

### Заключение

Приведенные результаты численных решений задач нестационарного теплообмена при охлаждении высокотемпературного металлического тела прямоугольной формы в зависимости от геометрии, теплофизических свойств материала тела и времени процесса показывают адекватность разработанной математической модели. Сопоставление численных расчетов с аналитическими данными и результатами, полученными с помощью программы ANSYS, позволяет говорить об удовлетворительной точности расчетной модели.

Это значит, что изложенный в статье алгоритм численного решения уравнений (1) и (11) можно применять и при решении других задач, где программы ANSYS не могут быть использованы.

### Библиографические ссылки

1. Липанов А. М., Макаров С. С. Численное решение задачи нестационарного теплообмена при охлаждении высокотемпературного металлического тела прямоугольной формы // Вестник ИжГТУ. – 2012. – №. 2(54). – С. 35–38.
2. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы. – М.: Наука, 1989. – 432 с.
3. Яненко Н. Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. – Новосибирск: Наука, 1967. – 197 с.
4. Лобасова М. С. Тепломассобмен: учеб. пособие к практическим занятиям. – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. – 156 с.
5. Марочник сталей и сплавов / под общ. ред. А. С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.

A. M. Lipanov, Academician of RAS, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University  
S. S. Makarov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

### Numerical Solution of Cooling Problem for Conjugated Rectangular High-Temperature Metal Bodies

The paper considers the numerical solution of the cooling problem for conjugated high-temperature rectangular metal bodies. The mathematical model of unsteady heat transfer process with boundary conditions of the III-IV types is presented. Results of temperature numerical calculations depending on the geometry, thermal properties of the body material and the cooling time are obtained. Numerical results are compared with analytical data and results obtained by means of ANSYS.

**Key words:** mathematical model, unsteady heat transfer, cooling, high-temperature rectangular metal body, numerical calculation.

УДК 621.74.002.6

**В. Б. Дементьев**, доктор технических наук, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

**П. Г. Овчаренко**, аспирант, Институт механики УрО РАН, Ижевск

**А. Ю. Лещёв**, Институт механики УрО РАН, Ижевск

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛЕРОДА НА СОСТАВ И СТРУКТУРУ ЛЕГИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СТАЛЬНЫХ ОТЛИВОК ПРИ ЛИТЬЕ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ (ЛГМ)

Рассмотрен способ поверхностного легирования стальных отливок углеродом путем нанесения пасты на модель. Определена глубина слоя, его структура и твердость в зависимости от содержания углерода в заливаемом расплаве; представлены результаты металлографических исследований и химического анализа легированных поверхностей отливок.

**Ключевые слова:** поверхностное легирование, углерод, литье по газифицируемым моделям.

Одним из основных направлений в технологиях получения отливок является разработка и совершенствование специальных способов литья, применение которых способствует снижению трудозатрат и металлоемкости отливок, достижению высоких физико-механических и эксплуатационных свойств литых деталей. К данным способам можно отнести суспензионное литье, литье под высоким и низким давлением, литье под воздействием центробежных сил, электромагнитных полей и др. [1, 2]. Одним из способов получения отливок высокой точности, получившим распространение в последнее время, является литье по газифицируемым моделям

(ЛГМ), а применение поверхностного легирования в процессе ЛГМ позволяет формировать легированный слой, обладающий требуемыми свойствами [3].

### Описание способа поверхностного легирования

Способ осуществляется следующим образом. Паста на основе порошка сажи (элементарного углерода) наносилась на одну из сторон квадратной модели из пенополистирола слоем 0,8...1,0 мм. После сушки слоя легирующего покрытия к моделям приклеивали элементы литниково-питающей системы и окрашивали модельные блоки антипригарным покрытием на основе оксида алюминия. Для получения отливок модельные блоки помещали в опоку, засыпали опор-

ным материалом (песком), герметизировали и заливали расплавом сталей. В качестве железоуглеродистых сплавов были выбраны три марки стали, имеющие различное содержание углерода, – сталь 10, 45 и У8. В работе представлены результаты химического анализа, а также металлографические исследования легированных поверхностей.

#### Полученные результаты и их обсуждение

Из результатов химического анализа отлитых образцов (табл. 1) видно, что химический состав легированных поверхностей и сердцевины отливок различается, при этом поверхностные слои обогащаются углеродом, что свидетельствует о протекании процессов взаимодействия между легирующим покрытием и заливаемыми расплавами.

Данное взаимодействие протекает в два этапа. При заливке модельных блоков углерод из легирующего

покрытия частично растворяется в расплаве, а теплоты последующей кристаллизации отливки достаточно для протекания процессов диффузионного насыщения поверхности углеродом, что приводит к формированию легированного поверхностного слоя, имеющего отличные от основного металла структуру и состав. Увеличение содержания углерода в основе отливок, особенно из сталей 10 и 45, связано с взаимодействием продуктов термодеструкции пенополистирола (материала модели) с расплавом при заливке модельных блоков [4].

Структура легированных углеродом поверхностных слоев отлитых образцов представлена на рис. 1. По результатам металлографических исследований отлитых образцов (табл. 2) видно, что легированные углеродом поверхностные слои отличаются от основного металла по структуре и твердости.

Таблица 1. Химический состав отлитых образцов

Марка стали	Место исследования	Содержание элементов, %, мас.			
		C	Si	Mn	Cr
10	Легированный слой	2,99	0,47	0,40	0,09
	Основной металл	0,24	0,41	0,41	0,09
45	Легированный слой	2,91	0,33	0,57	0,18
	Основной металл	0,51	0,27	0,60	0,16
У8	Легированный слой	2,90	0,46	0,61	0,07
	Основной металл	0,81	0,42	0,62	0,08

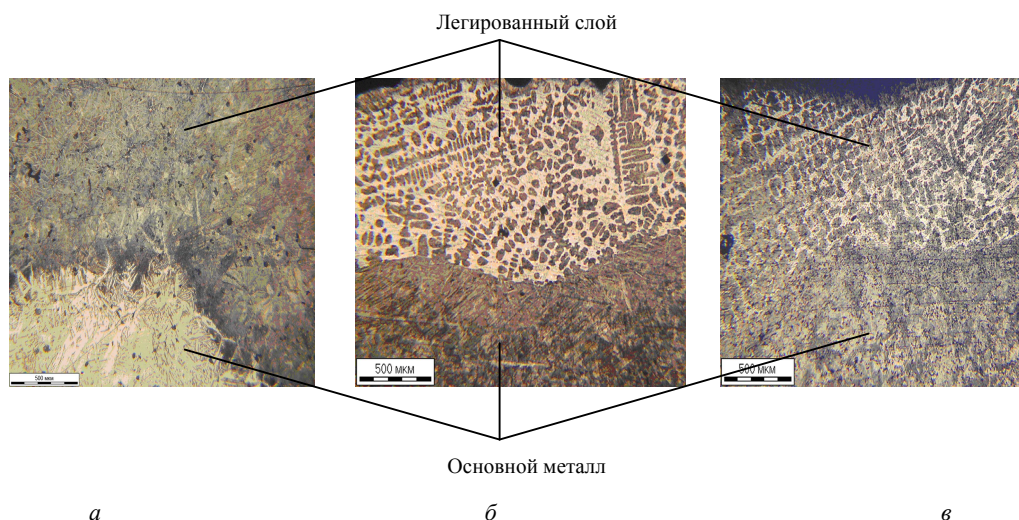


Рис. 1. Структура легированных углеродом слоев:  
а – на отливке из стали 10; б – на отливке из стали 45; в – на отливке из стали У8

Таблица 2. Микроструктура и твердость литых образцов, легированных углеродом

Марка стали	Глубина слоя, мм	Микроструктура и твердость легированной поверхности	Микроструктура и твердость основного металла
Сталь 10	2,2...2,6	Перлит ( $HV_{0,05}$ 254...262 (23,5...25 HRC)), цементитная сетка по границе зерна с твердостью $HV_{0,05}$ 301...323 (30...33 HRC)	Перлит, феррит видманштеттового строения, зерно размером № 1, ГОСТ 5639-82; твердость слоя $HV_{0,05}$ 209...192 (< 18 HRC)
Сталь 45	1,8...2,0	Троостит, цементитная сетка и структурная составляющая с твердостью $HV_{0,05}$ 897...1017 (67...69 HRC)	Троостит, мартенсит, зерно размером № 4, ГОСТ 5639-82; твердость слоя $HV_{0,05}$ 447...466 (45...46,5 HRC)
Сталь У8	1,1...1,4	Троостомартенсит, цементитная сетка и структурная составляющая с твердостью $HV_{0,05}$ 797...845 (64...66 HRC)	Троостит, зерно размером № 4, ГОСТ 5639-82; твердость слоя $HV_{0,05}$ 321...330 (33...34 HRC)

Легированный слой на отливке из стали 10 представлен раствором углерода в железе с незначительным количеством карбида железа Fe<sub>3</sub>C (см. рис. 2, а). Данный легированный слой имеет более низкую твердость, по сравнению с образцами из сталей 45 и У8. В легированных углеродом поверхностных слоях отливок из сталей 45 и У8 (см. рис. 2, б, в) наряду с раствором углерода в железе присутствует в значительной степени карбидная составляющая, состоящая из карбида железа Fe<sub>3</sub>C, обуславливающая высокую твердость легированному слою. В общем

случае при увеличении содержания углерода в заливаемом расплаве в легированных поверхностных слоях увеличивается содержание карбидной составляющей, приводящее к увеличению твердости слоя, при этом глубина слоя уменьшается (см. табл. 2) вследствие затруднения диффузии углерода вглубь отливки [5].

Термообработка отлитых образцов приводит к увеличению твердости легированного слоя и основного металла (табл. 3), не изменяя при этом фазовый состав.

Таблица 3. Микроструктура и твердость литых образцов, легированных углеродом после термообработки\*

Марка стали	Глубина слоя, мм	Микроструктура и твердость легированной поверхности	Микроструктура и твердость основного металла
Сталь 10	2,2...2,6	Перлит (HV <sub>0,05</sub> 323...348 (33...35 HRC)), цементитная сетка с твердостью в зоне сетки HV <sub>0,05</sub> 677...714 (59...61 HRC)	Перлит, феррит; твердость слоя HV <sub>0,05</sub> 323...376 (33...38 HRC)
Сталь 45	1,8...2,0	Троостит (HV <sub>0,05</sub> 554...642 (52,5...57 HRC)), цементитная сетка с включениями дендритного характера; твердостью в зоне сетки HV <sub>0,05</sub> 677...714 (59...61 HRC)	Троостомартенсит; твердость слоя HV <sub>0,05</sub> 554...581 (52,5...54 HRC)
Сталь У8	1,1...1,4	Троостомартенсит (HV <sub>0,05</sub> 554...714 (52,5...61 HRC)), цементитная сетка с твердостью HV <sub>0,05</sub> 754...797 (63...64 HRC), иглы цементита	Троостит; твердость слоя HV <sub>0,05</sub> 528...611 (51...56 HRC)

\* Режим термообработки: нагрев 840...860 °С, охлаждение в масле 160...180 °С.

Поверхностное легирование углеродом при ЛГМ позволяет получать отливки высокой точности с упрочненным поверхностным слоем, состав и твердость которого зависят от содержания углерода в заливаемом металле. Формирование данного слоя происходит непосредственно при контакте легирующего покрытия с железоуглеродистым расплавом в процессе литья, что позволяет уменьшить число последующих операций по упрочнению поверхности, а последующая термообработка приводит к увеличению твердости отливок.

**Выводы**

1. Поверхностное легирование углеродом при ЛГМ позволяет получать отливки высокой точности с упрочненным поверхностным слоем, состав, структура и твердость которого определяются содержанием углерода в заливаемом расплаве.

2. При увеличении содержания углерода в расплаве повышается твердость легированного слоя за

счет формирования карбидной составляющей (Fe<sub>3</sub>C), при этом глубина его уменьшается.

3. Термическая обработка отливок приводит к увеличению твердости легированных поверхностей и основного металла.

**Библиографические ссылки**

1. Специальные способы литья : справочник / под ред. В. А. Ефимова. – М. : Машиностроение, 1991. – 436 с.
2. Степанов Ю. А. Специальные виды литья. – М. : Машиностроение, 1970. – 224 с.
3. Шуляк В. С. Литье по газифицируемым моделям. – СПб. : НПО «Профессионал», 2007. – 408 с.
4. Строительное, дорожное и коммунальное машиностроение. Обзорная информация. – М. : ЦНИИТЭстроймаш, 1984. – 63 с.
5. Райцес В. Б., Литвин В. М. Химико-термическая обработка деталей. – Киев : Техника, 1980. – 152 с.

V. B. Dementyev, DSc in Engineering, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

P. G. Ovcharenko, Institute of Mechanics, UrB RAS, Izhevsk

A. U. Leshchev, Institute of Mechanics, UrB RAS, Izhevsk

**Investigation of Carbon Influence on Composition and Structure of Alloy Steel Cast Surfaces During Casting for Consumable Pattern (CCP)**

The method of surface alloying of steel casts by carbon applying the paste to the model is considered. The depth of the layer, its structure and hardness depending on the carbon content in the melt poured is determined. Results of metallographic studies and chemical analysis of alloyed cast surfaces are presented.

**Key words:** surface alloying, carbon, casting for consumable pattern.