и L — температура плавления (°С) и теплота плавления (Дж/кг); $\nu = ds/d\tau$ — скорость напыления (м/с); $s(\tau)$ — текущая толщина покрытия (м).

Заметим, что удельный тепловой поток $q_{\text{п}}$, определяемый выражением (6), является переменной величиной, зависящей от температуры поверхности покрытия $t_{1\text{п}}(\tau)$.

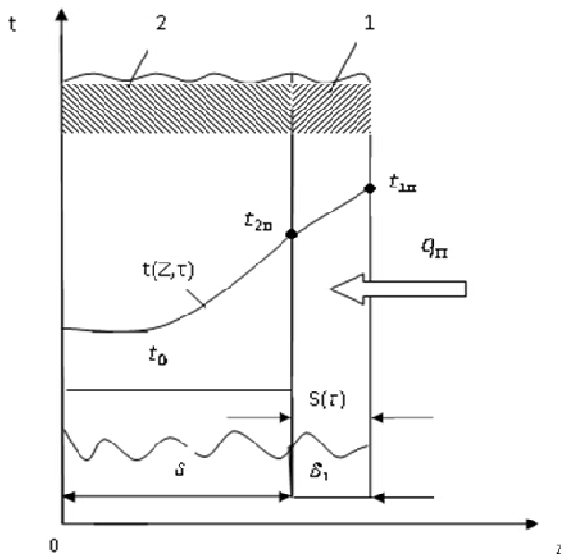


Рис. 1. К расчету полей температур в системе: покрытие — (1), основа — (2)

Эту температуру можно найти из выражения теплового потока в предположении линейности профиля

температур в тонком покрытии толщиной $s(\tau)$: $q = \lambda \cdot (t_{1\text{п}} - t_{2\text{п}}) / s$. Тогда искомая температура в квазистационарном приближении:

$$t_{1\text{п}}(\tau) = t_{2\text{п}}(\tau) + q_{\text{п}} \cdot s(\tau) / \lambda. \tag{7}$$

Индекс 1 относится к параметрам покрытия, а 2 — к основе (рис. 1).

Целью данной работы является приближенное аналитическое решение системы уравнений (1)...(7).

Изложение материалов исследования

Задачу будем решать в предположении постоянства теплофизических свойств покрытия и основы.

Решая совместно уравнения (6) и (7), получим выражение для теплового потока, падающего на покрытие:

$$q_{\text{п}} = \gamma_1 \cdot (1 - t_{2\text{п}} / t_x) / (1 + \text{Bi}_s), \tag{8}$$

где $\gamma_1 = (c_{v1} \cdot t_{\text{пл}} + L_v) \cdot \nu$; $c_{v1} = c_1 \rho_1$; $L_v = \rho_1 L_1$ — объемная теплота плавления частиц покрытия, Дж/м³; $\text{Bi}_s = \alpha_3 \cdot s(\tau) / \lambda_1$ — число Био для покрытия; $\alpha_3 = c_{v1} \cdot \nu$ — эквивалентный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²К); $t_x = t_{\text{пл}} \cdot (1 + \text{Ko})$ — характерная температура, °С; $\text{Ko} = L / (c_1 \cdot t_{\text{пл}})$ — число Коссовича, критерий плавления.

Сделаем безразмерной исходную постановку задачи, для чего в качестве характерного размера примем толщину основы δ и отсчет температуры будем вести от t_x . Тогда обезразмеривание граничного условия (4) даст:

$$-\frac{\partial g}{\partial Z}\Big|_{Z=1} = \text{Bi}_3 \cdot g_{\text{п}}, \tag{9}$$

где $Z = z / \delta$; $\text{Bi}_3 = \text{Bi} / (1 + \text{Bi}_s)$ — эквивалентное число Био; $\text{Bi} = \alpha_3 \delta / \lambda_2$ — число Био для основы; $g = [t_x - t(z, \tau)] / t_x$ — безразмерная температура; $g_{\text{п}} = (t_x - t_{2\text{п}}) / t_x$ — температура на поверхности изделия.

Дифференциальные уравнения в новых переменных примут следующий вид:

$$\frac{\partial g}{\partial \text{Fo}} = \frac{\partial^2 g}{\partial Z^2}, \tag{10}$$

начальное условие (2) станет:

$$g(Z, 0) = g_0 \equiv 1 - t_0 / t_x \tag{11}$$

и граничное условие (3) имеет вид:

$$\frac{\partial g}{\partial Z}\Big|_{Z=0} = 0, \tag{12}$$

где $\text{Fo} = a_2 \tau / \delta^2$ — число Фурье.

Предварительными расчетами было установлено, что $\alpha \approx 10$ Вт/м²К, $\lambda_1 \geq 1$ Вт/(мК) и при толщине покрытия $\delta_1 = s(\tau_{\text{п}}) \leq 0,5$ мм к концу процесса напыления, число Био для покрытия Bi_s будет меньше 0,001 и им можно пренебречь или взять средним $\overline{\text{Bi}_s} = (0 + \text{Bi}_s) / 2 = \text{Bi}_s / 2$ и постоянным.

Тогда решение системы уравнений (9)...(12) при постоянном числе Био $\text{Bi} = \text{Bi}_3$ известно, и имеет, например, согласно [5] следующий вид:

$$\vartheta(Z, Fo) = \vartheta_0 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} P_n(\mu_n) \cdot \frac{\cos \mu_n Z}{\cos \mu_n} \cdot e^{-\mu_n^2 Fo} \quad (13)$$

и для среднemasсовой температуры:

$$\vartheta_{cp}(Fo) = \vartheta_0 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} M_n \cdot \exp(-\mu_n^2 Fo),$$

где $P_n(\mu_n) = \frac{2Bi}{Bi(Bi+1) + \mu_n^2}$ — тепловая амплитуда;

$M_n = P_n(\mu_n) \cdot Bi / \mu_n^2$; μ_n — корни характеристического уравнения:

$$\operatorname{ctg} \mu_n = \mu_n / Bi. \quad (14)$$

В работе [5] приведено выражение для расчета первого корня уравнения (14):

$$\mu_1 = \sqrt{D/\gamma}, \quad (15)$$

где $D = Bi/m$; $m = (1 + Bi/3)$ — коэффициент термической массивности; $\gamma = (1 + \sqrt{1 + 4\rho})/2$; $\rho = D^2/45$.

Если в качестве основы берется низкоуглеродистая сталь для которой теплофизические свойства $c_{v2} = 490 \cdot 7880 = 4 \cdot 10^6$ Дж/(м³К), $\lambda_2 = 56$ Вт/(мК), $a_2 = \lambda_2/c_{v2} = 56/(4 \cdot 10^6) = 1,4 \cdot 10^{-6}$ м²/с, отношение $a_2/\delta^2 \cong 0,07$ при $\delta = 5$ мм и безразмерное время процесса напыления $Fo_H \geq 8$ при $\tau_H = 120$ с.

Из теории теплопроводности известно, что при числах Фурье $Fo \geq 0,3$ наступает так называемый регулярный режим нагрева (РРН). Математически это означает, что из всей бесконечной суммы ряда (13) можно использовать только один первый член. Полагая в уравнении (13) $Z = 1$, получим искомую температуру на поверхности:

$$\vartheta_n = \vartheta_0 \cdot P_1 \cdot \exp(-\mu_1^2 Fo) \quad (16)$$

или $t_{2n} = t_x(1 - \vartheta_n)$, которая входит в уравнения (7) и (8).

Термические напряжения, возникающие в основе, согласно [6] имеют вид:

$$\tilde{\sigma}_n = \vartheta_{cp} - \vartheta_n = D_1 \exp(-\mu_1^2 Fo) \quad (17)$$

и в центральных точках

$$\tilde{\sigma}_c = \vartheta_{cp} - \vartheta_c = C_1 \exp(-\mu_1^2 Fo), \quad (18)$$

где $D_1 = M_1 - P_1 = P_1(Bi/\mu_1^2 - 1)$; $\tilde{\sigma} = \sigma/\sigma_0$ — безразмерное термическое напряжение; $\sigma_0 = \beta \cdot E \Delta t_0 / (1 - \nu)$;

$C_1 = M_1 - P_1/\cos \mu_1 = P_1(Bi/\mu_1^2 - 1/\cos \mu_1)$; $\Delta t_0 = (t_x - t_0)$ — максимально возможный перепад температур; β — термический коэффициент расширения, 1/К; E — модуль упругости Юнга, Па; ν — коэффициент Пуассона.

При малых числах Био ($Bi \ll 1$), имеем случай нагрева термически тонкого тела (ТТТ), когда температура поверхности примерно равна температуре в центре тела. В этом режиме нагрева $\mu_1^2 \cong Bi$, $P_1 \cong 1 - Bi/3$, а произведение $\mu_1^2 Fo$ можно заменить выражением $\mu_1^2 Fo = Bi Fo = \tau/T_B$, где $T_B = c_2 \rho_2 \cdot \delta / \alpha_3 / (1 + Bi_s)$ — так называемая в теории автоматического регулирова-

ния постоянная времени, с. Тогда уравнение (16) примет вид:

$$\vartheta_n = \vartheta_0(1 - Bi/3) \exp(-\tau/T_B). \quad (19)$$

При малых временах процесса τ и больших T_B

экспоненту можно разложить в ряд $e^{-x} \approx 1 - x$. Тогда уравнение (19) при $t_0 \ll t_x$ можно еще более упростить:

$$t(\tau) = t_0 + (t_x - t_0) \cdot \tau/T_B, \quad ^\circ\text{C}. \quad (20)$$

Проверка методики расчета

В работе [3] приведены данные численного расчета поля температур при напылении на сталь Ст20 порошков железа, меди, алюминия и олова. Пластина размерами $5 \times 100 \times 100$ мм напылялась в течении $\tau_H = 120$ с до толщины покрытия $\delta_1 = 0,5$ мм со средней скоростью $v = \delta_1/\tau_H = 0,5 \cdot 10^{-3}/120 = 4,17 \cdot 10^{-6}$ м/с. При напылении порошка алюминия температура основы в конце процесса согласно [3] была 90 $^\circ\text{C}$. Произведем расчет этого варианта. Теплофизические свойства алюминия согласно [7]: температура плавления $t_{пл} = 660$ $^\circ\text{C}$, теплота плавления $L = 394$ кДж/кг; плотность $\rho_1 = 2700$ кг/м³; теплоемкость $c_1 = 917$ Дж/кгК; теплопроводность $\lambda_1 = 238$ Вт/(мК). Объемная теплоемкость: $c_{v1} = c_1 \rho_1 = 917 \cdot 2700 = 2,47 \cdot 10^6$ Дж/(м³К). Эффективный коэффициент теплоотдачи: $\alpha_3 = c_{v1} \cdot v = 2,47 \cdot 10^6 \cdot 4,17 \cdot 10^6 = 10,3$ Вт/м²К.

Число Био для покрытия:

$$Bi_s = \alpha_3 \cdot \delta_1 / \lambda_1 = 10,3 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} / 238 = 2,2 \cdot 10^{-5}.$$

Среднее число Био:

$$\overline{Bi_s} = (0 + Bi_s)/2 = 1,1 \cdot 10^{-5}.$$

Число Коссовича:

$$Ko = L/c_1 t_{пл} = 394 \cdot 10^3 / (917 \cdot 660) = 0,651.$$

Характерная температура:

$$t_x = t_{пл}(1 + Ko) = 660 \cdot (1 + 0,651) = 1090 \quad ^\circ\text{C}.$$

Согласно [8] теплофизические свойства низкоуглеродистой стали можно определить по следующим формулам:

коэффициент теплопроводности:

$$\lambda(t) = 63,15 - 36,83/[ch(0,245(t - 975)/100)], \text{ Вт/(мК)}, \quad (21)$$

теплоемкость:

$$c(t) = 481 + 0,1998 \cdot t + 812,8 \exp(-0,0099(t - 768)), \text{ Дж/(кгК)}, \quad (22)$$

плотность:

$$\rho_2 = 7880 \text{ кг/м}^3.$$

Средняя температура основы:

$$\bar{t} = (t_0 + t_n)/2 = (20 + 90)/2 = 55 \quad ^\circ\text{C}.$$

Примем, что средняя величина в интервале температур от t_0 до t_n будет примерно равна величине при средней температуре.

Тогда:

$$\lambda_{t_0}^{t_n} \cong \lambda_2(\bar{t}) = 63,15 - 36,83/[ch(0,245(55 - 975)/100)] = 56 \text{ Вт/(мК)}.$$

Средняя теплоемкость:

$$c_2(t) \cong 481 + 0,1998 \cdot 55 = 492 \text{ Дж/(кгК)}.$$

Объемная теплоемкость:

$$c_{v2} = c_2 \rho_2 = 492 \cdot 7880 = 3,88 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3\text{К)}.$$

Число Био для основы:

$$Bi = \alpha_3 \delta / \lambda_2 = 10,3 \cdot 0,005 / 56 = 0,92 \cdot 10^{-3}.$$

Эффективное число Био:

$$Bi_3 = Bi / (1 + \overline{Bi}_s) = 0,92 \cdot 10^{-3} / (1 + 1,1 \cdot 10^{-5}) \cong 0,92 \cdot 10^{-3}.$$

Первое собственное число:

$$\mu_1^2 = Bi = 0,92 \cdot 10^{-3}.$$

Коэффициент температуропроводности:

$$a_2 = \lambda_2 / c_{v2} = 56 / 3,88 \cdot 10^6 = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2\text{/с}.$$

Число Фурье в момент окончания процесса напыления:

$$Fo_H = a_2 \tau / \delta^2 = 1,4 \cdot 10^{-5} \cdot 120 / (0,005^2) = 67,2.$$

Безразмерная начальная температура:

$$\vartheta_0 = 1 - t_0 / t_x = 1 - 20 / 1090 = 0,982.$$

Относительная температура поверхности по формуле (16) будет:

$$\vartheta_H = \vartheta_0 (1 - Bi/3) e^{-BiFo} = 0,982 \cdot (1 - 0,92 \cdot 10^{-3} / 3) \cdot \exp(-0,92 \cdot 10^{-3} \cdot 67,2) = 0,923.$$

Размерная температура поверхности:

$$t_{2H} = t_x (1 - \vartheta_H) = 1090 (1 - 0,923) = 84 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Расчет по формуле (20), температуры поверхности:

$$t_H = t_0 + (t_x - t_0) \tau / T_B = 20 + (1090 - 20) \cdot 120 / 1883,5 = 88 \text{ }^\circ\text{C},$$

где постоянная времени

$$T_B = c_{v2} \delta / \alpha_3 = 3,88 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 10^{-3} / 10,3 = 1883,5 \text{ с}.$$

Температура поверхности в конце напыления согласно [3] $t_H = 90 \text{ }^\circ\text{C}$. Таким образом, погрешность предложенной инженерной методики расчета составляет:

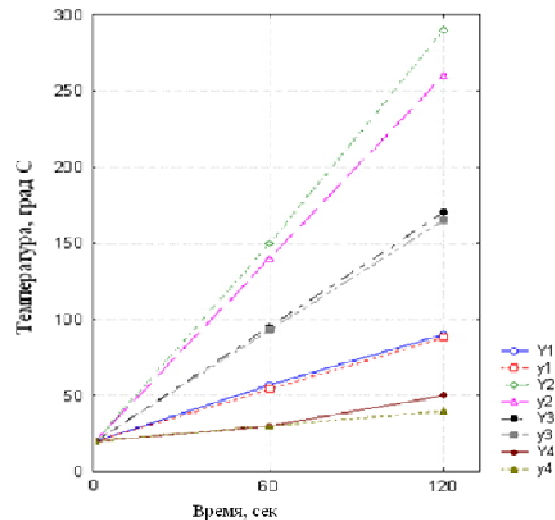
$$\Pi = (1 - 88/90) \cdot 100 = 2 \text{ } \%$$

Результаты расчетов для других материалов сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Результаты расчетов температурного поля покрытия и подложки при газотермическом напылении

Вещество	Число Коссовича, Ko	Характерная температура, $t_x, \text{ }^\circ\text{C}$	Эффективное число Био, $Bi, \cdot 10^3$	Начальная температура, ϑ_0	Постоянная времени, $T_B, \text{ с}$	Температура поверхности по (20)	Температура по [3], $t_H, \text{ }^\circ\text{C}$	Погрешность $\Pi, \text{ } \%$
Al	0,651	1090	0,92	0,982	1883,5	88	90	2
Fe	0,252	1920	1,9	0,989	950	260	290	10
Cu	0,504	1629	1,3	0,988	1329	165	170	3
Sn	1,09	484	0,66	0,959	2771	40	50	19

Зависимость температуры основы от времени напыления покрытий из различных материалов представлена на рис. 2.



Материал основы — сталь Ст20. Материал покрытий: Y_{1Y_1} — алюминий; Y_{2Y_2} — железо; Y_{3Y_3} — медь; Y_{4Y_4} — олово, где Y — данные [3], y — расчет по данной методике

Рис. 2. Зависимость температуры основы от времени напыления покрытий из различных материалов

Выводы

1. Разработана инженерная методика расчета полей температур в композите покрытие–подложка при нанесении газотермических покрытий на основу с учетом основных факторов процесса: температур и теплофизических свойств напыляемых частиц, скорости роста покрытия, различия теплофизических свойств покрытия и подложки.
2. Полученные простые и эффективные формулы проверены на адекватность путем сопоставления с численными расчетами температурных полей при нанесении на стальную основу алюминия, олова, меди и железа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Температурное поле покрытия и подложки при газотермическом напылении порошковых материалов / И. Л.Куприянов, М. А.Геллер, Г. Е.Горелик и др. // ИФЖ. — № 3. — Т.52, 1986.- С.513-514.
2. Теплообмен и термические напряжения при нанесении газотермических покрытий на подложку / И. Л.Куприянов, М. А.Геллер, Г. Е.Горелик и др. // ФизХОМ. — №3. — 1988. — С.27-31.
3. Геллер М. А., Куприянов И. Л. Численное исследование теплообмена и остаточных напряжений при нанесении газотермических покрытий на подложку.-Препринт № 11.-Минск:ИТМО, — 1989. — 35 с.

4. Кудинов В. В., Иванов В. М. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий.-М. :Машиностроение, — 1985. — 240 с.
5. Горбунов А. Д., Гольдфарб Э. М. Нахождение корней трансцендентных уравнений в задачах теплопроводности пластины при неоднородных граничных условиях // Изв.вузов.Черная металлургия. — 1983. — № 8. — С. 104-108.
6. Горбунов А. Д. К расчету термических напряжений при конвективном нагреве пластины // Математичне моделювання.-Днепродзержинск :ДГТУ, — 2010. — № 1 (22). — С. 16-21.
7. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов. — М. : Госизд.Физматлит, — 1959. — 356 с.
8. Маковский В. А., Лаврентик И. И. Алгоритмы управления нагревательными печами. — М. :Металлургия, — 1977. — 183с.

пост. 25.06.12