

УДК 621.785.532

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЦЕМЕНТУЕМЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

© Ольга Александровна Цинколенко, Богдан Станиславович Золотов, Евгений Александрович Головачев, Кирилл Иванович Шебешев

Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия
vladisl-2013@yandex.ru

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы повышения эксплуатационных характеристик тяжело нагруженных зубчатых колес, изготовленных из высокопрочных сталей. Приведены сведения о режимах вакуумной цементации. Разработан технологический процесс, обеспечивающий наличие карбидов на профилях зубьев, отсутствие карбидной сетки в цементованном слое и оптимальные механические свойства зубчатых колес. Предложены рекомендации по выбору режимов диффузионного насыщения зубчатых колес из теплостойких сталей для обеспечения износостойкости, контактной выносливости, изгибной прочности.

Ключевые слова: цементация, диффузионное насыщение, зубчатые колеса, технология, износостойкость, контактная выносливость.

IMPROVING THE OPERATING PROPERTIES OF CARBURIZED GEAR WHEELS

© O. Tsinkolenko, B. Zolotov, Ye. Golovachev, K. Shebeshev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
vladisl-2013@yandex.ru

Abstract. The paper describes the issues of improving the operating characteristic of heavily loaded gears made of high-strength steels. Information on the modes of vacuum cementation is given. A technological process has been developed that ensures the presence of carbides on the tooth profiles, the absence of a carbide mesh in the cemented layer and the optimal mechanical properties of the gears. Recommendations on the choice of modes of diffusion saturation to ensure wear resistance, contact endurance, bending strength of gears made of heat-resistant steels are proposed.

Keywords: carburization, diffusion saturation, gear wheels, technology, wear resistance, contact fatigue.

Введение. Большинство зубчатых колес газотурбинных двигателей работает в условиях высоких контактных напряжений, скоростей скольжения, температурных воздействий [1, 2]. Эти факторы, обуславливают высокие требования к качеству упрочнения зубчатых колес.

Реализация таких требований диктует необходимость применения цементуемых теплостойких комплексно-легированных сталей 20X3MBФ-Ш, 16X3HBFMB-Ш, 16X2H3MФБАЮ-Ш [1, 3]. Особенность химического состава теплостойких сталей – наличие активных карбидообразующих элементов (Cr, Mo, W, V, Nb). Следствие этой особенности – формирование в приповерхностной части цементованного слоя частиц карбидной фазы – легированного цементита $Fe(Cr, Mn)_3C$ и специальных карбидов: Me_7C_3 , $Me_{23}C_6$, VC и NbC. Образование высокоуглеродистой карбидной фазы сопровождается снижением концентрации углерода в мартенсите (структурной основе слоя) и как следствие его твердости до 700...740 HV (58...59 HRC), что ниже требуемых (60...63 HRC) значений. Поэтому структура поверхности с определенной долей карбидной фазы является оптимальной, способной обеспечивать требуемую высокую твердость и работоспособность зубчатых колес [1].

Для образования карбидной фазы необходима высокая насыщающая способность технологической атмосферы. Такой способностью обладает газовая среда из ацетилена, применяемая при вакуумной цементации. Цементация в ацетилене низкого давления – новый процесс, получивший широкое применение за рубежом. Авторы работ [4, 5] назвали вакуумную цементацию в ацетилене последним достижением в области развития технологии науглероживания. Для ее реализации зарубежные фирмы производят вакуумные автоматизированные установки, обеспечивающие диффузионное насыщение углеродом и последующую малодеформационную «сухую» закалку в потоке азота [6].

Такие установки, имеющие высокую стоимость, в нашей стране не производят. Покупать импортное оборудование приходится без технологии упрочнения; за рубежом не применяют отечественные теплостойкие стали.

Цель работы – разработка технологии вакуумной цементации теплостойких сталей с учетом требований, предъявляемых к структуре цементованного слоя для обеспечения эксплуатационных свойств зубчатых колес.

Материалы и оборудование эксперимента. При поиске оптимальных технологических решений вакуумную цементацию проводили на опытно-промышленной установке, оснащенной управляющим компьютером и системами автоматического регулирования технологических параметров [7-9]. Ацетилен подавали циклически в виде чередования активных стадий, когда в рабочую камеру подавали цементационный газ, и пассивных (диффузионных) стадий при выключенной подаче газовой среды.

Предметом исследования были образцы $\varnothing 50 \times 20$ мм из стали 16X3HBFMB-Ш. Науглероженные образцы использовали для исследований структуры цементованного слоя, распределения в нем концентрации углерода и твердости. Металлографические исследования выполняли для двух состояний: 1 - после диффузионного насыщения и высокого отпуска при температуре 650 °С, 5 ч; 2 - после полного цикла упрочняющей термической обработки по режимам, принятым для исследуемой стали.

Результат науглероживания оценивали по концентрационным кривым, полученным послойным анализом, выполненным спектральным методом. Насыщенность слоя углеродом оценивали эффективной толщиной ($h_{эф}$, как наиболее насыщенную ($C \geq 0,4$ %) часть слоя), концентрацией углерода на поверхности ($C_{пов}$) и на расстоянии 0,2 мм от поверхности ($C_{0,2}$) после удаления припуска в 0,2 мм шлифованием. Эффективную толщину слоя в соответствии с ОСТ 1.41.467-73 определяли металлографически по структуре после диффузионного насыщения и высокого отпуска, как расстояние от поверхности образца до половины переходной зоны.

Обсуждение экспериментов. Для разработки технологии вакуумной цементации важно понимание механизма формирования цементованного слоя. Как показано в проведенных ранее работах [7, 10], цементованный слой формируется в результате интенсивного каталитического разложения молекул ацетилена на поверхности металла. Реализуется интенсивный перенос углерода из газовой среды на насыщаемую поверхность. В течение активной стадии цикла поверхность теплостойкой стали покрывается почти сплошным слоем карбидов. По данным металлографического и микрорентгеноспектрального анализов такой слой образуют тонкие плоские карбиды легированного цементита [7, 11]. На пассивной (диффузионной) стадии цикла значительная часть этих карбидов растворяется, поставляя атомы углерода в твердый раствор. От цикла к циклу эти процессы повторяются.

Таким образом, цементованный слой формируется под слоем карбидной фазы в кинетическом режиме, интенсивность которого определяется скоростью растворения карбидов поверхностного слоя. Скорость поступления углерода в твердый раствор оказывается высокой, достаточной для пересыщения твердого раствора, образования в нем карбидной зоны. Ее толщина превышает 50 мкм уже после 3-х минут насыщения. Играя роль посредника в передаче углерода из газовой среды в твердый раствор, поверхностный слой из карбидной фазы выполняет еще несколько важных функций: поддерживает высокий и постоянный углеродный потенциал газовой среды и устанавливает режим саморегулирования. Поверхность карбидов не обладает каталитической активностью, поэтому не вызывает диссоциацию молекул ацетилена. Углерод перестает поступать к той части насыщаемой поверхности, которая закрыта карбидами. Создаются условия высокой повторяемости результатов обработки.

Вакуумная цементация - многофакторный процесс. Для ее проведения технологические факторы целесообразно разделить на две группы: 1) условно постоянные факторы - температура процесса, расход ацетилена, давление, поддерживаемые в процессе насыщения на постоянном уровне; 2) управляющие факторы - время диффузионного насыщения и режим циклической подачи ацетилена.

Влияние постоянных факторов. Температура - важный технологический фактор, определяющий скорость диффузионного насыщения. Диапазон выбора температуры достаточно широк: от 880 до 980 °С. При повышении температуры существенно сокращается продолжительность процесса, но изменяется строение карбидной зоны: укрупняются частицы карбидов, уменьшается их число на единице площади, снижается доля карбидной фазы. Для вакуумной цементации теплостойких сталей целесообразна температура 940 °С, которая обеспечивает наряду с высокой скоростью диффузионного насыщения мелкие частицы карбидов.

Расход ацетилена должен быть достаточным для обеспечения заданной насыщенности цементованного слоя. Его определяют приблизительно на основе несложного расчета [11].

Давление в принятом на практике интервале значений 4...15 ГПа практически не оказывает влияния на характеристики слоя [11].

Расход ацетилена, как и величина давления, являются контролируемыми факторами. При проведении экспериментов их значения составляли: расход ацетилена $6 \cdot 10^{-3}$ м³/ч; - давление 8 ГПа (6 мм. рт. ст.).

Влияние управляющих факторов. Факторы управления, к которым относят: а) общее время насыщения τ ; б) временной режим подачи ацетилена, который характеризует большая группа параметров (структура цикла в виде комбинаций времен стадий τ_a и τ_n ; суммарное время активных стадий циклов $\Sigma\tau_a$, суммарное время диффузионных стадий циклов $\Sigma\tau_n$ и их отношение $\Sigma\tau_a: \Sigma\tau_n$, общее число циклов n за время насыщения τ).

Влияние общего времени цементации. Время диффузионной выдержки определяет эффективную толщину диффузионного слоя и протяженность карбидной зоны. Кинетика роста диффузионного слоя подчиняется параболической зависимости: $h_{эф} = k \cdot \sqrt{\tau}$, где k - кинетический коэффициент. В соответствии с экспериментально установленным значением $k = 0,46$ рассчитано общее время диффузионного насыщения для групп зубчатых колес, применяемых в авиационных двигателях, как $\tau = (h_{эф}/k)^2$, табл. 1.

Таблица 1

Расчетное время цементации при $t = 940$ °С для основных групп зубчатых колес

№ группы	Эффективная толщина слоя, мм		Время цементации, ч
	до шлифования	после шлифования	
1	0,7...0,9	0,5...0,7	2,4
2	0,9...1,1	0,7...0,9	5,1
3	1,1...1,3	0,9...1,1	6,8
4	1,3...1,5	1,1...1,3	9,3

Сочетание временных параметров циклирования определяет множество вариантов обработки. При диффузионном насыщении использовали две схемы циклического режима подачи ацетилена: 1) простую или периодическую $n \cdot (\tau_a/\tau_{п})$, например, $20 \cdot (5/10)$; 2) сложную или аperiodическую $n_1 \cdot (\tau_{a1}/\tau_{п1}) + n_2 \cdot (\tau_{a2}/\tau_{п2})$, например, $8 \cdot (13/17) + 2 \cdot (9/21)$.

Результаты науглероживания при простой схеме циклического режима. Влияние суммарного времени активных стадий насыщения $\Sigma\tau_a$. От суммарного времени стадий насыщения $\Sigma\tau_a$ и, как следствие, от отношения продолжительности стадий зависит поступление углерода в поверхностный слой, запас в нем углерода, который на пассивных стадиях перераспределяется диффузионным путем. Поэтому этот временной фактор служит важным инструментом управления насыщенностью слоя, толщиной и строением карбидной зоны. Ниже в качестве примера представлены результаты металлографических исследований, выполненные при общем времени насыщения $\tau = 300$ мин, неизменном времени активной стадии цикла $\tau_a = 2$ мин и различном времени пассивной стадии $\tau_{п} = 20, 10, 6, 4, \text{ и } 2$ мин, что соответствует отношению продолжительности стадий циклов $\Sigma\tau_a : \Sigma\tau_{п} = 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1,0$ (табл. 2).

Таблица 2

Влияние времени стадий насыщения $\Sigma\tau_a$ и отношения продолжительности стадий $\Sigma\tau_a : \Sigma\tau_{п}$ на характеристики цементованного слоя

Время стадий насыщения $\Sigma\tau_a$, мин	Отношение стадий, $\Sigma\tau_a : \Sigma\tau_{п}$	Число циклов, n	Эффективная толщина слоя, $h_{эф}$, мм	Толщина активной карбидной зоны, $h_{ак}$, мм
28	0,1 (1:10)	14	1,05	0,10
50	0,2 (1:5)	25	1,05	0,14
75	0,3 (1:3)	38	1,10	0,20
100	0,5 (1:2)	50	1,10	0,29
150	1,0 (1:1)	75	1,15	0,35

Из таблицы следует, что эффективная толщина слоя практически не зависит от параметра $\Sigma\tau_a$. Толщина карбидной зоны растет пропорционально увеличению времени активных

стадий $\Sigma\tau_a$ и отношению времен стадий $\Sigma\tau_a : \Sigma\tau_n$ от 0,1 до 1,0. Различие в микроструктуре цементованного слоя видно на рис. 1.

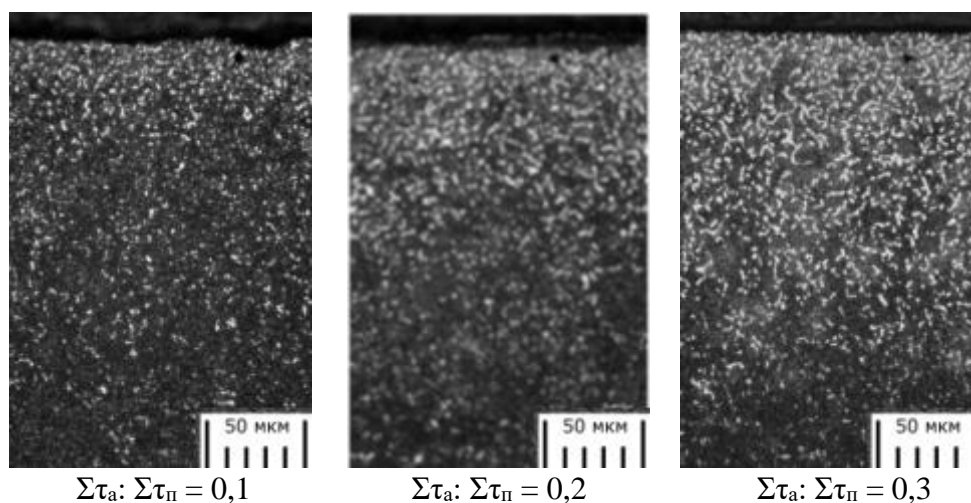


Рис. 1. Микроструктура приповерхностного слоя образцов, насыщенных при различном отношении продолжительности стадий цикла (указано под рисунком)

Результаты проведенного количественного анализа частиц карбидной зоны подтверждают, что при увеличении отношения времен стадий циклов $\Sigma\tau_a : \Sigma\tau_n$ от 0,1 до 0,3 заметно увеличивается объемная доля карбидной фазы (рис. 2). В соответствии с распределением карбидной фазы изменяется распределение концентрации углерода по толщине приповерхностной зоны цементованного слоя (рис. 3). Увеличивается концентрация углерода на поверхности и несколько менее интенсивно на расстоянии 0,2 мм от поверхности (рис. 4).

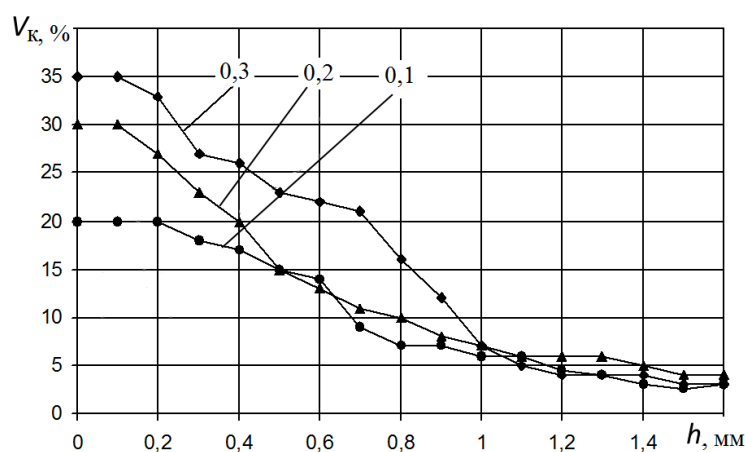


Рис. 2. Распределение объемной доли V_k частиц карбидной фазы по толщине h диффузионного слоя при различном отношении продолжительности стадий циклов $\Sigma\tau_a : \Sigma\tau_n$ (указано на кривых)

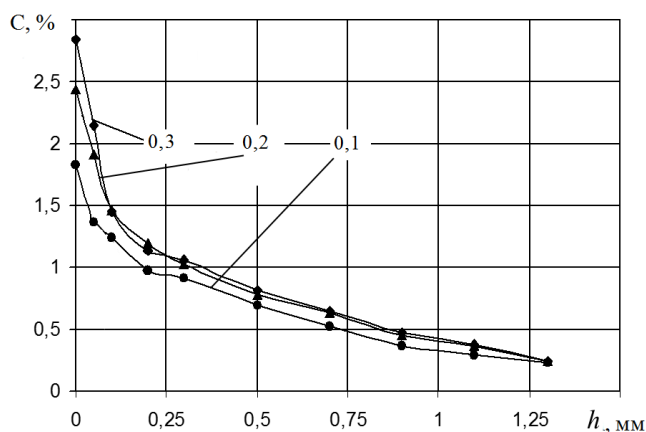


Рис. 3. Распределение концентрации углерода C по толщине h диффузионного слоя при различном отношении продолжительности стадий циклов $\Sigma\tau_a:\Sigma\tau_n$ (указано на кривых)

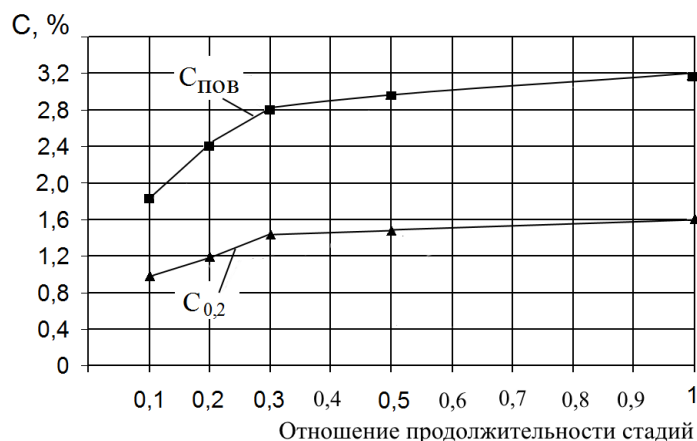


Рис. 4. Изменение концентрации углерода $C_{пов}$ и $C_{0,2}$ в зависимости от отношения продолжительности стадий циклов $\Sigma\tau_a:\Sigma\tau_n$

Влияние числа циклов. При неизменном общем времени процесса τ увеличить число циклов n можно только за счет уменьшения времени цикла: $\tau_a + \tau_n$. К такому результату приводит уменьшение времени: пассивной τ_n стадии; активной τ_a стадии; времени каждой стадии τ_a и τ_n . Влияние числа циклов за счет уменьшения времени пассивной стадии равносильно увеличению времени активных стадий $\Sigma\tau_a$ и отношению продолжительности стадий $\Sigma\tau_a : \Sigma\tau_n$. Влияние этих параметров рассмотрено выше и отражено в табл. 2. Из нее следует, что сокращение времени пассивных стадий τ_n от 20 до 2 мин при постоянном общем времени насыщения в 300 мин сопровождается увеличением числа циклов от 14 до 75 и заметным ростом толщины карбидной зоны. Ее рост свидетельствует о доминирующей роли поверхностного слоя карбидов в передаче углерода из газовой среды к насыщаемой поверхности. Насыщенность слоя углеродом возрастает в связи с тем, что снижается доля поверхности, не закрытая карбидами.

Аналогичный результат получен в серии опытов, в которых увеличение числа циклов достигали за счет сокращения времени как активной τ_a , так и диффузионной τ_n стадии (рис. 5). Время насыщения составляло 308 мин. Особенность этой серии опытов состояла в том, что (во всех опытах, кроме опыта при $n = 1$) выдерживали постоянным суммарное время

активных и пассивных стадий, которое составляло соответственно $\Sigma\tau_a = 66$ мин; $\Sigma\tau_{\text{п}} = 242$ мин. При числе циклов $n = 1$ параметры τ_a и $\tau_{\text{п}}$ должны быть равными. Такое условие отвечает выполнению двухстадийного режима, при котором $\tau_a = \tau_{\text{п}} = 154$ мин. Такое сочетание стадий обеспечило слабую насыщенность слоя. Карбидная зона отсутствовала. При $n = 6$ и схеме циклов $[6 \cdot (11/40,3)]$ объемная доля карбидной фазы составляла 8 %, а концентрация углерода у поверхности 1,1 %. При $n = 13$: $[13 \cdot (5/18,7)]$ объемная доля карбидной фазы возрасла до 15 %, а концентрация углерода почти до 1,5 %. При $n = 33$: $[33 \cdot (2/7,3)]$ и $n = 66$: $[66 \cdot (1/3,6)]$ достигалась наиболее высокая насыщенность диффузионного слоя (рис. 5, а).

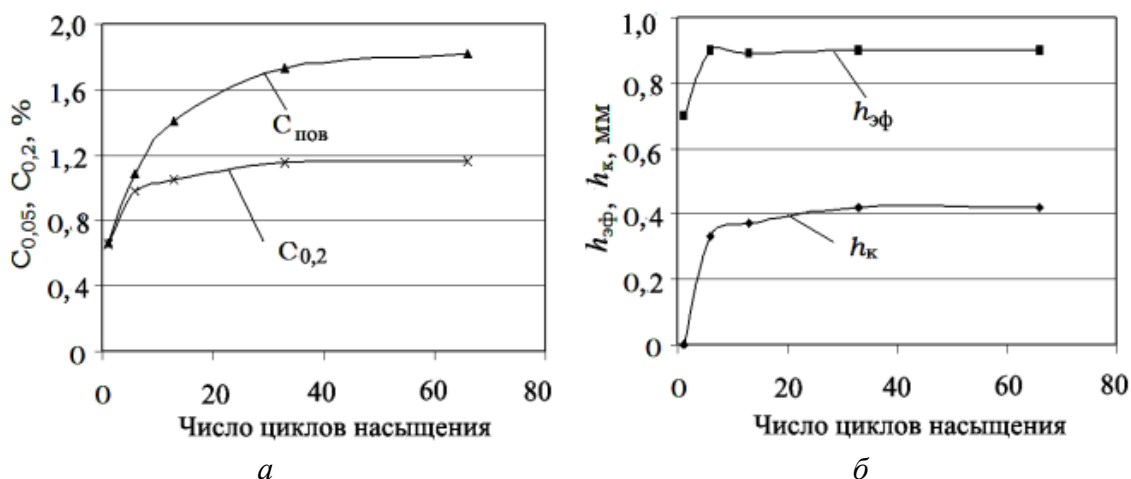


Рис. 5. Зависимость концентрации углерода $C_{\text{пов}}$ (а) и $C_{0,2}$ (б) от числа циклов насыщения ($t=940$ °С; $\tau = 308$ мин; $\Sigma\tau_a = 66$ мин; $\Sigma\tau_{\text{п}} = 242$ мин)

Из рис. 5 следует, что наиболее заметный рост концентрации углерода на поверхности и толщины карбидной зоны происходит при увеличении числа циклов до 30. Вероятно, что при слишком большом числе циклов возникнет недостаток времени, необходимый для более полного растворения карбидной фазы на поверхности.

Результаты науглероживания при сложных схемах подачи ацетилена. Наряду со сложными схемами циклирования (№ 2; 3; 4) исследовали простые схемы (№ 1 и 5) (табл. 3). При формировании сложных схем общее количество циклов n было разбито на 2 или 3 группы циклов. В этих группах варьировали как количество циклов, так и продолжительность стадий. При этом общее число циклов и время активных стадий $\Sigma\tau_a$ было одинаковым для всех схем циклирования.

Из данных таблицы следует, что изменение схемы циклов при постоянном времени активных стадий $\Sigma\tau_a$ оказывает слабое влияние на характеристики слоя. Вместе с тем следует считать предпочтительными сложные циклы, содержащие от 2 до 3 последних циклов с увеличенной стадией диффузии для устранения пересыщения поверхности углеродом. Назначение первой группы циклов – обеспечить активное науглероживание поверхности; второй и третьей группы – создать условие для более интенсивного диффузионного отвода углерода от поверхности.

Таблица 3

Влияние схемы циклирования на характеристики цементованного слоя
($t = 940\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 300\text{ мин}$; $\Sigma\tau_a : \Sigma\tau_n = 0,20$)

№	Схема циклов	Число циклов, n	Время активных стадий, $\Sigma\tau_a$	$h_{эф}$, мм	$h_{ак}$, мм	V_k , %	$C_{пов}$, %
1	$25 \cdot (2/10)$	25	50	1,05... 1,10	0,23±0 ,2	21±2	1,93... 2,14
2	$18 \cdot (2/6) + 7 \cdot (2/20)$						
3	$15 \cdot (2/7) + 6 \cdot (2/10) + 4 \cdot (2/20)$						
4	$12 \cdot (2/5) + 7 \cdot (2/10) + 6 \cdot (2/20)$						
5	$10 \cdot (5/25)$	10					

Таким образом, влияние управляющих временных факторов сводится к следующим закономерностям:

- время цементации определяет эффективную толщину цементованного слоя;
- параметры временного режима циклической подачи ацетилена ($\Sigma\tau_a$, $\Sigma\tau_n$, $\Sigma\tau_a : \Sigma\tau_n$, m , τ_a и τ_d) практически не изменяют эффективную толщину цементованного слоя; они управляют его насыщенностью, толщиной и строением карбидной зоны и, как следствие, распределением концентрации углерода и твердости;
- $\Sigma\tau_a$ - основной управляющий параметр циклического режима, от величины которого зависит отношение продолжительности стадий $\Sigma\tau_a : \Sigma\tau_d$; увеличение $\Sigma\tau_a$ (отношения $\Sigma\tau_a : \Sigma\tau_d$) сопровождается ростом насыщенности слоя углеродом, толщины карбидной зоны и доли карбидов в ней;
- схема циклов (комбинация факторов n , τ_a и τ_d) при постоянном значении $\Sigma\tau_a$ (отношения $\Sigma\tau_a : \Sigma\tau_d$) оказывает слабое влияние на характеристики слоя, в частности, на протяженность карбидной зоны;
- предпочтительны сложные циклы, содержащие 2-3 последних цикла с увеличенной стадией диффузии τ_d для устранения пересыщения поверхности углеродом.

Установленные закономерности могут быть использованы для управления толщиной и строением карбидной зоны цементованного слоя с учетом требований к эксплуатационным свойствам материалов зубчатых колес – износостойкости, контактной выносливости, циклической прочности. Для предупреждения изнашивания необходима высокая концентрация углерода на поверхности и соответствующая ему развитая карбидная зона с высокой плотностью карбидных частиц. При этом условии абразивные частицы или микронеровности сопряженной поверхности вынуждены скользить по твердым частицам карбидов. Важно «экранировать» рабочую поверхность частицами карбидов, перевести изнашивание в процесс истирания карбидов. Это требование обеспечивает проведение насыщения без циклирования. Однако из-за необходимости зубошлифования поверхностная корка карбидов будет удалена, а сам процесс будет затруднен.

Предпочтительны циклические режимы с увеличенным временем насыщения и отношением стадий $\Sigma\tau_a : \Sigma\tau_n$, равным 0,5–1,0. Время диффузионной стадии для последних 2 или 3 циклов целесообразно назначать увеличенным до 20...30 минут для снижения пересыщения поверхности и облегчения процесса зубошлифования. Примерами таких циклических

режимов для слоя с эффективной толщиной ~ 1 мм служат режимы: $8 \cdot (13/17) + 2 \cdot (9/21)$; $7 \cdot (13/17) + 3 \cdot (9/21)$ или $6 \cdot (13/17 + 4 \cdot (9/21))$.

Сопротивление контактной усталости – эксплуатационное свойство зубчатых колес, определяющее их ресурс и несущую способность. В соответствии с механизмом контактной усталости, изложенным в работе [12, 13], для предупреждения поверхностного выкрашивания рабочей поверхности зубьев, предъявляются жесткие требования к характеристикам цементованного слоя. Необходимо обеспечить хорошо развитую карбидную зону с мелкими и равномерно распределенными частицами карбидов и, как следствие, плавным снижением твердости по толщине слоя. Для того чтобы сохранить насыщенность мартенсита легирующими элементами, доля частиц карбидной фазы должна быть оптимальной (17...20 %). Этому значению соответствует концентрация углерода на рабочей поверхности в 1,3...1,5 % и твердость 61...62 HRC. Протяженность карбидной зоны должна составлять 0,4 мм и более, чтобы превышать на $\sim 0,2$ мм толщину припуска, удаляемого при зубошлифовании. Для обеспечения указанных требований предпочтительны режимы с увеличенным временем диффузионной стадии, отношением стадий $\Sigma\tau_a:\Sigma\tau_n$, равным 0,3...0,4. В качестве примера могут быть использованы режимы: $10 \cdot (5/15) + 6 \cdot (4/12)$; $15 \cdot (5/10) + 3 \cdot (5/20)$ или $10 \cdot (5/10) + 4 \cdot (5/20) + 2 \cdot (3/27)$.

Достаточная циклическая прочность – важное условие работоспособности зубчатых передач. Для теплостойких сталей согласно [14 - 16], наибольшее значение прочности зубьев при изгибе достигается при концентрации углерода на поверхности 0,9...1,0 % и толщине слоя 0,7...0,9 мм. Для обеспечения таких характеристик диффузионных слоев требуется карбидная зона с мелкими и редкими частицами карбидов. Плотность упрочняющей фазы должна быть в той мере, в которой она, увеличивая объемные изменения поверхностного слоя, способствует формированию в нем высоких остаточных напряжений сжатия.

Заключение. 1). Формирование оптимальной структуры с мелкими и редкими частицами карбидов обеспечивают циклические режимы с увеличенным временем диффузионной стадии и отношением стадий $\Sigma\tau_a:\Sigma\tau_n$, равным 0,1...0,2. К их числу относятся режимы: $8 \cdot (4/26) + 2 \cdot (3/27)$ и $7 \cdot (5/25) + 3 \cdot (2/28)$.

2). При вакуумной цементации возможен широкий диапазон изменения характеристик диффузионного слоя – его насыщенности, твердости, структурного и фазового состава, что дает возможность обеспечивать на требуемом уровне то эксплуатационное свойство, которое является определяющим для данного вида зубчатой передачи.

3) Установленные закономерности могут быть использованы для управления толщиной и строением карбидной зоны цементованного слоя с учетом требований к эксплуатационным свойствам зубчатых колес – износостойкости, контактной выносливости, циклической прочности.

Список литературы

1. Елисеев Ю.С., Крымов В.В., Нежурин И.П. и др. Производство зубчатых колес газотурбинных двигателей. - М.: Высш. шк., 2001. - 493 с.
2. Алексеев В.И., Ананьев В.М., Булыгина М.М. и др. Авиационные зубчатые передачи и редукторы. - М.: Машиностроение, 1981. - 374 с.
3. Банас И.П., Алексеева Г.П., Уткина А.Н. Современные стали для высоконапряженных зубчатых колес // Вестник машиностроения. - 1985. - № 9. - С.12-15.

4. Grafen W., Edenhofer B. Acetylene low-pressure carburising – a novel and superior carburizing technology // Heat treatment of metals. - 1999. - V. 26, № 4. - P. 79–85.
5. Kula P., Olejnik J., Kowalewski J. New vacuum carburizing technology // Heat treatment progress. - 2001. - V. 1, №. 1. - P. 57–65.
6. Atena H., Schrank F. Neiderdruck-Aufkohlung mit Hochdruck-Gasabsschreckung // НТМ. - 2002. - V. 4, №57. - P. 247–256.
7. Фахуртдинов Р.С., Пахомова С.А., Рыжова М.Ю. Проблемы модернизации оборудования для вакуумной цементации // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2017. - № 2. - С. 113–118.
8. Бузаверов К.А., Гресс М.А., Рыжова М.Ю., Шебешев К.И. Упрочняющая термическая обработка экономно легированной стали после цементации // Вестник научно-технического развития. - 2019. - № 2 (138). - С. 3-8.
10. Пахомова С.А., Фахуртдинов Р.С., Рыжова М.Ю. Особенности вакуумной цементации деталей для горнодобывающей промышленности // Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта. 2016. № 3. С. 108-116.
11. Макушина М.А., Климкина А.А., Пахомова С.А. Исследование технологической наследственности разных способов цементации // В сборнике: Будущее науки-2016. Сборник научных статей 4-й Международной молодежной научной конференции: в 4-х томах. - 2016. - С. 86-89.
12. Рыжов Н.М., Смирнов А.Е., Фахуртдинов Р.С. Управление насыщенностью углеродом диффузионного слоя при вакуумной цементации теплостойких сталей // МиТОМ. - 2004. - №8. - С. 22-27.
12. Пахомова С.А. Совершенствование технологии поверхностного упрочнения шестерен из высокопрочных сталей // Тяжелое машиностроение. - 2009. - № 10. - С. 35-38.
13. Шебешев К.И., Бузаверов К.А., Рыжова М.Ю., Гресс М.А. Повышение контактной выносливости зубчатых колес из стали 25X13H2 // Вестник научно-технического развития. - 2018. - № 6 (130). - С. 10-15.
14. Пахомова С.А., Рыжова М.Ю., Фахуртдинов Р.С., Смирнов А.Е., Макушина М.А., Пикалов А.И., Усова В.В., Юшин Н.А. Контактная выносливость и износостойкость теплостойкой стали после разных видов цементации // Вестник научно-технического развития. - 2016. - №9 (109). - С. 19-28.
15. Пахомова С.А., Манаев О.И. Разработка технологии вакуумной цементации стали 19ХГН // В сборнике: Фундаментальные научные исследования: теоретические и практические аспекты. Сборник материалов 3 Международной научно-практической конференции. - 2017. - С. 422-426.
16. Гришин В.И. Повышение контактной выносливости деталей из цементуемой стали 12Х2Н4А // Вестник научно-технического развития. - 2016. - № 11 (111). - С. 3-9.

Дата поступления: 30 сентября 2019 г.