В. А. Тельдеков¹, Л. М. Гуревич²

**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
НА КАЧЕСТВО УПРОЧНЕНИЯ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ШЕСТЕРЕН**

¹ ОАО «ВНИИТМАШ», Волгоград

² Волгоградский государственный технический университет

e-mail: mv@vstu.ru

Проведено исследование изменения микроструктуры, толщины и твердости диффузионных покрытий, получаемых при варьировании углеродного потенциала и расхода технологических газов на разных стадиях цементации и нитроцементации. Установлена возможность сокращения энергозатрат и длительности ХТО с обеспечением требуемой эффективной толщины закаленного слоя.

Ключевые слова: сталь, диффузия, цементация, нитроцементация, углеродный потенциал, аммиак, твердость, микроструктура, микротвердость, эффективная толщина.

V. A. Teldekov¹, L. M. Gurevich²

**INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL MODES OF THERMOCHEMICAL TREATMENT
ON THE QUALITY OF STRENGTHENING OF HIGHLY LOADED GEARS**

¹ OAO «VNIITMASH», Volgograd

² Volgograd State Technical University

The study of changes in the microstructure, thickness and hardness of diffusion coatings obtained by varying the carbon potential and the consumption of process gases at different stages of cementation and nitrocarburizing was carried out. The possibility of reducing energy consumption and the duration of thermochemical treatment with the provision of the required effective thickness of the hardened layer is established.

Keywords: steel, diffusion, cementation, nitrocarburizing, carbon potential, ammonia, hardness, microstructure, microhardness, effective thickness.

Химико-термическая обработка (ХТО) широко используется при изготовлении многих деталей машин, в том числе шестерен главной передачи тракторов и автомобилей, для обеспечения нагрузочной способности зубчатой передачи, контактной прочности активных поверхностей зубьев и прочности зубьев при изгибе [1]. Согласно ТУ чертежей, они изготавливаются из легированных сталей типа 20ХН3А, 20ХН2М и подвергаются цементации на толщину слоя 1,2–1,5 мм с последующей закалкой на твердость 59–64 HRC. Повышенная температура нагрева деталей в процессе насыщения поверхности углеродом (920–930 °С) и длительность обработки часто приводят к снижению качества структуры (увеличение размера иглы мартенсита, доли остаточного аустенита) и твердости закаленного деталей.

Наиболее прогрессивным видом насыщающих атмосфер для цементации являются смеси эндотермического газа с добавками газа-карбюризатора (метана). При этом, после нагрева садки деталей в печи поддерживается постоянная температура (920–930 °С) вплоть до окончания периода насыщения и диффузии. Подача в печь газа-карбюризатора также постоянна в течение этой части процесса.

Анализ литературных [2] и других экспериментальных результатов показал, что уровень и глубина насыщения стали углеродом определяются такими параметрами, как углеродный потенциал печной атмосферы, температура и длительность процесса. Установлена также целесообразность максимально четкого разделения технологических условий (температура, время и расход применяемых газов) по стадиям процесса обработки: нагрев, насыщение, диффузия и подстуживание перед закалкой.

Альтернативным вариантом для традиционной цементации является технология нитроцементации шестерен [3], преимуществом которой является процесс насыщения стали углеродом и азотом на достаточную толщину слоя при пониженных температурах (850–870 °С) без увеличения длительности процесса. Это объясняется повышением величины коэффициента диффузии углерода (до двух раз) в присутствии атомов азота [4].

Контроль качества химико-термической обработки шестерен выполняется путем оценки микроструктуры закаленного слоя и его твер-

дости. Согласно РТМ и основным рекомендациям [5] контролируется карбидная фаза, остаточный аустенит, дисперсность мартенсита и наличие феррита в микроструктуре сердцевинных зубьев. При эксплуатации шестерен в условиях высоких контактных напряжений необходимо обеспечивать качественную микроструктуру закаленного слоя с достаточной величиной эффективной толщины до микротвердости 6500–7000 МПа.

Исследование и отработка технологических параметров новых схем химико-термической обработки выполнялись с применением шахтной печи СШЦМ-6.6/9 и эндогенератора ЭН-16. Каждая садка печи составлялась из необходимого количества балласта или непосредственно деталей из сталей 25ХГТ, 27ХГР, 20ХН3А и 20ХН2М с приложением образцов-свидетелей.

Состав используемого эндотермического газа и печной атмосферы определяли химическим анализом на приборе ГХА-1. Контроль расхода технологических газов (эндогаза, аммиака и природного газа) выполнялся с применением ротаметров. Для контроля углеродного потенциала π_c печной атмосферы проводился химический анализ фольги из стали 08кп после выдержки в печи в течение 1 ч. Для определения содержания углерода и азота по толщине слоя применялся химический анализ стружки от цилиндрических образцов $\varnothing 25 \times 100$ мм.

Твердость поверхности образцов и деталей по методу Роквелла измеряли на приборе ТР по ГОСТ 9013–59, а распределение микротвердости по толщине слоя – на приборе ПМТ-3 по ГОСТ 9450–76. Металлографический анализ структуры закаленных и отожженных шлифов выполняли на оптических микроскопах ММР-2 и Neophot-2 при увеличениях $\times 100$ - $\times 400$.

Технологические условия первой серии химико-термической обработки даны в табл. 1.

Режим 1 соответствует действующей технологии многих предприятий с постоянными температурой нагрева и расходом газа-карбюризатора (5 %) в периодах насыщения и диффузии.

Режим 2 соответствует рекомендациям [2] и отличается ступенчатым изменением подачи газа-карбюризатора в печь: снижение от 7 до 4 % в периоде диффузии и до 1 % в периоде подстуживания перед закалкой.

Таблица 1

Технологические условия первой серии ХТО

Технологические параметры цементации	Показатели параметров по периодам процесса			
	Нагрев	насыщения	диффузия	подстуживание
Режим 1				
Температура, °C	850-900	900-910	900-910	840-850
Длительность, ч	3,0	2,5	2,5	3,0
Расход эндогаза, л/ч природного газа, л/ч (%)	820 –	780 40,0 (5%)	780 40,0 (5%)	810–812 8,0 (1%)
Режим 2				
Температура, °C	850–900	900–910	900–910	840–850
Длительность, ч	3,0	2,5	2,5	3,0
Расход эндогаза, л/ч природного газа, л/ч (%)	820 –	765 55,0 (7%)	790 32,0 (4%)	810–812 8,0 (1%)
Режим 3				
Температура, °C	850–900	900–910	900–910	840–850
Длительность, ч	3,0	2,5	2,5	3,0
Расход эндогаза, л/ч природного газа, л/ч (%) аммиака, л/ч (%)	820 – –	770 40,0 (5%) 8,0–10,0 (1%)	700 40,0 (5%) 8,0–10,0 (1%)	800 8,0–10,0 (1%) 8,0–10,0 (1%)
Режим 4				
Температура, °C	830–860	860–870	910–920	840–850
Длительность, ч	3,0	2,5	2,5	3,0
Расход эндогаза, л/ч природного газа, л/ч (%)	820 –	780 40,0 (5%)	800 20,0 (2,5%)	810 8,0–10,0 (1%)

Режим 3 отличается от типичного заводского режима 1 дополнительной подачей аммиака (1,0–1,5 %) после окончания периода нагрева деталей (рекомендации [3]), а режим 4 – снижением температуры цементационной печи в период насыщения до 860–870 °C и расхода метана (2,5 %) в периоде диффузии.

Рис. 1. Зависимость углеродного потенциала технологической атмосферы при 23 % CO от содержания CO₂: 1 – 815 °C; 2 – 845 °C; 3 – 870 °C; 4 – 900 °C; 5 – 930 °C; 6 – 955 °C

Режим 4 использовали для экспериментальной оценки эффективности взаимосвязи величины углеродного потенциала π_c и содержания CO₂ в эндогазовой атмосфере печи по данным фирмы «Айхелин» ФРГ (рис. 1).

Полученные результаты ХТО показывают, что уровень углеродного потенциала печной атмосферы в периодах насыщения и подстуживания изменяются в зависимости от условий выполнения каждого режима (табл. 2), а его максимальная величина получена при обработке по режиму 4.

Таблица 2

Изменение углеродного потенциала в периодах насыщения и подстуживания при опробованных режимах

Режим	Углеродный потенциал π_c , %, в период	
	насыщения	подстуживания
Режим 1	1,28	0,95
Режим 2	1,25	0,93
Режим 3	1,20	0,90
Режим 4	1,30	0,96

Поверхностная твердость закаленных образцов-свидетелей из сталей 25ХГТ и 27ХГР после выполненных режимов ХТО имела величину в пределах 62–65 HRC. При этом профили

распределения твердости по глубине слоя имеют заметные различия, а наибольшая глубина упрочнения получена на образцах, подвергнутых ХТО по режимам 3 и 4 (рис. 2).

Рис. 2. Распределение микротвердости по глубине слоев, подвергнутых ХТО по различным режимам, после закалки и низкого отпуска:
1–4 – режимы 1–4 соответственно

Микроструктура образца из стали 27ХГР после цементации и отжига показана на рис. 3.

Рис. 3. Микроструктура образца из стали 27ХГР после цементации и отжига (поверхность слева) $\times 100 \times 0,5$

Успешный опыт по управлению результатами цементации за счет изменения температуры на разных стадиях и дополнительной подачи аммиака показал целесообразность оценки влияния аналогичных изменений в стандартном режиме нитроцементации сталей 27ХГР и 20ХН2М в шахтной печи СШЦМ. Характеристика новых экспериментальных режимов показана в табл. 3. Технологические отличия новых режимов 6 и 7 от исходного заводского режима 5 состоят не только в изменении температуры нагрева, но и сокращение длительности

процесса нитроцементации (10 ч вместо 12 ч). Одновременно была изменена схема и объем подачи аммиака в печь.

Результаты измерений величины углеродного потенциала печной атмосферы по ходу выполнения режимов нитроцементации показаны в табл. 3. Как видно, уровень углеродного потенциала в конце стадии насыщения режима 7 заметно выше, чем у режима 6, что подтверждает влияние температуры нагрева (900 °С в режиме 6 и 860 °С в режиме 7), при снижении которой p_C эндогазовой атмосферы повышается.

Контроль поверхностной твердости образцов-свидетелей при всех режимах ХТО показал высокий уровень (61–64 HRC), соответствующий требованиям ТУ для таких деталей. Замеры толщин закаленного слоя на поперечных шлифах двух марок сталей 20ХН2М и 27ХГР (табл. 4) свидетельствуют о возможности обеспечения высокого качества упрочнения деталей даже при сокращении длительности ХТО. Измерение толщины проводилось по распределению микротвердости до значений 7000 и 5000 МПа, а также до твердости сердцевины.

Таблица 3

Экспериментальные режимы вариантов нитроцементации сталей 27ХГР и 20ХН2М

Технологические параметры нитроцементации	Показатели параметров по периодам процесса			
	нагрев	насыщения	диффузия	подстуживание
Режим 5				
Температура, °С	800–850	860–870	860–870	840–850
Длительность, ч	3,0	3,0	3,0	3,0
Расход эндогаза, л/ч	820–825	765	765	790
природного газа, л/ч (%)	–	45,0 (5,5%)	45,0 (5,5%)	15,0 (2%)
аммиака, л/ч (%)	–	15,0 (2%)	15,0 (2%)	15,0 (2%)
Углеродный потенциал π_C , %	–	1,3	0,9	–
Режим 6				
Температура, °С	800–850	900–910	860–870	840–850
Длительность, ч	2,5	2,5	2,5	2,5
Расход эндогаза, л/ч	820–825	780	790	770
природного газа, л/ч (%)	–	40,0 (5%)	15,0 (2%)	15,0 (2%)
аммиака, л/ч (%)	–	–	15,0 (2%)	40,0 (5%)
Углеродный потенциал π_C , %	–	1,0	0,8	–
Режим 7				
Температура, °С	800–850	860–870	900–910	840–850
Длительность, ч	2,5	2,5	2,5	2,5
Расход эндогаза, л/ч	820–825	780	790	770
природного газа, л/ч (%)	–	40,0 (5%)	5,0 (2%)	15,0 (2%)
аммиака, л/ч (%)	–	–	15,0 (2%)	40,0 (5%)
Углеродный потенциал π_C , %	–	1,37	1,0	–

Таблица 4

Толщина закаленного слоя после нитроцементации по различным режимам

Номер режима	Марка стали	Толщина слоя, мм		
		до 7000 МПа	до 5000 МПа	до твердости сердцевины
5	20ХН2М	0,9	1,35	1,40
	27ХГР	0,9	1,40	1,50
6	20ХН2М	0,76	1,20	1,25
	27ХГР	0,80	1,20	1,30
7	20ХН2М	0,80	1,25	1,35
	27ХГР	0,84	1,30	1,40

Экспериментально опробована также схема двойного изменения температуры нагрева при обработке в шахтной печи. Как видно из табл. 5, углеродный потенциал атмосферы снижается при повышении температуры нагрева, а во втором цикле обработки π_C повышается на обеих стадиях даже при существенном сокращении

подачи метана в печь. Установлен факт повышения π_C при увеличении длительности периода насыщения и снижения его величины при увеличении длительности периода диффузии. Эти результаты могут быть пригодны для практического выполнения режимов цементации, особенно на большую толщину слоя.

Таблица 5

Схема цементации с двойным изменением температуры нагрева

Технологические параметры цементации	Показатели параметров по периодам процесса			
	насыщения	диффузия	насыщения	диффузия
Режим 5				
Температура, °C	860–870	920–930	860–870	920–930
Длительность, ч	2,0	2,0	2,0	2,0
Расход эндогаза, л/ч	780–800	780–800	780–800	780–800
природного газа, л/ч (%)	–	45,0 (5,5%)	45,0 (5,5%)	15,0 (2%)
аммиака, л/ч (%)	–	15,0 (2%)	15,0 (2%)	15,0 (2%)
Углеродный потенциал π_C , %	1,4	0,75	1,45	0,9

Экспериментальная отработка новых режимов цементации (табл. 6) выполнялась в производственных условиях термического цеха Ульяновского автомобильного завода на действующем оборудовании в безмуфельных агрегатах

«Бирлек» с использованием серийных цементуемых деталей автомобиля: ось сателлита из стали 18ХГТ, кулаки шарнира из стали 27ХГР, шестерня ведущая из стали 20ХН2М, шестерня ведомая из стали 23ХН2М.

Таблица 6

**Параметры разработанной технологии химико-термической обработки деталей
в безмуфельном агрегате № 6**

Параметры цементации	Показатели параметров по зонам печи			
	нагрев	насыщение	диффузия	подстуживание
Температура, °C	850–860	870–880	900–910	840–850
Расход эндогаза, м³/ч	–	Общий расход 42,0–43,0		
природного газа, м³/ч	–			
Темп толкания, мин	19	19	19	19
Содержание CO ₂ , %	–	0,18–0,20	0,17–0,19	0,26–0,28
Расчетный углеродный потенциал π_C , %	–	≥1,2	0,80–0,85	0,80–0,85

Многократные измерения концентрации CO₂ по зонам насыщения, диффузии, и подстуживания печи цементации дают возможность проследить за изменением величины углеродного потенциала в печной атмосфере (табл. 6). Видно, что принятые технологические параметры цементации детали обеспечивают повышенную величину π_C в зоне насыщения и необ-

ходимый уровень в зоне подстуживания.

Оценка структуры и свойств деталей после ХТО показала их соответствие требованиям чертежа: твердость 64–65 HRC, толщина слоя в пределах 1,2–1,3 мм (табл. 7) при сокращенном периоде толкания поддонов (19 минут вместо 24 минут).

Таблица 7

Толщины упрочненного слоя деталей при различных режимах цементации

Режим цементации	Толщина слоя, мм			
	По замеру микротвердости в закаленном образце (рис. 5)		По структуре отожженного образца	
	до 7000 МПа	до 5000 МПа	эвтектоидная	общая
«Бирлек» № 3, действующий	0,65	1,25	0,7	1,2
«Бирлек» № 2, новый	0,6–0,75	1,3–1,4	0,75	1,3
«Бирлек» № 6, новый	0,65	1,4	0,75	1,35

Вместе с тем в структуре закаленного слоя зубьев ведущей шестерни из стали 20ХН2М образовался крупноигльчатый мартенсит 7–8 баллов, что может быть следствием низкого содержания специальных карбидообразующих элементов в стали ($Mo \leq 0,2 \%$) и отсутствия фазовой перекристаллизации после высокотемпературного нагрева в зоне диффузии (до 910°C). В связи с этим такой режим цементации следует признать непригодным, и дальнейшую отработку технологии ХТО шестерен главной передачи автомобилей УАЗ проводили по типу режима 6 (табл. 3) с повышением температуры на стадии насыщения.

ХТО деталей опытной партии выполнялась на агрегате № 2 «Бирлек» (табл. 8). При проведении режима ХТО контролировались основные параметры процесса: температура, расход технологических газов по зонам печи, темп

толкания поддонов, а также главные показатели качества упрочнения: поверхностная твердость, микроструктура и общая толщина слоя. По условиям испытаний ведущих и ведомых шестерен, согласованным с ГСКБ завода, общая толщина диффузионного слоя должна быть в пределах 1,0–1,1 мм.

Оценка качества упрочнения деталей опытных партий проводилась по твердости поверхности, микроструктуре, толщине слоя и распределению твердости от поверхности вглубь. Установлено что твердость ведомых и ведущих шестерен после закалки и отпуска составляла 59–60 HRC.

Микроструктура упрочненного слоя зубьев не имела каких-либо недопустимых дефектов: среднеигльчатый мартенсит, остаточный аустенит 4 балла, что несколько больше, чем при действующей технологии цементации.

Таблица 8

Химико-термическая обработка деталей в безмуфельном агрегате № 2

Параметры цементации	Показатели параметров по зонам печи			
	Зона 1	Зона 2	Зона 3	Зона 4
Температура, $^\circ\text{C}$	880–890	900–920	870–880	830–840
Расход				
эндогаза, дел	10–11	10–11	10–11	10–11
природного газа, дел	–	4,0–3,5	2,0–2,5	0–1
аммиака, дел	–	0	1,0–1,5	1,5–2,0
Темп толкания поддонов, мин	18	18	18	18

Измерение общей толщины диффузионного слоя зубьев шестерен опытной партии проводилось до структуры сердцевины на микрошлифах после отжига. При этом толщина слоя для ведущих шестерен на $\frac{1}{2}$ высоты зуба равнялась 1,0–1,05 мм, а для ведомых шестерен – 1,03–1,08 мм. Полученные показатели качества ХТО отвечают требованиям чертежа и условиям испытания.

Результаты оценки уровня насыщения диффузионного слоя углеродом и азотом показаны на рис. 4. Новая технология ХТО обеспечивает достаточно высокий уровень насыщения диффузионного слоя углеродом, близким к цементованному. Одновременно происходило дополнительное насыщение слоя азотом, что повышает прокаливаемость стали и пластичность закаленного слоя. В тоже время полученные значения поверхностной концентрации элементов ($C = 0,86 \%$ и $N = 0,14 \%$) являются для ста-

лей типа 20ХН2М близкими к предельно допустимым. Более высокая поверхностная концентрация этих элементов в слое может привести к образованию повышенного содержания остаточного аустенита и снижению твердости закаленных деталей.

Результаты измерения микротвердости по толщине слоя на $\frac{1}{2}$ высоты эвольвентной части зубьев опытных шестерен после закалки и низкого отпуска свидетельствуют о достаточно высоком уровне прочности этих деталей (рис. 5). Общий характер изменения микротвердости по толщине слоя отвечает требованиям действующих НТД на упрочнение ответственных тяжело нагруженных деталей машин. Микротвердость вблизи поверхности этих деталей несколько ниже, чем в более глубоких зонах упрочненного слоя, что связано с наличием остаточного аустенита. Эффективная толщина слоя до микротвердости 7000 МПа составляет 0,6–0,7 мм.

Рис. 4. Концентрация элементов по толщине слоя шестерен:
1 – углерод; 2 – азот

Рис. 5. Распределение микротвердости по толщине упрочненного слоя зубьев ведущих (1) и ведомых (2) шестерен опытной партии после закалки и низкого отпуска

Результаты стендовых испытаний ведущих мостов с ведущими и ведомыми шестернями показали высокую эффективность новой технологии ХТО: прочность деталей при статическом нагружении увеличилась на 25–27 %; в условиях динамического нагружения наработка 2 мостов достигла 300 моточасов без разрушения, что выше принятой в ГСКБ завода для действующей технологии упрочнения (250 моточасов). Использование новой технологии разрешено дополнением в ТУ чертежей взамен цементации на слой 1,2–1,5 мм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 21354–87. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность.
2. Козловский, И. С. Химико-термическая обработка шестерен / И. С. Козловский. – М. : Машиностроение, 1970. – 232 с.
3. Шубин, Р. П. Нитроцементация деталей машин / Р. П. Шубин, М. Л. Гринберг. – М. : Машиностроение, 1975. – 207 с.
4. Прженосил, Б. Нитроцементация / Б. Прженосил. – Л. : Машиностроение, 1969. – 212 с.
5. Контроль качества термической обработки стальных полуфабрикатов и деталей : справочник / под ред. В. Д. Кальнера. – М. : Машиностроение. – 1984. – 384 с.