

В. А. Тельдеков¹, Л. М. Гуревич²

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЦЕМЕНТАЦИИ СТАЛИ
БЕЗ ПРИМЕНЕНИЯ ЭНДОТЕРМИЧЕСКИХ АТМОСФЕР**

¹ ОАО «ВНИИТМАШ», Волгоград,

² Волгоградский государственный технический университет

e-mail: mv@vstu.ru

Проведено исследование микроструктуры и толщины диффузионных покрытий, получаемых при варьировании углеродного потенциала газовой среды за счет изменения температуры процесса и дополнительной подачи в печь «окислителей» метана – двуокиси углерода или атмосферного воздуха на разных стадиях цементации.

Ключевые слова: сталь, диффузия, цементация, воздух, природный газ, углеродный потенциал, микроструктура, эффективная толщина, карбидная фаза.

V. A. Teldekov¹, L. M. Gurevich²

**RESEARCH OF STEEL CEMENTATION TECHNOLOGY WITHOUT
THE APPLICATION OF ENDOTHERMAL ATMOSPHERES**

¹ OAO «VNITMASH», Volgograd

² Volgograd State Technical University

Changes in the microstructure and effective thickness of diffusion coatings were studied at different values of the carbon potential.

The carbon potential was varied by lowering the process temperature and additional feeding into the furnace at different stages of carburizing of carbon dioxide or atmospheric air as an "oxidizer" of methane.

Keywords: steel, diffusion, carburizing, air, natural gas, carbon potential, microstructure, effective thickness, carbide phase.

Наиболее распространенным вариантом выполнения цементации деталей машин при мелкосерийном производстве является обработка их в среде природного газа (метана). При этом для обеспечения достаточного уровня диссоциации молекул метана и образования «активных» атомов углерода используются повышенные температуры выполнения процесса насыщения – до 940–950 °С. Формирование диффузионного слоя сопровождается в таких условиях большими расходами энергоресурсов, а также образованием сажи на поверхности изделий и развитой карбидной фазы в структуре. Это объясняется низким содержанием активных компонентов печной атмосферы после диссоциации метана (5–6 % CO, 6–7 % CH₄, до 1,5 % CO₂ и более 70 % H₂.)

Вместе с тем, в материалах зарубежных (фирма Айхелин, ФРГ) и отечественных специалистов [1–8] были показаны принципиальная возможность и некоторые результаты практических проб по использованию дополнительных кислородосодержащих компонентов (воздух, двуокись углерода и т. п.) (рис. 1). Например, в камерных печах фирмы IPSEN International для формирования атмосфер, используемых для технологий с рабочими температурами выше 850 °С (цементации, нитроцементации, светлой закалки и светлого отжига), предлагается система Supercarb® с прямой подачей смеси энергоноситель–воздух в камеру печи (9).

Получение технологической атмосферы непосредственно в пространстве цементационной печи без применения промежуточных эндоге-

нераторов позволяет существенно снизить расход энергетических ресурсов, расходуемых, в том числе, на нагрев до, образующегося в нем

эндотермического газа и повторный нагрев технологической атмосферы при вводе в цементационную печь.

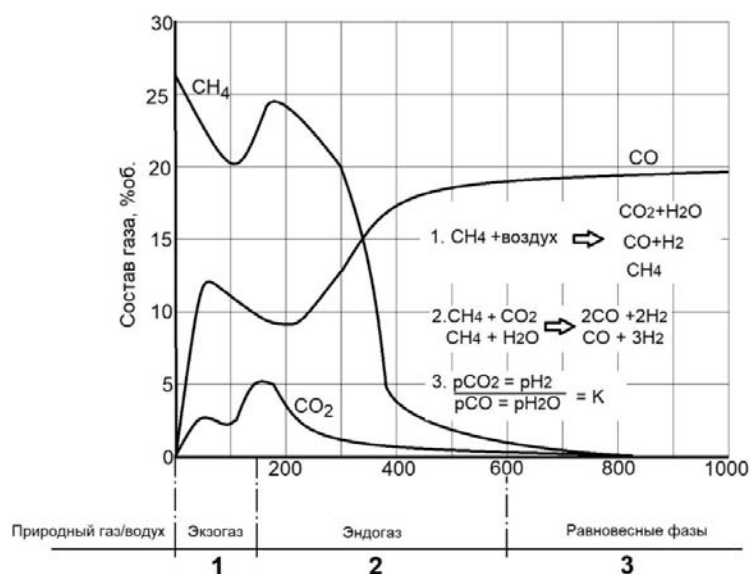
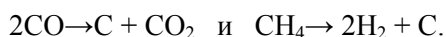


Рис. 1. Состав печной атмосферы, получаемой из смеси «природный газ-воздух» при различных температурах

Полученные результаты объясняют влиянием более активной атмосферы, где при температуре цементации атомы углерода образуются по реакциям:



В настоящей работе проведены исследования и разработка технологии цементации деталей машин и тракторов с целью ускорения процесса обработки, улучшения качества диффузионного слоя и повышения работоспособности деталей в условиях интенсивного трения.

Экспериментальные работы выполнялись на шахтной печи СШЦМ-6.6/9 термической лаборатории ОАО «ВНИИТМАШ» с применением природного газа из сети и воздуха из воздухопроводки эндогенератора ЭН-16. На пробные садки для выполнения различных режимов цементации использовали необходимое количество металлобалласта, образцы-свидетели из сталей 25ХГТ, 20ХНЗА, 20Г и 15ХМ, а также фольговые пробы из стали 08КП.

Контроль количества подачи в печь природного газа и воздуха выполняли с помощью специальных ротаметров. Состав газовой атмосферы печи в каждом режиме определяли химическим анализом проб на приборах типа ГХА-1. Контроль углеродного потенциала печной атмосферы проводили путем химического анализа фольг после выдержки их в печи за один час до окончания стадии обработки. Со-

держание углерода по толщине цементованного слоя определяли химическим анализом стружки от специальных образцов. Общая толщина и структура диффузионного слоя оценивалась на отожженных образцах с применением микроскопов "Neophot" и Olympus BX-61 при увеличении от $\times 100$ до $\times 400$.

На первом этапе определялось влияние количества подаваемого воздуха в печь на величину углеродного потенциала атмосферы при стандартной температуре нагрева ($920-930^\circ\text{C}$). Общее время обработки – 2 часа, расход природного газа – 500 л/ч, подача воздуха изменялась от 0 до 150 % от объема СШЦМ-6.6/9. Результаты химического анализа фольг показаны в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость углеродного потенциала в печи СШЦМ-6.6/9 от объема подаваемого воздуха при постоянном расходе природного газа

Часовая подача воздуха в % от объема СШЦМ	Углеродный потенциал, C_p , %
0	1,17
15	1,12
30	1,10
50	1,04
75	0,95
100	0,80
150	0,20

Как видно из табл. 1, при постоянных условиях обработки (температура, время) углеродный потенциал газовой атмосферы зависит от количества подаваемого воздуха в печь. Этот факт можно использовать для выбора условий насыщения на разных стадиях процесса цементации.

Режимы цементации экспериментальных образцов выбирались с изменением нескольких технологических параметров (температура нагрева, количество и тип газа-окислителя) (табл. 2).

Общая длительность процесса цементации, кроме стадий нагрева и подстуживания, составляла для режимов № 1 и № 5 – 6,5 часов, а по режиму № 4 – 3,5 часа. Технологические параметры цементации по режиму № 1 характерны для действующей технологии многих заводов отрасли, когда температура процесса (920–930 °С) и подача в печь газа-карбюратора (около 650 л/ч) постоянны на протяжении всего процесса, не считая стадий нагрева и подстуживания.

Таблица 2

Экспериментальные технологические параметры процесса цементации в печи СШЦМ-6.6/9

Технологические параметры цементации	Показатели параметров по периодам процесса			
	нагрев	насыщение	диффузия	подстуживание
Режим № 1				
Температура, °С	860–920	920–930	920–930	≤860
Расход природного газа, л/ч	480–500	630–650	630–650	380–400
Режим № 2				
Температура, °С	830–860	860–920	2 часа	–
Расход природного газа, л/ч	380–400	480–500	2 часа	–
CO ₂ , л/ч	–	65–70	2 часа	–
Режим № 3				
Температура, °С	830–860	860–920	2 часа	–
Расход природного газа, л/ч	380–400	480–500	2 часа	–
воздуха, л/ч	–	65–70	2 часа	–
Режим № 4				
Температура, °С	860–920	920–930	920–930	≤860
Расход природного газа, л/ч	380–400	480–500	480–500	380–400
воздуха, л/ч	–	–	65–70	65–70
Режим № 5				
Температура, °С	860–920	860–930	920–930	≤860
Расход природного газа, л/ч	380–400	480–500	480–500	380–400
CO ₂ , л/ч	–	–	65–70	65–70

В течение процесса цементации по разным режимам контролировались газовый состав и величина углеродного потенциала печной

атмосферы, результаты анализа которых представлены в табл. 3.

Таблица 3

Состав печной атмосферы и углеродный потенциал у различных режимов цементации

Режим цементации	Температура	Состав печной атмосферы, %			Углеродный потенциал, %
		CO	CH ₄	H ₂	
№ 1	920–930	8,2	3,3	57,0	2,42
	920–930	5,6	4,0	59,2	2,20
№ 2	860–930	18,0	3,8	54,1	1,94
№ 3	860–930	8,5	3,8	54,5	1,7
№ 5	860–930	2,1	5,4	59,1	1,82
	920–930	27,0	2,5	53,6	2,36

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что даже при постоянстве температуры нагрева и подаче в печь газа-карбюратора (режим № 1) наблюдается изменение количественного содержания основных компонентов печной атмосферы – в течение 3 ч концентрация окиси углерода (CO) снижается от 8,2 до 5,6 %, а количество остаточного метана (CH₄) составляет 3,3–4,0 %.

Оценка качества цементованных слоев проводилась как в отожженном, так и в закаленном состоянии образцов. Внешним осмотром установлено, что на поверхности охлажденных образцов после цементации по режиму № 1 (на воз-

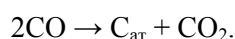
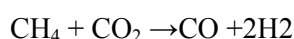
духе) образовался рыхлый налет в виде «шубы», а под ним мелкодисперсная сыпь («песок») красно-бурого оттенка. Результаты металлографического анализа толщины цементованного слоя образцов из стали 20ХН3А в отожженном состоянии представлены в табл. 4. Структура образцов после цементации по режиму № 1 содержит в поверхностных зонах слоя избыточную карбидную фазу (рис. 2). Для образцов, подвергнутых цементации по режиму № 1, характерна достаточно высокая степень насыщения слоем углеродом, когда эвтектоидная зона достигает толщины 0,9–1,1 мм что составляет более 50 % от общей толщины цементованного слоя (рис. 2).

Таблица 4

Толщины зон цементованного слоя, полученных по различным режимам

Режим цементации	Толщина цементованного слоя, мм		
	эвтектоидная зона	общая до ½ переходной зоны	общая до структуры сердцевины
№ 1	1,1	1,55	1,75
№ 4	0,5-0,55	0,75	0,90-0,95
№ 5	0,75-0,70	1,0	1,4 – 1,45

Показанные в табл. 3 сведения по газовому составу печной атмосферы при цементации в продуктах диссоциации природного газа свидетельствуют о наличии при режиме цементации № 1 повышенного количества остаточного метана (CH₄). При довольно низкой концентрации окиси углерода (до 2,0 %) в газовой среде остаточный метан не может оказывать какого-либо положительного воздействия на процесс насыщения стали углеродом. Поэтому показанные выше результаты цементации по режиму I можно использовать в качестве сравнительного варианта действующей технологии при оценке эффективности снижения количества остаточного метана в технологической атмосфере за счет дополнительной подачи в печь кислородсодержащих компонентов при цементации природным газом. Анализ сведений о схемах взаимодействия различных компонентов газовой среды при цементации стали показывает возможность протекания в этом случае реакций



Результаты многих исследователей [3–9] подтверждают целесообразность одновременной подачи в печи цементации природного газа



Рис. 2. Разорванная карбидная сетка в структуре образцов, отожженных после цементации по режиму № 1 (×200)

и воздуха, когда этот прием рассматривается как «безгенераторной» способ приготовления контролируемой атмосферы. При этом снижается количество остаточного метана и возрастает концентрация окиси углерода в атмосфере печи. В отдельных случаях опробовали попеременную подачу в печь цементации природного газа и воздуха.

На основании изложенных сведений проводилась экспериментальная проверка эффективности дополнительной подачи в печь двуокиси углерода и воздуха. Технологические парамет-

ры новых режимов цементации показаны в табл. 2. По режимам № 2 и № 3 оценивались кратковременные технологические условия цементации с длительностью насыщения 2 часа при пониженных (до 860 °С) температурах. Для сравнительной оценки влияния второго компонента газовой среды дополнительно к природному газу в печь подавались двуокись углерода (режим № 2 и сжатый воздух (режим № 3), при этом оценивался газовый состав печной атмосферы величина углеродного потенциала в ней.

Режим № 4 выполнялся как скорректированный процесс цементации с сокращенной длительностью стадии насыщения и диффузии (всего 3,5 ч) при дополнительной подаче в печь сжатого воздуха во второй части процесса.

В режиме № 5 были использованы как снижение температуры печи на стадии насыщения, так и дополнительная подача в печь двуокиси углерода во второй половине процесса. Общая длительность периода насыщения и диффузии составляла 6,5 ч.

Результаты оценки состава печной атмосферы и величины углеродного потенциала газовой среды исследуемых режимов ХТО показаны в табл. 3. Дополнительная подача двуокиси углерода в печь (режим № 2) даже при пониженных температурах обеспечивает резкое повышение (до 18 %) концентрации СО в атмосфере печи при умеренном содержании остаточного метана (3,8 %). При дополнительной подаче в печь сжатого воздуха (режим № 3) содержание СО несколько ниже (8,5 %), чем при использовании СО₂, однако и этот показатель лучше, чем при использовании в этих условиях только природного газа. При этом сохраняется достаточно высокий уровень углеродного потенциала газовой среды (1,94 и 1,70 %).

Дополнительная подача в печь двуокиси углерода во время высокотемпературной (920–

930 °С) стадии процесса цементации (режим № 5) оказывает еще более положительное воздействие на состав печной атмосферы: содержание СО возрастает до 27 %, а концентрация остаточного метана снижается до 2,5 % при содержании водорода в количестве 53,6 %. Сравнение этих показателей с близким режимом № 1 без использования дополнительных компонентов газовой среды показывает, что содержание СО увеличилось более чем в 3 раза, а количество остаточного метана снизилось с 3,3 до 2,5 %. При режиме № 5 получен высокий углеродный потенциал атмосферы – 2,36 %. По своему составу печная атмосфера при цементации по режиму № 5 близка к составу атмосфер при использовании эндотермического газа.

Внешний вид цементованных по режимам № 4 и № 5 образцов соответствовал результатам при газовой цементации в эндотермической атмосфере: чистые гладкие поверхности серого цвета. Результаты оценки толщины цементованного слоя образцов из стали 20ХН3А в отожженном состоянии показаны в табл. 4. В структурах образцов по обоим режимом избыточная карбидная фаза отсутствует, общая толщина слоя соответствует длительности активной стадии процесса цементации: по режиму № 4 – 3,5 ч, а по режиму № 5 – 6,5 ч. В каждом из анализируемых режимов структура цементованного слоя содержала зону эвтектоидного насыщения стали углеродом достаточной глубины, которая превышала 50 % от общей толщины цементованного слоя (рис. 3). Так, по данным химического анализа стружки с послойного образца, подвергнутого ХТО по режиму № 5, поверхностная концентрация в слое достигает 1,05–1,1 %, а эвтектоидная концентрация углерода (0,80 %) располагается на глубине около 0,75 мм от поверхности.

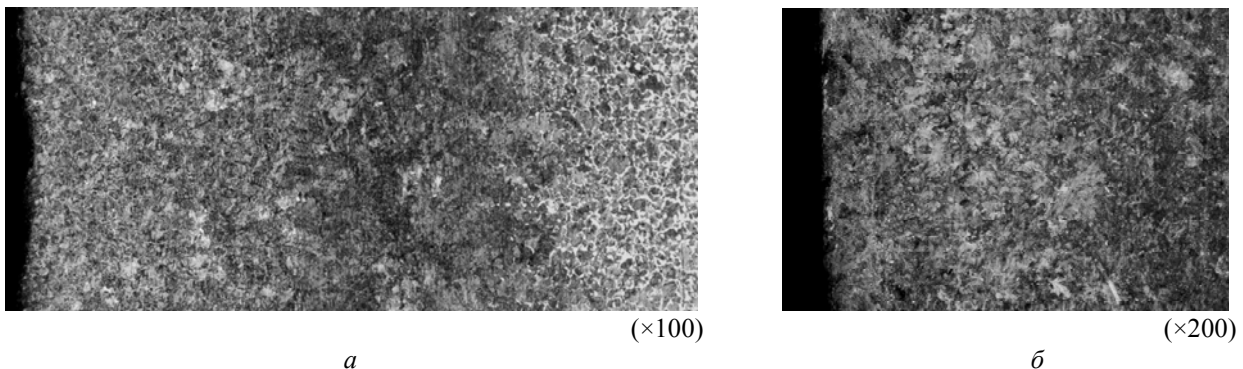


Рис. 3. Микроструктура упрочненного слоя в отожженном образце после цементации по режиму № 5

Вывод

Определены технологические условия оптимизации газовой атмосферы на основе природного газа. Полученные результаты свидетельствуют о практической возможности формирования качественного цементованного слоя при использовании дополнительной подачи в печь «окислителя» метана в виде двуокиси углерода или атмосферного воздуха. При этом снижается количество сажи в печи и предотвращается образование избыточной карбидной фазы в структуре слоя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Минкевич, А. Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов / А. Н. Минкевич. – М. : Машиностроение, 1965. – 491с.
2. Долотов, Г. П. Оборудование термических цехов и лабораторий испытания металлов / Г. П. Долотов, Е. А. Кондаков. – М. : Машиностроение, 1988. – 336 с.
3. Кальнер, В. Д. Современные методы цементации и нитроцементации / В. Д. Кальнер, С. А. Юрасов. – М. : Машиностроение, 1987. – 65 с.
4. Goehring W., Luiten C. H. Direct atmosphere generation and control in heat treatment furnaces // Journal of Heat Treating. – 1980. – Т. 1. – №. 4. – С. 10-14.
5. A New Gas Carburizing Process without Use of a Prior Gas Generator //Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan. Volume 27 (1987). Issue 11. P.937.
6. Stickels C. A., Mack C. M., Brachaczek M. Gas carburizing of steel with furnace atmospheres formed (In Situ) from propane and air: Part I. The effect of air-propane ratio on furnace atmosphere composition and the amount of carburizing //Metallurgical Transactions B. – 1980. – Т. 11. – №. 3. – С. 471-479.
7. Göring, W. Erfahrungen mit der Regelung generator loser Ofenatmosphäre / W. Göring // Z.f. wirtsch. Fertig. – 1985. – № 3. – С. 137–140.
8. Попов, В. К. Газовая цементация стали при прямой генерации печной атмосферы / В. К. Попов // Современные задачи инженерных наук. – 2017. – С. 311–313.
9. Ipsen Group. Products. Atmosphere Technology. Sealed Quench Furnaces. Ipsen Gas Supply Systems. <https://www.ipsen.de/home/products/atmosphere-technology/sealed-quip-furnaces/gas-supply-systems>.