



УДК 669.14:53.084.823:669.155:621.785.01:669.14.018.25

С.Ю. Кондратьев, А.Д. Хайдоров

НАУГЛЕРОЖИВАНИЕ СТАЛЬНЫХ ОТЛИВОК, ПОЛУЧАЕМЫХ ЛИТЬЕМ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ

S.Yu. Kondrat'ev, A.D. Khaidorov

CARBURIZING STEEL FOUNDING PRODUCED BY CAVITYLESS CASTING

Исследовано науглероживание стальных отливок, полученных литьем по газифицируемым моделям (ЛГМ). Рассмотрена возможность обезуглероживания литья последующей термической обработкой по различным режимам. Показана эффективность такой термической обработки для обезуглероживания сталей, полученных методом ЛГМ. Установлено, что наибольшее влияние на структуру отливок оказывает термоциклическая обработка.

ЛИТЫЕ СТАЛИ; ЛИТЬЕ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ; НАУГЛЕРОЖИВАНИЕ; ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЕ; ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА; ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА; МИКРОСТРУКТУРА; МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА.

The article deals with the problem of carburizing steel founding, produced by cavityless casting. It is considered the possibility of decarburization of steel casting by the subsequent heat treatment on various modes. It is shown the efficiency of such heat treatment for decarburization of steels produced by cavityless casting. It is established that thermocyclic processing has the greatest impact on the structure of castings.

CAST STEELS; CAVITYLESS CASTING; CARBURIZING; DECARBURIZATION; HEAT TREATMENT; THERMOCYCLIC TREATMENT; MICROSTRUCTURE; MECHANICAL PROPERTIES.

Одна из наиболее перспективных технологий изготовления отливок — литье по газифицируемым моделям (ЛГМ) [1–10]. Эта технология позволяет получать отливки высокой точности при минимальных издержках производства. Однако широкому промышленному использованию технологии ЛГМ препятствует ряд факторов, основным из которых является то, что при производстве стальных отливок сгорание пенополистирола приводит к взаимодействию продуктов сгорания с металлом и изменению как объемной, так и поверхностной концентрации углерода в отливках. Продукты термической деструкции модели из пенополистирола, образующиеся как на стадии заливки формы металлом, так и в период кристаллизации и охлаждения отливки, приводят к изменению

концентрации углерода и в объеме металла, и в поверхностной зоне отливки. Наибольшее отрицательное влияние науглероживание оказывает на структуру и свойства стальных отливок, особенно тонкостенных, доля которых в промышленности велика.

Наиболее активные компоненты газовой термодеструкции пенополистирола в процессе заливки формы металлом — углерод и водород. Углерод образуется в результате радикально-цепных реакций бензола, ацетилена и метана. Углерод в газовой фазе может находиться в виде атомов и многоатомных частиц, причем с возрастанием числа атомов в частице углерода энергия отрыва атома углерода возрастает, т. е. диссоциация затруднена. В условиях литейной формы при ЛГМ в газовой фазе содержится

углерод в атомарном виде, однако с повышением температуры заливаемого металла увеличивается количество трехатомных частиц. В общем случае переход атомного углерода из газовой фазы в раствор жидкого металла включает три стадии [11]:

образование атомарного углерода в газовой фазе в результате термической деструкции пенополистирола;

адсорбцию углерода на поверхности расплава; диффузию атомарного углерода в расплав.

В работах, посвященных исследованию технологических особенностей литья по газифицируемым моделям, [1–11] установлены общие закономерности влияния технологических параметров (температура жидкого металла при заливке его в форму, скорость заливки, плотность литейной модели и др.) на растворимость углерода в жидком металле, а также влияния исходного содержания углерода в стали на поверхностное и объемное приращение углерода. Однако глубина поверхностного науглероживания и ее связь с какими-либо технологическими параметрами не изучалась. Не рассмотрены и способы устранения поверхностного науглероживания, возникающего в отливках, полученных по технологии ЛГМ.

Известно [4, 5, 7–13], что устранение или уменьшение зоны поверхностного науглероживания может осуществляться двумя способами: изменением термодинамического потенциала углерода в газовой фазе и термической обработкой отливки. В первом случае в противопопригарное покрытие вводятся компоненты, которые при заливке формы металлом диссоциируют с образованием углекислого газа и кислорода и связывают углерод, уменьшая тем самым углеродный потенциал газовой атмосферы в форме. Во втором случае устранение поверхностного науглероживания отливок достигается диффузионным отжигом 1-го рода, при котором стальные

отливки нагреваются до температур 1000–1100 °С с последующим медленным охлаждением с печью. Однако в научной литературе практически отсутствуют данные о применении нестационарных режимов термообработки, таких, как термоциклическая обработка (ТЦО), для устранения науглероживания в отливках, полученных методом ЛГМ. В то же время в ряде работ [14–22] показано, что ТЦО значительно ускоряет диффузию углерода в сплавах на основе железа.

Таким образом, для широкого внедрения технологии литья по газифицируемым моделям необходимо изучить закономерности процесса науглероживания стальных отливок при их изготовлении, а именно — степень науглероживания и глубину науглероженного слоя, особенно при получении мелких деталей. Важной задачей также является исследование возможности применения термической обработки для уменьшения степени поверхностного науглероживания отливок, полученных методом ЛГМ.

Целью работы было исследование степени и глубины науглероживания отливок разных размеров из сталей с различным исходным содержанием углерода, полученных по технологии литья по газифицируемым моделям, а также изучение возможности применения различных видов термической обработки для его устранения или уменьшения глубины науглероженного слоя.

Материал и методика эксперимента

Для исследования использовали углеродистые стали марок 20Л и 40Л. Химический состав исследованных сталей приведен в табл. 1.

Из обеих марок стали в промышленных условиях изготавливали по три типа отливок разного веса и размеров, с различной толщиной стенки. В качестве характеристического размера принимали основное сечение. Параметры отливок приведены в табл. 2.

Таблица 1

Фактический химический состав исследованных сталей

Марка стали	Содержание элементов, % (масс).								
	C	Si	Mn	Ni	Cr	S	P	Cu	Fe
20Л	0,23	0,36	0,36	0,08	0,09	0,039	0,025	0,14	Ост.
40Л	0,42	0,95	0,76	0,09	0,11	0,050	0,029	0,14	Ост.

Таблица 2

Параметры исследованных отливок

№ п/п	Название детали	Вес, г		Характеристический размер S , мм	Примечание
		отливки	модели		
1	«Клин»	160	1,23	14	Сплошное сечение
2	«Бобышка»	370	1,80	30	Сплошное сечение
3	«Обойма»	720	4,55	6	Наличие внутренней полости

Модели отливок изготавливали из пенополистирола Д833В. Плотность моделей составляла 25 кг/м^3 . Однослойное антипригарное покрытие на водяной основе PR-COATING W200 (на основе огнеупорного силиката циркония) наносили методом окунания.

Металлографический анализ продольных и поперечных шлифов проводили на оптическом микроскопе «Reichert-Jung MeF3A» при увеличениях $\times 100$ – 600 с использованием программы автоматического количественного анализа изображений согласно процедуре ASTM E 1245–03. Изготовление и подготовку металлографических шлифов выполняли на оборудовании фирмы «Buehler» согласно стандарту ASTM E 3–95. Травление микрошлифов осуществляли в 4 %-м водном растворе азотной кислоты. За толщину (глубину) науглероженного слоя принимали расстояние от поверхности образца до окончания зоны, отличающейся от структуры сердцевины. Относительная погрешность измерения толщины (глубины) науглероженного слоя не превышала 5 %.

Твердость измеряли методами Бринелля и Роквелла на твердомере ТК-2М. Погрешность измерений составляла соответственно $\pm 12 \text{ HV}$ и $\pm 1,5 \text{ HRC}$. Микротвердость определяли по методу Виккерса на приборе «Reichert-Jung Misco-Duomat 4000E» в соответствии с ASTM E 92 при нагрузке 5 кг. Погрешность измерений микротвердости составляла $\pm 3 \text{ HV}$.

Термическую обработку образцов проводили в камерных печах «СНОЛ-1.6.2.5. 1/11-И2». Контроль температуры осуществляли по термомпаре, впаянной в центр контрольного образца. Точность регулировки температуры составляла $\pm 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Образцы загружали в печь, предварительно нагретую до заданной температуры, выдерживали заданное время и охлаж-

дали с различной скоростью. После термического воздействия определяли механические свойства и исследовали структуру сплавов.

Результаты экспериментальных исследований

Исследование науглероживания отливок при ЛГМ

Металлографический анализ отливок из стали 20Л и 40Л, полученных методом ЛГМ, показал, что во всех случаях в структуре деталей имеется поверхностный науглероженный слой. Глубина поверхностного науглероживания неравномерная и зависит от конфигурации отливки. Наибольшее науглероживание наблюдается в угловых областях, прилегающих к внешней поверхности изделия, т. е. в местах выхода продуктов термодеструкции пенополистирола, а также в местах, удаленных от питателя. Характер микроструктуры позволяет заключить, что содержание углерода в науглероженном слое неравномерное и колеблется от 0,6 до 0,8 % масс. Поверхностный слой отливок из стали 20Л и 40Л, полученных методом ЛГМ, имеет микроструктуру как чистого перлита, что соответствует содержанию углерода в поверхностном слое $\sim 0,8 \text{ \% масс.}$ (рис. 1, а), так и перлита с ферритной сеткой, что свидетельствует о содержании углерода $\sim 0,6$ – $0,7 \text{ \% масс.}$ (рис. 1, б).

В табл. 3 приведены результаты измерений глубины науглероженного слоя в полученных методом ЛГМ отливках с различными параметрами. Из этих экспериментальных данных видно, что максимальная толщина науглероженного слоя на поверхности отливки достигает 1,6 мм. При этом глубина науглероживания зависит от веса отливки. Так, наименьшее науглероживание наблюдается в отливках весом 160 г как для стали 20Л, так и для стали 40Л. С увеличением веса

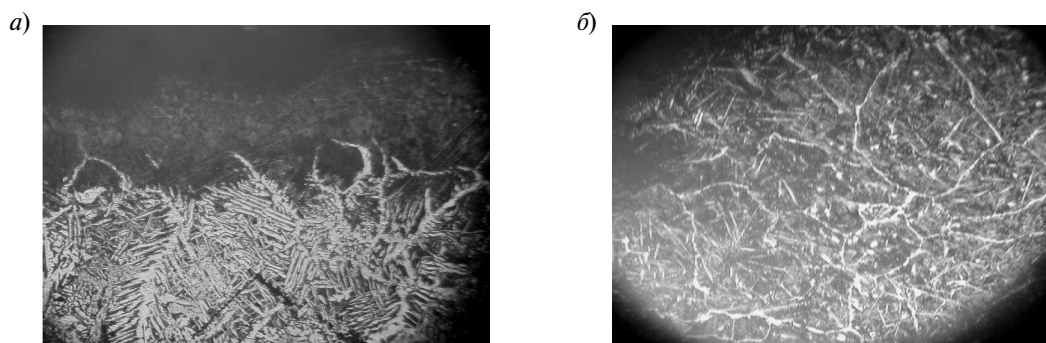


Рис. 1. Микроструктура ($\times 50$) поверхностного слоя отливки «Бобышка» из стали 20Л: перлитная (а) и перлитная с ферритной сеткой (б)

Таблица 3

Глубина науглероженного слоя и параметры исследованных отливок

Название отливки	Вес отливки, г	Вес модели, г	Толщина стенки отливки, мм	Вес модели / Вес отливки	Глубина науглероживания, мм			
					20Л		40Л	
					max	min	max	min
«Клин»	160	1,23	14	0,0076875	0,48	0,32	0,16	0,80
«Бобышка»	370	1,80	30	0,0048649	0,32	1,28	0,64	1,6
«Обойма»	720	4,55	6	0,0063194	0,112	0,56	0,24	1,12

отливки глубина науглероженного слоя увеличивается. Максимальное науглероживание наблюдается в отливке весом 370 г. Дальнейшее увеличение веса отливки приводит к уменьшению глубины науглероживания.

На рис. 2 выявляется также зависимость глубины науглероживания от отношения веса модели к весу отливки. С увеличением этого отношения глубина науглероживания умень-

шается. Кроме рассмотренных параметров отливки, на глубину науглероживания влияет толщина ее стенки. Наименьшую глубину науглероживания имеет отливка с толщиной стенки 14 мм. Уменьшение толщины стенки отливки приводит к некоторому увеличению науглероживания, а увеличение толщины стенки отливки ведет к значительному росту глубины науглероженного слоя (см. рис. 3).

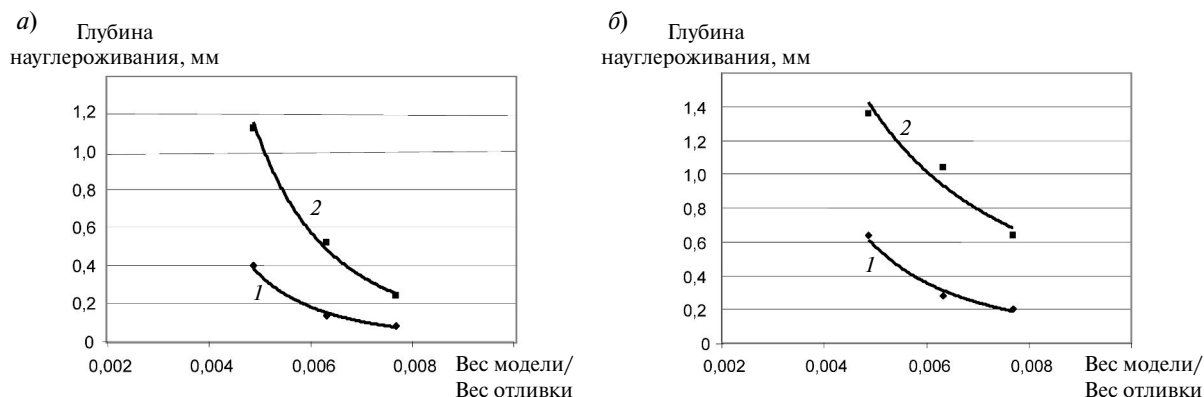


Рис. 2. Зависимости (1 — минимальная, 2 — максимальная) глубины науглероженного слоя отливки от отношения веса модели к весу отливки из сталей 20Л (а) и 40Л (б)

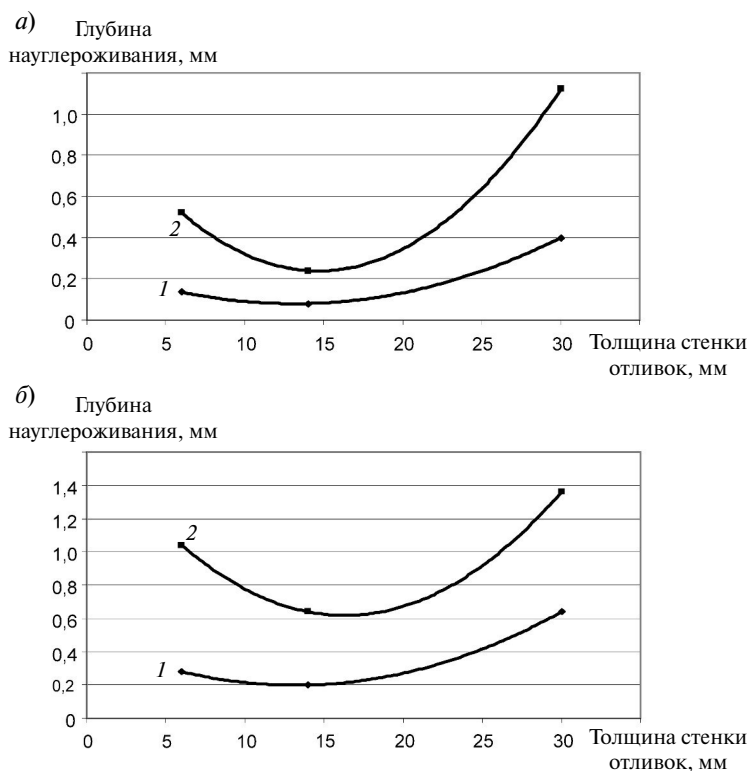


Рис. 3. Зависимости (1 — минимальная, 2 — максимальная) глубины науглероженного поверхностного слоя от толщины стенки отливки из сталей 20Л (а) и 40Л (б)

Следует отметить, что полученные зависимости глубины науглероженного слоя от таких параметров отливки, как ее вес, соотношение веса модели и веса отливки, толщина стенки отливки, имеют аналогичный характер для деталей из стали 20Л и из стали 40Л, т. е. не зависят от исходного содержания углерода в материале.

Наряду с поверхностным, в отливках из стали 40Л наблюдается и частичное объемное науглероживание. Так, если во всех отливках из стали 20Л литая структура сердцевин имеет выраженный дендритный характер, то в ряде отливок из стали 40Л (например, отливка «Бобышка») дендритный характер структуры сохраняется, а в некоторых (например, отливка «Клин») происходит частичное науглероживание сердцевин и микроструктура существенно изменяется. В последнем случае структура стали становится неоднородной: уменьшается количество игольчатого феррита, появляются участки чистого перлита.

Результаты измерения микротвердости закаленной отливки «Клин» подтвердили законо-

мерности науглероживания отливок, выявленные при металлографическом исследовании (рис. 4). Максимальная твердость $\sim 1000 HV_5$ наблюдается на глубине примерно до 0,8–1,0 мм от поверхности отливки, а далее — примерно до 1,6 мм — наблюдается плавное снижение ее значений до $620 HV_5$. Однако на глубине около 1,6–1,8 мм микротвердость вновь увеличивается до значения $800 HV_5$, которое сохраняется до глубины слоя $\sim 2,2$ мм, а затем плавно уменьшается до твердости стали 40Л. Повышенная твердость поверхностного слоя детали до глубины 0,8 мм объясняется ее науглероживанием при термодеструкции модели из пенополистирола, а повышение твердости на глубине около 1,6–1,8 мм, вероятно, связано с частичным объемным науглероживанием. Это является и причиной неоднородности структуры отливки.

Результаты исследования отливок из сталей 20Л и 40Л, полученных методом ЛГМ, позволяют заключить, что в процессе ЛГМ происходит как поверхностное, так и (частично) объемное (сталь 40Л) их науглероживание. При этом по-

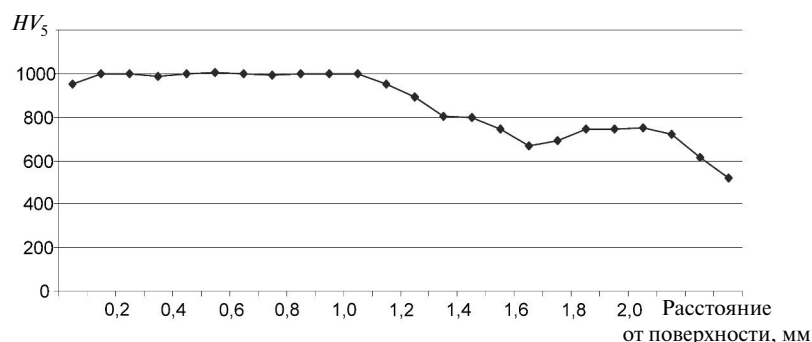


Рис. 4. Изменение микротвердости по глубине от поверхности отливки «Клин» из стали 40Л

верхностное науглероживание неравномерно как по содержанию углерода в слое, так и по его глубине, а глубина науглероженного слоя зависит от таких параметров отливки, как вес, соотношение вес модели / вес отливки, толщина стенки.

Исследование влияния термической обработки на науглероженный слой отливок, полученных методом ЛГМ

Науглероживание, причем неравномерное, поверхности отливок, получаемых методом литья по газифицируемым моделям, существенно затрудняет их дальнейшую механическую обработку. Вследствие этого актуальна задача устранения или максимально возможного снижения степени науглероживания поверхности таких отливок. Одним из возможных способов решения этой проблемы может служить термическая обработка отливок [14–22].

В связи с этим исследовали влияние следующих режимов термической обработки на структуру отливок из сталей 20Л и 40Л, полученных методом ЛГМ, : а) полный отжиг; б) нормализация с высоким отпуском, в) высокотемпературный отжиг; г) термоциклический отжиг (ТЦО).

Основные технологические параметры исследованных режимов термической обработки отливок приведены в табл. 4.

Металлографический анализ отливок, полученных методом ЛГМ и подвергнутых последующей термической обработке по всем исследованным режимам (см. табл. 4), показал следующее. После всех видов термообработки, за исключением ТЦО, на поверхности отливок как из стали 20Л, так и из стали 40Л наблюдается обезуглероживание по сравнению с исходным литым состоянием, причем либо частичное, либо полное. Глубина обезуглероженного слоя

Таблица 4

Исследованные режимы термической обработки отливок из сталей 20Л и 40Л, полученных методом ЛГМ

№ п/п	Вид термообработки	Параметры режима термообработки *					Среды охлаждения в циклах
		Температура и длительность выдержки		Температура и длительность выдержки		Число циклов	
		$T(T_B)$, °С	τ_1 , мин	$T_{отп}(T_H)$, °С	τ_2 , мин		
1	Полный отжиг	880	30	—	—	1	с печью
2	Нормализация с высоким отпуском	900	30	640	60	1	на воздухе
3	Высокотемпературный отжиг	1050	30	—	—	1	с печью
4	ТЦО	925	30	650	10	5	на воздухе

* П р и м е ч а н и е: T — температура нагрева при отжигах и нормализации; T_B — верхняя температура цикла при ТЦО; T_H — нижняя температура цикла при ТЦО

изменяется в пределах 0,10–0,55 мм. В отливках, подвергнутых ТЦО, обезуглероживание не обнаружено.

После полного отжига или нормализации глубина науглероженного слоя в отливках уменьшается примерно на 10–15 % относительно литого состояния. В отливках, подвергнутых высокотемпературному отжигу, глубина науглероженного слоя уменьшается на ~ 40 %, но в них наблюдается наибольший обезуглероженный слой — глубиной до 0,55 мм. После ТЦО науглероженный слой в отливках уменьшается также на 40–45 %, но обезуглероживание в них не обнаружено.

Микроструктура науглероженного слоя отливок, подвергнутых ТЦО или термической обработке по другим режимам, существенно различается. После нормализации с высоким отпускком, полного отжига или высокотемпературного отжига науглероженный слой поверхности отливки состоит либо из чистого тонкопластинчатого перлита, либо из тонкопластинчатого перлита с небольшими участками феррита. Далее идет переходная зона: перлит с ферритной сеткой, а за ней — сердцевина. В отливках, подвергнутых ТЦО, поверхностный науглероженный слой имеет три зоны: тонкопластинчатый перлит (иногда перлит с мелкими частицами цементита), далее — перлит с крупными участками феррита, затем — перлит с мелкими участками феррита, после чего микроструктура науглероженного слоя переходит в микроструктуру сердцевины (рис. 5). Микроструктура сердцевины отливок, подвергнутых любому виду термической обработки, представляет собой мелкозернистую, достаточно равновесную феррито-перлитную смесь без каких-либо признаков литой структуры.

Результаты металлографического исследования хорошо согласуются с измерениями микротвердости поверхностного науглероженного слоя стали после различных видов термической обработки (рис. 6).

После всех режимов термической обработки, за исключением ТЦО, максимальная твердость стали 40Л наблюдается на глубине ~ 0,6–0,7 мм от поверхности (рис. 6). Далее значения твердости стали плавно снижаются до величины твердости сердцевины. Разница заключается в абсолютных значениях твердости отливок,

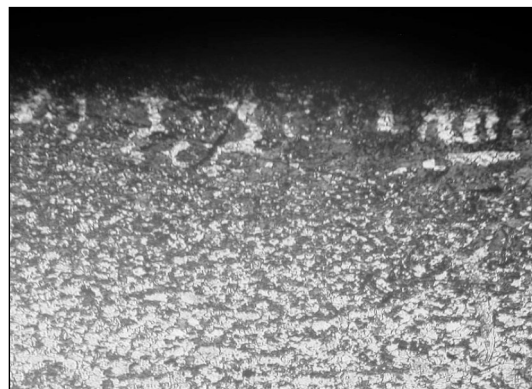


Рис. 5. Структура $\times 100$ поверхностного слоя и сердцевины отливки из стали 20Л после ТЦО (режим ТЦО — по табл. 4)

подвергнутых различным видам термической обработки. Наибольшая твердость поверхностного слоя наблюдается в отливках, не подвергавшихся термической обработке (~ 1100 HV_5). Нормализация незначительно снижает твердость поверхностного слоя деталей (до ~ 1050 HV_5). После высокотемпературного отжига максимальная твердость науглероженного слоя составляет ~ 840 HV_5 .

После ТЦО характер изменения микротвердости поверхностного слоя отливок существенно отличается от наблюдаемого после других видов термической обработки. На рис. 6 видно, что зависимость изменения твердости стали по глубине от поверхности детали имеет два максимума, между которыми находится зона пониженной твердости, причем ее значение ниже твердости сердцевины отливки. Такой характер зависимости связан с частичным обезуглероживанием поверхности отливок, подвергнутых ТЦО, обнаруженным при металлографическом анализе (см. рис. 5). Следует отметить, что максимальная твердость поверхностного слоя отливок, подвергнутых ТЦО, сопоставима с его твердостью после высокотемпературного отжига, однако после ТЦО обезуглероженный слой отсутствует. Характерно, что после ТЦО или нормализации отливок твердость сердцевины несколько повышается по сравнению с исходным литым состоянием.

Результаты исследования микроструктуры отливок из сталей 20Л и 40Л, полученных методом ЛГМ, свидетельствуют, что при термической обработке в их поверхностном науглероженном

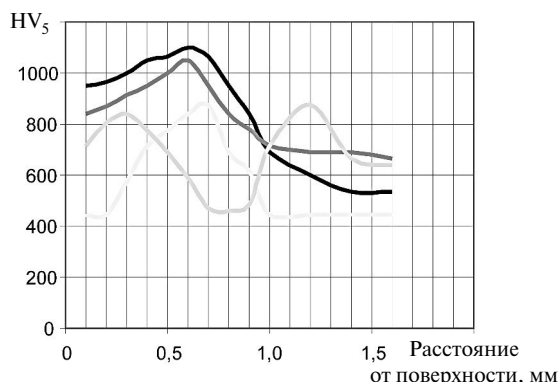


Рис. 6. Изменение микротвердости по глубине от поверхности отливок из стали 40Л после различных видов термической обработки:

1 — литое состояние; 2 — нормализация с высоким отпускком; 3 — высокотемпературный отжиг; 4 — ТЦО (по табл. 4)

слое протекают процессы, обусловленные диффузией углерода. Характер структурных изменений, происходящих при этих процессах, одинаковый в сталях 20Л и 40Л. Очевидно, что диффузия углерода из науглероженного слоя в отливках при термической обработке происходит как к поверхности отливки, так и к ее сердцевине. Диффузия углерода к поверхности отливки частично или полностью (как в случае ТЦО) компенсирует обезуглероживание поверхности. Диффузия углерода к сердцевине отливки увеличивает переходную зону от науглероженного слоя к сердцевине, «размывая» науглероженный слой. Из полученных экспериментальных результатов можно заключить,

что ТЦО является наиболее перспективным видом термической обработки для устранения науглероживания стальных отливок, получаемых методом ЛГМ. Варьируя режимы термоциклической обработки, можно выбрать такой, который позволяет полностью (или частично) устранить науглероженный слой, получаемый в стальных отливках при литье по газифицируемым моделям.

При изготовлении стальных отливок методом литья по газифицируемым моделям (ЛГМ) в их структуре происходит поверхностное науглероживание, причем с увеличением исходного содержания углерода в стали (от ~ 0,2 до ~ 0,4 % масс.) может также происходить объемное науглероживание. Науглероживание стальных отливок неравномерно по глубине и содержанию углерода. При этом глубина науглероженного слоя зависит от конфигурации отливки и ее параметров: веса, толщины стенки, соотношения веса отливки и веса литейной модели.

Термическая обработка стальных отливок, полученных методом ЛГМ, позволяет полностью устранить (или значительно уменьшить) глубину науглероженного слоя за счет инициирования процессов диффузии углерода. При этом диффузия углерода происходит из науглероженного слоя как к поверхности отливки, так и к ее сердцевине, что предотвращает получение неоднородной структуры детали. Наиболее эффективным видом термической обработки в данном случае является термоциклическая.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шуляк В.С. Исследование метода литья по газифицируемым моделям из пеностирола: Авт. дисс. ... к.т.н. / МАМИ. М., 1967.
2. Озеров В.Н., Шуляк В.С., Плотников Г.А. Литье по моделям из пеностирола. М.: Машиностроение. 1970. 183 с.
3. Шуляк В.С., Рыбаков С.А., Григорян К.А. Производство отливок по газифицируемым моделям. М.: МГИУ, 2001. 324 с.
4. Шуляк В.С. Литье по газифицируемым моделям. СПб.: Изд-во НПО «Профессионал», 2007. 408 с.
5. Шварцман Л.А., Леонидова М.Н., Шульц Л.А. Физико-химические основы взаимодействия металлов с контролируруемыми атмосферами. М.: Металлургия, 1980. 264 с.
6. Рыбаков С.А. Инновационные возможности литья по газифицируемым моделям, состояние и перспективы этого метода в России // Литейщик России. 2009. № 4. С. 35–41.
7. Шуляк В.С. О состоянии и развитии производства отливок литьем по газифицируемым моделям в России // Сб. трудов 1-й Международной научно-практической конференции «Литье по газифицируемым моделям». СПб., 2007. С. 28–32.
8. Мацяс Ю.А. Пенополистирол и его применение в технологии ЛГМ // Сб. трудов 1-й Международной научно-практической конференции «Литье по газифицируемым моделям». СПб., 2007. С. 35–39.
9. Спиридонов С.М., Белоусов О.В. Производство точных отливок из высокопрочного чугуна литьем по

газифицируемым моделям в ООО «Южноуральский арматурно-изоляционный завод Литейное производство». Дефекты литья. Способы предупреждения и мероприятия по устранению // Сб. трудов 1-й Международной научно-практической конференции «Литье по газифицируемым моделям». СПб., 2007. С. 45–51.

10. **Ефимова Н.П., Выдрин Б.И.** Проблемы производства отливок по газифицируемым моделям // Сб. трудов 1-й Международной научно-практической конференции «Литье по газифицируемым моделям». СПб., 2007. С. 12–16.

11. **Куликов И.С.** Термическая диссоциация соединений. М.: Metallurgiya, 1966. 251 с.

12. **Шварцман Л.А., Леонидова М.Н., Шульц Л.А.** Физико-химические основы взаимодействия металлов с контролируруемыми атмосферами. М.: Metallurgiya, 1980. 264 с.

13. **Шмыков А.А., Хорошайлов В.Г., Голиханданов Е.Л.** Термодинамика и кинетика процессов взаимодействия контролируемых атмосфер с поверхностью стали. М.: Metallurgiya, 1991. 160 с.

14. **Колбасников Н.Г., Кондратьев С.Ю.** Структура. Энтропия. Фазовые превращения и свойства металлов. СПб: Наука, 2006. 363 с.

15. **Голиханданов Е.Л., Хайдоров А.Д.** Ускорение процессов диффузионного насыщения при неизотермической ХТО // Metallurgiya i termicheskaya obrabotka metallov. 2001. № 6. С. 16–20.

16. **Голиханданов Е.Л., Хайдоров А.Д., Хен Ли Гей.** Комбинированные режимы цементации стали 20ХГНР // Metallurgiya i termicheskaya obrabotka metallov. 1992. № 10. С. 2–4.

17. **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Орыщенко А.С., Фукс М.Д., Петров С.Н.** Трансформация структуры жаропрочного сплава 0,45С 26Cr 33Ni 2Si 2Nb при длительной высокотемпературной выдержке // Metallurgiya i termicheskaya obrabotka metallov. 2013. № 10 (700). С. 7–14.

18. **Rudskoi A.I., Kondrat'ev S.Yu., Anastasiadi G.P., Oryshchenko A.S., Fuks M.D., Petrov S.N.** Transformation of the Structure of Refractory Alloy 0.45C-26Cr-33Ni-2Si-2Nb During a Long-Term High-Temperature Hold // Metal Science and Heat Treatment. January 2014. Vol. 55. № 9–10. P. 517–525. (DOI 10.1007/s11041-014-9664-6).

19. **Анастасиади Г.П., Кондратьев С.Ю., Орыщенко А.С., Петров С.Н., Фукс М.Д.** Влияние циклов «нагрев охлаждение» на длительную прочность литого жаропрочного сплава 45Х26Н33С2Б2 // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 1 (166). С. 113–120.

20. **Забелин С.Ф.** Общие закономерности формирования цементитного слоя стали при термоциклическом режиме насыщения // Metallurgiya i termicheskaya obrabotka metallov. 1992. № 2. С. 2–6.

21. **Хайдоров А.Д., Кондратьев С.Ю.** Термоциклическая обработка литой быстрорежущей стали Р6М5 // Технология машиностроения.— 2010.— № 12. С. 5–9.

22. **Хайдоров А.Д., Кондратьев С.Ю.** Влияние термоциклической обработки на структуру литой быстрорежущей стали Р6М5-Ш // Metallurgiya i termicheskaya obrabotka metallov. 2011. № 6. С. 42–47.

REFERENCES

1. **Shuliak V.S.** Issledovaniye metoda litya po gazifitsiruyemyim modelyam iz penostirola: Avt. diss. ... k.t.n. / MAMI. M., 1967. (rus.)

2. **Ozerov V.N., Shuliak V.S., Plotnikov G.A.** Litye po modelyam iz penostirola. M.: Mashinostroyeniye. 1970. 183 s. (rus.)

3. **Shuliak V.S., Ribakov S.A., Grigoryan K.A.** Proizvodstvo otlivok po gazifitsiruyemyim modelyam. M.: MGIU, 2001. 324 s. (rus.)

4. **Shuliak V.S.** Litye po gazifitsiruyemyim modelyam. SPb.: Izd-vo NPO «Professional», 2007. 408 s. (rus.)

5. **Shvartsman L.A., Leonidova M.N., Shults L.A.** Fiziko-khimiicheskiye osnovy vzaimodeystviya metallov s kontroliruyemyimi atmosferami. M.: Metallurgiya, 1980. 264 s. (rus.)

6. **Rybakov S.A.** Innovatsionnyye vozmozhnosti litya po gazifitsiruyemyim modelyam, sostoyaniye i perspektivy etogo metoda v Rossii. *Liteyshchik Rossii*. 2009. № 4. S. 35–41. (rus.)

7. **Shuliak V.S.** O sostoyanii i razvitiy proizvodstva otlivok lityem po gazifitsiruyemyim modelyam v Rossii. *Sb. trudov 1-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Litye po gazifitsiruyemyim modelyam»*. SPb., 2007. S. 28–32. (rus.)

8. **Matsyas Yu.A.** Penopolistrol i yego primeneniye v tekhnologii LGM. *Sb. trudov 1-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Litye po gazifitsiruyemyim modelyam»*. SPb., 2007. S. 35–39. (rus.)

9. **Spiridonov S.M., Belousov O.V.** Proizvodstvo tochnykh otlivok iz vysokoprochnogo chuguna lityem po gazifitsiruyemyim modelyam v ООО «Yuzhnouralskiy armaturno-izolyatornyy zavod Liteynoye proizvodstvo». Defekty litya. Sposoby preduprezhdeniya i meropriyatiya po ustraneniyu. *Sb. trudov 1-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Litye po gazifitsiruyemyim modelyam»*. SPb., 2007. S. 45–51. (rus.)

10. **Yefimova N.P., Vydrin B.I.** Problemy proizvodstva otlivok po gazifitsiruyemyim modelyam. *Doklad v sb.*

trudov 1-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Lite po gazifitsiruyemyim modelyam», SPb.: 2007. S. 12–16. (rus.)

11. **Kulikov I.S.** Termicheskaya dissotsiatsiya soye-dineniy. M.: Metallurgiya, 1966. 251 s. (rus.)

12. **Shvartsman L.A., Leonidova M.N., Shults L.A.** Fiziko-khomicheskiye osnovy vzaimodeystviya metallov s kontroliruyemyimi atmosferami. M.: Metallurgiya, 1980. 264 s. (rus.)

13. **Shmykov A.A., Khoroshailov V.G., Gyulikhandanov Ie.L.** Termodinamika i kinetika protsessov vzaimodeystviya kontroliruyemykh atmosfer s poverkhnostyu stali. M: Metallurgiya, 1991. 160 s. (rus.)

14. **Kolbasnikov N.G., Kondratiev S.Iu.** Struktura. Entropiya. Fazovyye prevrashcheniya i svoystva metallov. SPb: Nauka, 2006. 363 s. (rus.)

15. **Gyulikhandanov Ie.L., Khaydorov A.D.** Uskoreniye protsessov diffuzionnogo nasyshcheniya pri neizotermicheskoy KhTO. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2001. № 6. S. 16–20. (rus.)

16. **Gyulikhandanov Ye.L., Khaydorov A.D., Khen Li Gey.** Kombinirovannyye rezhimy tsementatsii stali 20Kh-GNR. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 1992. № 10. S. 2–4. (rus.)

17. **Rudskoi A.I., Kondratiev S.Yu., Anastasiadi G.P., Oryshchenko A.S., Fuks M.D., Petrov S.N.** Transfor-

matsiya struktury zharoprochnogo splava 0,45C 26Cr 33Ni 2Si 2Nb pri dlitelnoy vysokotemperaturnoy vyderzhke. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2013. № 10 (700). S. 7–14. (rus.)

18. **Rudskoi A.I., Kondrat'ev S.Yu., Anastasiadi G.P., Oryshchenko A.S., Fuks M.D., Petrov S.N.** Transformation of the Structure of Refractory Alloy 0.45C-26Cr-33Ni-2Si-2Nb During a Long-Term High-Temperature Hold. *Metal Science and Heat Treatment*. January 2014. Vol. 55, № 9–10. P. 517–525. (DOI 10.1007/s11041-014-9664-6). (rus.)

19. **Anastasiadi G.P., Kondratiev S.Yu., Oryshchenko A.S., Petrov S.N., Fuks M.D.** Vliyaniye tsiklov «nagrev okhlazhdeniye» na dlitelnyuyu prochnost litogo zharoprochnogo splava 45Kh26N33S2B2. *Nauchno-tekhnicheskoye vedomosti SPbGPU*. 2013. № 1 (166). S. 113–120. (rus.)

20. **Zabelin S.F.** Obshchiye zakonomernosti formirovaniya tsementitnogo sloya stali pri termotsiklicheskoy rezhime nasyshcheniya. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 1992. № 2. S. 2–6. (rus.)

21. **Khaydorov A.D., Kondratiev S.Iu.** Termotsiklicheskaya obrabotka litoy bystrorezhushchey stali R6M5. *Tekhnologiya mashinostroyeniya*. 2010. № 12. S.5–9. (rus.)

22. **Khaydorov A.D., Kondratiev S.Yu.** Vliyaniye termotsiklicheskoy obrabotki na strukturu litoy bystrorezhushchey stali R6M5-Sh. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2011. № 6. S. 42–47. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОНДРАТЬЕВ Сергей Юрьевич — доктор технических наук профессор кафедры технологии и исследований материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: petroprom2013@yandex.ru

ХАЙДОРОВ Александр Дмитриевич — кандидат технических наук доцент кафедры технологии и исследований материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: akhaidorov@yandex.ru

AUTHORS

KONDRAT'EV Sergei Yu. — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: petroprom2013@yandex.ru

KHAIDOROV Aleksandr D. — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: akhaidorov@yandex.ru