В. А. Тельдеков¹, Л. М. Гуревич²

**ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЦЕМЕНТАЦИИ ВТУЛОК ЗВЕНА ГУСЕНИЦ
В АТМОСФЕРЕ ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ**

¹ ОАО «ВНИИТМАШ», Волгоград

² Волгоградский государственный технический университет

e-mail: mv@vstu.ru

Разработаны новые трех- и четырехцикловые экспериментальные режимы цементации на толщину слоя до 4,0 мм в атмосфере природного газа с регулируемыми добавками воздуха. Определены рациональные схемы добавок воздуха в атмосферу метана для цементации в шахтных печах на различные толщины упрочненного слоя. Промышленное опробование новых режимов показало возможность сокращения общей длительности процесса цементации на 25 %; значительное сокращение энергозатрат на обогрев печей; снижение расхода природного газа на выполнение одного режима цементации на 35 %.

Ключевые слова: сталь, диффузия, цементация, шахтная печь, воздух, природный газ, углеродный потенциал, микроструктура, толщина, карбидная фаза, многоцикловые режимы.

V. A. Teldekov¹, L. M. Gurevich²

**OPTIMIZATION OF CEMENTATION TECHNOLOGY OF TRACK
LINK SLEEVES IN THE ATMOSPHERE METHANE-AIR MIXTURE**

¹ OAO «VNIITMASH», Volgograd

² Volgograd State Technical University

New three- and four-cycle experimental cementation regimes for a layer thickness of up to 4.0 mm in an atmosphere of natural gas with air additives have been developed. Rational schemes for adding air to the atmosphere of methane for carburizing in shaft furnaces at different thicknesses of the hardened layer have been determined. Industrial testing of new modes has shown the possibility of reducing the total duration of the cementation process by 25%; significant reduction in energy consumption for heating furnaces and reduction of natural gas consumption for one carburizing mode by 35%.

Keywords: steel, diffusion, carburizing, shaft furnace, air, natural gas, carbon potential, microstructure, thickness, carbide phase, multi-cycle modes.

На предприятиях отечественного машиностроения производится большое количество изделий, подвергаемых в процессе эксплуатации воздействию многократных циклических или высоких статических нагрузок. При этом происходит нарушение качества поверхности и геометрии деталей с последующим их отказом ранее установленного нормативными документами ресурса работы. В их число входят высокомодульные зубчатые колеса главных и бортовых передач автомобилей, а также детали ходовой части сельскохозяйственных и промышленных тракторов.

Как правило, такие детали подвергаются поверхностному упрочнению путем цементации на толщину слоя не менее 2,0 мм и закалке на высокую твердость (60–64 HRC). При этом химико-термическая обработка выполняется зачастую в печах шахтного типа с применением природного газа при температурах не ниже 950 °С, что способствует ускорению процесса диссоциации метана. Такая технология используется для упрочнения широкой номенклатуры втулок звена гусениц тракторов Т-330 и других на Чебоксарском агрегатном заводе (ЧАЗ). Цементация деталей на толщину слоя от 2,0 до 4,0 мм выполняется в шахтных печах типа Ц-105 с длительностью от 25 до 46 часов. При этом происходит большое выпадением сажи на поверхности деталей, а закалка их производится с повторного нагрева после тщательной дробеочистки.

Учитывая имеющиеся в настоящее время технические наработки и наши практические результаты [1–4], были проведены новые экспериментальные режимы цементации на толщину слоя до 4,0 мм в атмосфере природного газа с регулируемыми добавками воздуха. Для этого использовалась шахтная печь СШЦМ-6.6/9 термической лаборатории ОАО «ВНИИТМАШ», природный газ из сети и воздух от газодувки эндогенератора ЭН- 16 и печи Ц-105 и Ц-75

Чебоксарского агрегатного завода (ЧАЗ). Все пробные садки печи составлялись из необходимого количества «металлобалласта» и образцов из сталей 25ХГТ, 20ХН3А, 15ХМ и 20Г, а фольговые «пробы» – из стали 08кп. Контроль количества подачи в печь природного газа и воздуха выполняли по специальным ротаметрам, а состав газовой атмосферы печи в каждом режиме определяли химическим анализом проб на газоанализаторе типа ГХА-1. Контроль углеродного потенциала печной атмосферы проводили путем химического анализа фольг после выдержки их в печи один час до окончания каждой стадии процесса. Содержание углерода по толщине цементованного слоя определяли химическим анализом стружки от специальных цилиндрических образцов. Общую толщину и структуру диффузионного слоя оценивали на отожженных образцах с применением микроскопов "Neophot" и Olympus BX-61 при увеличениях от $\times 100$ до $\times 400$ крат.

Новые экспериментальные режимы цементации проводили с учетом эффективности «ступенчатой» схемы процесса [1, 3] с изменением величины углеродного потенциала печной атмосферы. При этом, вместе с использованием ранее полученных результатов (режимы 4, 5) [4] применяли новые условия обработки (температуру и длительность) аналогично цементации реальных втулок звена на заводе Чебоксарского агрегатного завода. В табл. 1 показаны условия нового режима цементации в печи СШЦМ-6.6/9.

Для оценки возможности получения толщины слоя не менее 2 мм, длительность стадии насыщения (в CH_4) составляла 10 ч, а подача воздуха в печь выполнялась во второй стадии (диффузии) также в течение 10 ч. Нагрев садки до температуры цементации и подстуживания перед выгрузкой из печи проводили на всех режимах в атмосфере пониженной подачи природного газа.

Таблица 1

Условия нового режима цементации в печи СШЦМ-6.6/9

Период/стадия	Температура, °С	Длительность, ч	Объем газов, $\text{м}^3/\text{ч}$	
			природный газ	воздух
насыщение	940–950	10,0	0,50	–
диффузия	940–950	10,0	0,47	0,25

Сопутствующий анализ печной атмосферы в конце стадий насыщения, диффузии и под-

стуживания показал уровень углеродного потенциала, соответственно, 3,4; 2,8 и 2,2 %.

Поверхность обработанных деталей и образцов чистая, без выделений сажи, темно-серого цвета. В микроструктуре упрочненного слоя образца грубой карбидной фазы не обнаружено, общая толщина слоя составляет 1,8–1,9 мм. Необходимо отметить, что полученные нами ранее [4] результаты прямого определения уровня углеродного потенциала C_p газовоздушной смеси при температуре 920–930 °С показали существенное влияние количества воздуха в ней. Так, при увеличении объема воздуха до 100 % (соотношение воздух/природный газ 1:1) уровень углеродного потенциала печной атмосферы снижается до 0,80 %, т. е. на 30 %. Имеет влияние также и длительность обработки изделий в такой атмосфере: по нашим данным, выдержка в атмосфере метана более 6 ч приводит к снижению объема образующейся там окиси углерода СО и росту количества остаточного метана CH_4 , что реально может быть причиной снижения ин-

тенсивности насыщения стали углеродом и повышения количества сажи внутри печи. Учитывая эти обстоятельства, были проведены другие экспериментальные режимы с более короткими по времени стадиями насыщения и диффузии при повторении этих циклов несколько раз.

Первые режимы новой схемы цементации с тремя последовательными циклами насыщения и диффузии выполнялись в печи Ц-105 термического цеха завода ЧАЗ. Загрузка всех корзин печи, правила нагрева и охлаждения садки соответствовали заводским условиям. Совместно с втулками звена гусениц из стали 15ХМ загружались специальные образцы для контроля качества цементованного слоя. Для повышения объективности оценки результатов режим по указанной схеме цементации выполнялся на двух печах с сохранением идентичности всех условий. Технологические параметры такого режима показаны в табл. 2.

Таблица 2

**Параметры экспериментального режима цементации
с трехцикловым изменением стадий**

Цикл	Стадия	Температура, °С	Длительность, ч	Подача газов, $nm^3/ч$	
				природный газ	воздух
Цикл 1	насыщение	950–960	4,0	0,9	–
	диффузия		3,0	0,7	0,2
Цикл 2	насыщение		3,0	0,9	–
	диффузия		3,0	0,7	0,2
Цикл 3	насыщение		3,0	0,9	—
	диффузия		4,0	0,6	0,3

Как видно, в этом случае применялось сокращение длительности стадии насыщения после первого цикла, а также увеличение длительности стадии диффузии и объема воздуха последнего цикла (до 50 %) от объема метана.

Это повлияло на состав печной атмосферы и результаты цементации. Положительным фактором здесь является рост содержания окиси углерода СО до 9,6 %, т. е. повышение насыщающей способности газовой смеси (табл. 3).

Таблица 3

**Изменение содержания окиси углерода и метана
на различных циклах режима цементации**

Компоненты газовой смеси	Содержание компонентов газовой смеси при различных циклах режима цементации, %		
	Цикл 1	Цикл 2	Цикл 3
окись углерода СО	6,2	7,0	9,6
метан CH_4	3,5	2,8	1,7

Поверхность деталей и образцов чистая, без присутствия сажи. Общая толщина цементованного слоя составляет 2,4–2,6 мм, а толщина перлитной зоны – 1,7–1,8 мм.

Экспериментальный режим цементации с четырехцикловым изменением стадий насыщения и диффузии проводился в печи СШЦМ лаборатории ОАО ВНИИТмаш. При этом активное вре-

мя процесса было увеличено до 24 ч с целью образования диффузионного слоя толщиной не ме-

нее 3,0 мм. Технологические параметры обработки в печи СШЦМ-6.6/9 показаны в табл. 4.

Таблица 4

Параметры экспериментального четырехциклового режима цементации

Цикл	Стадия	Температура, °С	Длительность, ч	Подача газов, нм ³ /ч	
				природный газ	воздух
Цикл 1	насыщение	940–950	4,0	0,5	–
	диффузия		3,0	0,45	0,25
Цикл 2	насыщение		3,0	0,5	–
	диффузия		3,0	0,45	0,25
Цикл 3	насыщение		3,0	0,5	–
	диффузия		3,0	0,45	0,25
Цикл 4	насыщение		2,0	0,5	–
	диффузия		3,0	0,45	0,25

Режим цементации с четырехциклового схемой имел свои особенности: постоянная длительность всех стадий диффузии с равным объемом подаваемого воздуха и снижение длительности стадии насыщения в два раза. По результатам контроля газового состава атмосферы, величина углеродного потенциала на стадиях насыщения возрастала от 2,2 до 3,4 %, а на стадиях диффузии уровень C_p также стабильно повышался от 1,8 до 3,0 %. Это подтверждает имеющиеся мнения и наши результаты [4] о положительной роли добавок газа-окислителя на повышение количества СО и углеродного потенциала при одновре-

менном снижении остаточного метана в газовой атмосфере. Такие условия обеспечивают ускорение роста диффузионного слоя.

Внешний вид деталей и образцов соответствовал принятым нормам, а общая толщина цементованного слоя составляет около 3,6 мм. Микроструктура отожженного образца состоит из плотной насыщенной поверхностной зоны с тонкими выделениями карбидной фазы (рис. 1. и 2) Таким образом показано, что применение высоких добавок воздуха (около 50 % об.) на стадиях диффузии за 3–4 цикла обеспечивают интенсификацию процесса цементации.

Рис. 1. Микроструктура упрочненного слоя общей толщиной 3,6 мм, полученного по новой схемы цементации с четырьмя последовательными циклами насыщения и диффузии: а – общая толщина упрочненного слоя; б – микроструктура поверхностного слоя

Полученная при цементации толщина слоя достаточна постоянна даже в деталях сложной формы, что подтверждается после макротравления образца-свидетеля, вырезанного из зубчатого колеса (рис. 2).

Рис. 2. Толщина цементованного слоя у образца-свидетеля, вырезанного из зубчатого колеса

Полученные технологические результаты были опробованы в практических режимах цементации втулок звена гусениц в термическом цехе завода ЧАЗ. В качестве деталей-представителей использовали втулки из стали 12ХМ с требуемой толщиной упрочненного слоя 2,1–2,9 мм, а в печи Ц-105 проведена цементация по трем режимам (табл. 5) с различным составом печной атмосферы и соблюдением других условий заводской технологии.

Технологические условия цементации втулок звена по режиму 3 соответствовали параметрам, показанным в табл. 2, т. е. с использованием трехциклового схемы подачи газов в печь.

Таблица 5

Внешний вид и микроструктура слоя у деталей, цементованных по трем режимам

Режимы	Компоненты технологической атмосферы	Внешний вид деталей	Карбидная фаза	Толщина слоя, мм	
				заэвтектоидная и эвтектоидная	общая
Режим 1	природный газ	серый с налетом сажи	грубая и мелкая сетка	1,5–1,7	2,2–3,4
Режим 2	природный газ + эндогаз	серый чистый	мелкая сетка	1,1–1,3	1,9–2,1
Режим 3	природный газ + воздух	серый чистый	мелкая сетка	1,7–1,9	2,4–2,6

Режим цементации выполнялся с циклической подачей в печь природного газа и смеси газа с воздухом (до 20 об. %);

- длительность режима цементации 20 ч вместо 26 ч.

При этом углеродный потенциал атмосферы ступенчато изменялся с постепенным ростом от 1,5 до 3 %, а в конце процесса снижался до 1,75–2,0 %. Содержание СО в атмосфере возрастало в период подачи газовой смеси от 2–3 % до 8–10 % об.

Общие результаты внедрения технологии ускоренной цементации втулок из стали 15ХМ на толщину слоя 2,1–3,1 мм в печах Ц-105 характеризуются следующими показателями:

- сокращение общей длительности процесса цементации с 30–31 ч до 22–23 ч, то есть на 7–8 ч;

- значительное сокращение энергозатрат на обогрев печей;

- существенное снижение расхода природного газа на выполнение одного режима цемен-

тации с 27–28 нм³ до 18,5–19,5 нм³, то есть на 35 %;

- снижение сажеобразования на поверхности деталей и в муфельной печи, и, за счет этого, ликвидация дробеочистки втулок перед закалкой и снижение частоты очистки муфеля от сажи (с 3 до 5–6 садов) с сокращением простоев печей;

- улучшение структуры цементованного слоя по карбидной фазе и равномерности общей толщины слоя.

Проведена также отработка технологии цементации втулок звена гусениц из стали 20Г на толщину слоя 1,5–1,8 мм. Общая длительность выполнения такого режима составила 13–14 ч, а подробные условия его реализации показаны в табл. 6.

Результаты использования этой технологии обеспечивают преимущества, аналогичные показанным выше для нового режима цементации втулок на слой 2,1–2,9 мм и сокращение расхода природного газа на 20 % за один режим.

Таблица 6

Технологические режимы ускоренной цементации втулок в печи Ц-75

Цикл	Стадия	Длительность, ч	Температура цементации, °С	Подача газов, нм ³ /ч	
				природный газ	воздух
Цикл 1	насыщение	2,0	940–950	1,20–1,25	–
	диффузия	1,0		0,90–0,95	0,3
Цикл 2	насыщение	1,5 (2,0)		1,20–1,25	–
	диффузия	1,5 (2,0)		0,90–0,95	0,3
Цикл 2	насыщение	1,0		1,20–1,25	–
	диффузия	2,0		0,87–0,90	0,33–0,35

Новые технологические режимы цементации втулок на толщину слоя 2,1-2, 9 мм и 1,5 - 1,8 мм внедрены в производство на заводе ЧАЗ.

Вывод

1. Определены рациональные схемы (циклограммы) введения воздуха в атмосферу металла для цементации на различную толщины слоя.

2. Новая технология цементации в атмосфере газовой смеси пригодна для практического использования в производстве. Качество диффузионного слоя определяется условиями обработки: число и длительность циклов, расход природного газа и воздуха.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Козловский, И. С. Химико-термическая обработка шестерен / И. С. Козловский. – М. : Машиностроение, 1970. – 232 с.
2. Минкевич, А. Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов / А. Н. Минкевич. – М. : Машиностроение, 1965. – 491 с.
3. Тельдеков, В. А. Влияние технологических режимов химико-термической обработки на качество упрочнения высоконагруженных шестерен / В. А. Тельдеков, Л. М. Гуревич // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 6 (241) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – С. 75–82.
4. Тельдеков, В. А. Исследование технологии цементации стали без применения эндотермических атмосфер / В. А. Тельдеков, Л. М. Гуревич // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 10 (245) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – С. 77–82.